

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20Aout 1955-Skikda  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique  
Réf : D012120017D



جامعة 20 اوت 1955 سكيكدة  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية  
المرجع: D012120017D

## THÈSE

En vue de l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : **Électromécanique**

**Contribution à l'application de la maintenance prédictive pour  
Le diagnostic des défauts des machines tournantes**

Présenté par :

**TAMALOUSSI Naima**

Soutenue publiquement le 15/10/2020

**Devant le jury:**

<b>Président :</b> Mr INEL Fouad	MCA	Université de Skikda
<b>Encadreur :</b> Mr BOUZAOUIT Azzedine	Professeur	Université de Skikda
<b>Examineurs :</b> Mr BENRETEM Abdelouahab	professeur	Université d'Annaba
Mr CHAIB Rachid	professeur	Université de Constantine
Mr BELAADI Ahmed	MCA	Université de Skikda
Mr KHERIEF nacereddine mohamed	MCA	ENSET Skikda

## Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué sous la direction de Monsieur **BOUZAOUIT Azzedine**, Professeur à l'Université 20 Aout 1955 de Skikda. Je tiens à le remercier pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant d'encadrer ce travail. Sa disponibilité et ses encouragements m'ont été d'un grand apport pour l'aboutissement de ce travail, sans oublier le professeur lakhdar khochemane .

Je remercie infiniment Monsieur, Bendib djemai médecin psychologue au suède, pour son contribution dans l'avancement de ce travail, ainsi que Monsieur Chabia youcef prof d'anglais au lycée Zighoud Yousef El-harrouch.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements au président de jurys ; Docteur INEL Foued, ainsi que les jurys de soutenance ; professeur BENRETEM Abdelouahab, professeur CHAIB Rachid, docteur BLAADI Ahmed, docteur KHERIEF nacereddine mohamed.

Remerciement et profonde gratitude vont également à tout l'équipage de Service de Maintenance de Sonelgaz de Skikda, surtout monsieur Mouat, pour ses conseils et son aide à accomplir le stage dans des conditions convenables et pleines d'ambiance, je tien à remercier du fond du cœur mon père, ma mère, mon mari qui me supportent toujours. Merci à hanane, merieme, sihem, amel, adel, kamel. Et mes fils ; AbdRahim et Amir, et sans oublier ma belle famille Bendib.

## Résumé

**Intitulé : Contribution à l'application de la maintenance prédictive pour Le diagnostic des défauts des machines tournantes.**

La stratégie de maintenance prédictive semble adéquate pour anticiper la défaillance et la dégradation de l'état des équipements. Pour les systèmes réparables, l'application des modèles mathématique adéquate pour assurer une bon prévision des risques, ainsi pour avoir un bon rendement du système. Cette modélisation appelé modélisation stochastique.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie permettant d'estimer la fiabilité, la disponibilité et la durabilité d'une pompe centrifuge. Cette dernière est installée dans un circuit de refroidissement au niveau de la centrale électrique de Skikda (Sonelgaz). La méthodologie développée permet de fournir une bonne prédiction des pannes possibles avec l'analyse d'un historique des TTR et TBF du système.

Par la suite, nous avons proposé deux approches basées sur les processus stochastiques, le premier est la modélisation de l'évolution des temps de réparation (TTR) du système étudié, principalement par le processus de dégradation de Wiener. Le deuxième modèle proposée est une approche Markovienne dynamique, dans un objectif d'une comparaison avec le calcul analytique en termes d'évaluation des indicateurs de la sureté de fonctionnement du système étudié, notamment la disponibilité instantanée, les résultats obtenus par le modèle proposé sont bien corrélés à ceux calculés analytiquement, ce qui confirme que le modèle proposé est très puissant, il va aider à la prédiction des futurs états du système, afin d'en prévoir les éventuelles actions de maintenance préventive nécessaire.

**Mots clés :** Maintenance prédictive, processus stochastique, loi normal, processus Wiener, Modélisation, chaine de Markov, Machine tournante

## **Abstract**

### **Entitled: Contribution to the application of predictive maintenance for diagnosis of faults in rotating machines**

The predictive maintenance strategy seems adequate to anticipate equipment failure and deterioration. For repairable systems, it is called to apply adequate mathematical models to ensure a good prediction of the risks, thus to have a good performance of the system. This modeling called stochastic modeling.

The objective of this thesis is to propose a methodology for estimating the reliability, availability and durability of a centrifugal pump installed in a cooling circuit at the level of the Skikda power plant (Sonalgaz). The methodology developed makes it possible to provide a good prediction of possible failures with the analysis of a history of the TTR and the TBF of the system.

Thereafter, we proposed two approaches based on stochastic processes, the first is the modeling of the evolution of repair times of the studied system, mainly by the Wiener degradation process. The second model proposed is a dynamic Markovian approach, for the purpose of a comparison with analytical computation in terms of evaluation of the indicators of the Availability of the system studied, in particular instantaneous Availability, the results of the availability obtained by the model are well correlated with those calculated analytically, confirming that the proposed model is very powerful, it will help to predict future states of the system, in order to predict possible preventive maintenance actions necessary.

**Keywords:** Predictive maintenance, stochastic process, normal law, Wiener process, Modeling, Markov chain, Rotating machine

## الملخص

### عنوان المذكرة : مساهمة تطبيق الصيانة التنبؤية في تشخيص عطل الآلة الدوارة

تبدو إستراتيجية الصيانة التنبؤية كافية لتوقع عطل المعدات وتدهورها. تعد دراسة دقة الآلة ضرورية لتحديد مؤشرات أداءها ووصف عمل أي نظام بمرور الوقت. بالنسبة للأنظمة القابلة للإصلاح، يتم تطبيق نماذج رياضية لضمان التنبؤ الجيد للمخاطر، وبالتالي الحصول على أداء جيد للنظام. هذه النمذجة تسمى النمذجة العشوائية.

الهدف من هذه الأطروحة هو اقتراح منهجية لتقدير دقة ومثانة مضخة دوارة متواجدة في دائرة التبريد على مستوى محطة كهرباء سكيكدة. تتيح هذه المنهجية المطورة بتوفير تنبؤ جيد للفشل المحتمل مع تحليل تاريخ وقوعه بدقة.

بعد ذلك ، اقترحنا منهجين يعتمدان على العمليات الستوكاستيكية ، الأول هو نمذجة تطور أوقات إصلاح النظام المدروس ، بشكل أساسي من خلال نموذج وينر ، النموذج الثاني المقترح من طرف ماركوف، الغرض منه مقارنة الحسابات التحليلية من حيث مدى سلامة ودقة مؤشرات تشغيل المضخة الدوارة ، ولا سيما التوافر اللحظي. تم تمييز الحالات المختلفة لمكونات النظام واحتمالات الانتقال بين هذه الحالات، ترتبط النتائج التي حصل عليها النموذج ارتباطاً جيداً بالنتائج المحسوبة تحليلياً ، مما يؤكد أن النموذج المقترح قوي جداً ، وسيساعد على التنبؤ بالحالات المستقبلية للنظام ، من أجل التنبؤ بإجراءات الصيانة الوقائية اللازمة.

### الكلمات المفتاحية :

الصيانة التنبؤية ، العملية العشوائية ، القانون العادي ، عملية وينر ، النمذجة ، سلسلة ماركوف ، آلة الدوران.

## Table de matières

Remerciements	
Résumé	
Table de matières	
Nomenclature	
Acronymes	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
<b><i>Chapitre I : Sureté de fonctionnement des systèmes Mécanique</i></b>	
I.1.Introduction	5
I.2. Indicateurs de sureté de fonctionnement dans le système de production	5
I.2.1. Fiabilité	6
I.2.1.1. Intérêts de la fiabilité en mécanique	6
I.2.1.2. Fonction fiabilité ou fonction de survie	7
I.2.1.3. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité	8
A) La Loi exponentielle	8
B) La Loi Normale (Laplace-Gauss)	9
C) Loi de Weibull	9
D) Loi log-normale (ou Galton)	11
E) Loi Gamma	11
F) Loi Béta	12
G) Loi uniforme	12
H) Loi du khi-deux	12
I) Autres Lois	12
I.2.1.4. Spécificité de la fiabilité en mécanique	12
A) Différentes phases du cycle de vie d'un produit	12
B) Taux de défaillance et de réparation pour des composants mécaniques	13
I.2.2. Maintenabilité	14
I.2.3. Disponibilité	15
I.2.3.1. Différentes formes de disponibilité	15
A) Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production $U_i$	15
B) Disponibilité opérationnelle globale, ou résultante ( $D_g$ )	15

C) Disponibilité asymptotique ou intrinsèque ( $D_{\infty}$ )	16
I.2.3.2. Analyses de disponibilité opérationnelle	16
A) Facteurs qualitatifs de la disponibilité opérationnelle	16
B) Analyses qualitatives d'indisponibilité	16
I.2.4. Sécurité	17
I.3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement	17
I.4. Conclusion	18
<b><i>Chapitre II : Méthodes d'analyse et Modélisation des systèmes réparable</i></b>	
II.1 Introduction	20
II.2. Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système réparable	20
II.2.1. Méthodes d'analyse fonctionnelle	20
II.2.2. Méthodes d'analyse dysfonctionnelle	21
II.2.2.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)	21
II.2.2.2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)	21
II.2.2.3. Arbre de Défaillance (AdD)	22
II.2.2.4. Diagramme de Fiabilité (DF)	23
II.2.2.5. Méthode de l'Espace des Etats (MEE)	24
II.2.2.6. Réseaux Bayésiens	24
II.2.3. Méthodes de simulation	24
II.2.3.1. Méthodes des réseaux de Pétri (RdPS)	24
II.2.3.2. simulation de monte-carlo (SMC)	25
II.3. Pourquoi la Modélisation	25
II.4. Modélisation par les processus stochastique	26
II.4.1. Différents modèles de dégradation	26
II.4.1.1. modèles à dégradation discrète	26
A) Processus de poisson	27
B) Processus Semi-markovien	27
C) Processus de Markov	28
II.4.1.2. modèles à dégradation continue	29
A) Processus de Lévy	30
B) Processus de Gamma	30
C) Processus de Wiener (mouvement brownien)	32

II.5. La modélisation et la l'analyse statistique	35
II.6. les tests statistiques	36
II.6.1. principe d'un test d'hypothèse	37
II.7. Conclusion	37
<b><i>Chapitre III : Analyse des arrêts d'un système réparable, cas : pompe centrifuge</i></b>	
III.1.Introduction	39
III.2. Classification des turbomachines	39
III.2.1. Suivant la forme du rotor	39
III.2.2. Comportement du fluide	40
III.2.3. Sens du transfert d'énergie	40
III.2.4. Nombre d'éléments disposés en série	40
III.2.5. Mode d'action du fluide	41
III.2.6. Degré d'injection	41
III.3.Définition et principe de base des pompes	41
III.4. Les différents organes d'une pompe centrifuge	41
III.4.1. Organes ayant une fonction hydraulique	41
III.4.2. Organes ayant une fonction mécanique	42
III.4.3. Organes ayant une fonction d'étanchéité	43
III.5.Paramètres de travail d'une pompe centrifuge	44
III.5.1. Le débit	44
III.5.2. La hauteur manométrique totale	44
III.5.3. La Pression	44
III.5.4. Puissance	44
III.5.5. Pertes et rendements	45
III.6. Paramètres de choix des pompes centrifuges	46
III.7. Avantage des pompes centrifuges	47
III.8. Etude de cas ; Pompe alimentaire HPT 28-20 à 8 étages	47
III.8.1. Historique des pannes de la pompe alimentaire	49
III.8.2.Présentation de la méthode ABC	51
III.8.2.1.Détermination du cadre de l'étude et ses limites	51
III.8.2.2.Construction de la courbe ABC	51
III.8.2.3.Représentation graphique	51
III.8.2.4. Analyse ABC de la pompe alimentaire HPT28-20	52

III.8.3. Analyse de L'AMDEC	53
III.8.3.1. Classification des éléments par leurs criticités	60
III.8.3.2. Amélioration de la disponibilité	60
III.9. Conclusion	60
<b><i>Chapitre IV: Modélisation stochastique et calcul analytique de la disponibilité d'une moto-</i></b>	
<b><i>pompe</i></b>	
IV.1. Introduction	62
IV.2. Calcul fiabiliste d'un système	62
IV.3. Etude fiabiliste d'une pompe alimentaire	64
IV.3.1. Analyse du processus de dégradation par l'évolution de TTR	65
IV.3.1.1. Analyse statistique des valeurs de TTR	66
IV.3.1.2. Vérification de l'ajustement de l'adéquation de distribution normale des valeurs de TTR	68
IV.3.1.3. Modélisation du temps de réparation (TTR) par le processus de dégradation Wiener	68
IV.3.2. Détermination des caractéristiques de fiabilité	69
IV.3.2.1. Calcul du taux de défaillance $\lambda$	69
IV.3.2.2. Calcul du taux de réparation $\mu$	69
IV.3.3. chaîne de Markov de système étudié	70
IV.3.4. Interprétation des résultats	73
IV.4. Conclusion	74
Conclusion générale et perspectives	76
Bibliographie	79
Annexe	86

## Nomenclature

$R(t)$  : la fonction de fiabilité.

$F(t)$  : la fonction de répartition.

$f(t)$  : la fonction de densité de probabilité.

$\lambda$  : le taux de défaillance.

$\mu$  : le taux de réparation.

$E(t)$  : Espérance.

$\delta$ :l'écart-type (loi normale).

$m$  : la moyenne (loi normale).

$h$  : le pas de temps.

$Ga(\alpha,\beta)$  : la loi gamma.

$\alpha$ : paramètre de forme (la loi gamma).

$\beta$  : paramètre d'échelle (la loi gamma).

$\eta$ : paramètre d'échelle (la loi Weibull).

$\gamma$  : paramètre de localisation (la loi Weibull).

$\beta$  : paramètre de forme (la loi Weibull).

$H_0$  : l'Hypothèse nulle.

$H_1$ : l'Hypothèse alternative.

$X(t)$  : variable au cours du temps.

$B(t)$  : le mouvement brownien.

$\Gamma$  : la fonction gamma.

$\Phi$  ; fonction de répartition de la loi normale réduite.

$X$  : variable aléatoire.

$W(t)$  : Le processus de Wiener standard.

$Y(t)$  : équation stochastique.

$i_e$  : Vecteur de sommation.

$i$ : Matrice d'identité.

$s$ : Variable de Laplace.

$P_0$ : vecteur de condition initial.

$S$  : sous système.

$H_m$  : La hauteur manométrique

$H_g$  : La hauteur géométrique

$\Delta H$  : Les pertes de charge.

$P_{abs}$  : Pression absolue

$P_{atm}$  : Pression atmosphérique

$P_{eff}$  : Pression effective

$P_h$  : Puissance hydraulique

$P_u$  : Puissance utile

$Q_v$  : le débit volumique

$\rho$  : la masse volumique

$P_c$  : Puissance consommé

$M$  : le moment de torsion.

$\omega$  : vitesse angulaire de la roue d'action.

$H_{th}$  : hauteur manométrique de la turbomachine.

$H_r$  : la hauteur réelle.

$Q_r$  : le débit réel.

$Q_{th}$  : le débit théorique.

$P_r$  : La puissance hydraulique.

$P_{th}$  : La puissance théorique.

$\eta_{hy}$  : le rendement hydraulique.

$\eta_v$  : le rendement volumétrique.

$\eta_{méc}$  : le rendement mécanique.

$\eta$  : Le rendement global.

$P_{ij}$  : probabilité de transition de l'état  $i$  vers l'état  $j$  .

$\mu_d$  : dérive du modèle Wiener.

$\sigma_d$  : volatilité du modèle Wiener.

TI : temps d'intervention .

C : indice de criticité

F : fréquence de panne.

G : gravité de panne.

D : probabilité de non-détection.

## Acronymes

SdF : Sureté de fonctionnement

FMDS : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité.

MTBF: moyenne des temps de bon fonctionnement

MTI: moyenne des temps d'indisponibilité.

MTTF : Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

TTR : Temps Total de Réparation.

MTTR : Durée moyenne de réparation.

MUT : Durée moyenne de fonctionnement après réparation.

MDT: Durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.

TBF: Temps de Bon fonctionnement.

MTBF: Durée moyenne entre deux défaillances.

APTER : Analyse fonctionnelle Externe.

SADT : Structured Analysis and Design Technique.

SART : Structured Analysis-Real time

APR : Analyse Préliminaire des Risques.

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités.

AdD : Arbre de Défaillance.

ER : Evènement Redoute.

DF : Diagramme de Fiabilité.

MEE : Méthode de l'Espace des Etats.

DBN : Dynamics Bayesian Network.

RdPS : Réseaux de Pétri Stochastique.

SMC : simulation de Monte-Carlo.

SDE : l'équation différentielle stochastique.

MEE : Méthodes de l'Espace des Etats.

EIREDA: European Reliability Industry Data Handbook.

NPRD: est un rapport du Centre RAC.

RAC: Reliability Analysis Center.

HPT : pompe horizontale.

OREDA : Offshore Reliability Data(Financé et géré par les acteurs l'industrie pétrolière)

## Liste des Figures

### Chapitre I

<b>Fig. I.1</b>	Courbe en baignoire	10
<b>Fig. I.2</b>	La courbe du taux de défaillance en mécanique	13
<b>Fig. I.3</b>	Critères de disponibilité opérationnelle	17
<b>Fig. I.4</b>	Relation entre fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité	17
<b>Fig. I.5</b>	Durées moyennes associées à la SdF	18

### Chapitre II

<b>Fig.II.1.</b>	L'arbre de défaillance	23
<b>Fig.II.2.</b>	Représentation d'un modèle à dégradation discrète	27
<b>Fig.II.3.</b>	Modèle Markovien	28
<b>Fig.II.4.</b>	Représentation d'un modèle à dégradation continue	30
<b>Fig.II.5.</b>	Trajectoires simulées par le processus Gamma	31
<b>Fig.II.6.</b>	Trajectoires simulées par le processus Gamma ( $\alpha=2, \beta=4$ )	32
<b>Fig.II.7.</b>	Trajectoires simulées par le processus Wiener	32

### Chapitre III

<b>Fig.III.1.</b>	Rotor de turbomachines modernes	39
<b>Fig.III.2.</b>	Classification des turbomachines suivant la forme du rotor	40
<b>Fig.III.3.</b>	schéma d'une pompe centrifuge	41
<b>Fig.III.4.</b>	Influence de la vanne de réglage	47
<b>Fig.III.5.</b>	Point de fonctionnement d'une pompe	47
<b>Fig.III.6.</b>	Vue générale de la pompe alimentaire HPT 28-20 à 8 étages	48
<b>Fig.III.7.</b>	Classification des pannes par rapport au cumul heures d'arrêt	50
<b>Fig.III.8.</b>	Classification des pannes par rapport aux cumuls nombre des pannes %	50
<b>Fig.III.9.</b>	Représentation graphique de la méthode ABC	51
<b>Fig.III.10.</b>	la courbe ABC de la pompe alimentaire HPT28-20	53

### Chapitre IV

<b>Fig. IV.1.</b>	Le taux de réparation	66
<b>Fig. IV.2.</b>	Le temps de réparation cumulé	66
<b>Fig. IV.3.</b>	Fonction de répartition	67
<b>Fig. IV.4.</b>	Fonction de densité de probabilité	67

<b>Fig. IV.5.</b>	Fonction de fiabilité	67
<b>Fig. IV.6.</b>	Fonction de risque	68
<b>Fig. IV.7.</b>	Temps de réparation TTR calculé et modélisé pour une loi normale N (4.3, 7)	69
<b>Fig. IV.8.</b>	Représentation du temps cumulé de réparation calculé et avec le modèle Wiener pour une loi normale N(55,50)	69
<b>Fig. IV.9.</b>	Les deux sous système étudié	70
<b>Fig.IV.10.</b>	Chaine de Markov de système	70
<b>Fig.IV.11.</b>	La Fiabilité du système	72
<b>Fig.IV.12.</b>	La Maintenabilité du système	72
<b>Fig.IV.13.</b>	La Disponibilité du système	72

## Liste des Tableaux

### Chapitre III

<b>Tableau.III.1.</b>	Classification des différents types de panne de la pompe alimentaire	50
<b>Tableau.III.2.</b>	Les principaux organes mécaniques défaillants et leurs temps d'arrêt	52
<b>Tableau.III.3.</b>	Analyse AMDEC	56
<b>Tableau.III.4.</b>	Les Actions correctives sur les éléments de la pompe	60

### Chapitre IV

<b>Tableau. IV.1.</b>	Durée du bon fonctionnement TBF et de réparation TTR de la pompe d'alimentation	65
<b>Tableau IV.2.</b>	Résultats du test statistique pour la loi Normale	68

# *Introduction générale*

## **Introduction Générale**

La sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes. Elle sera aussi de qualité si la maintenance associée est de qualité tant sur le plan humain que technologique. Il est donc important de connaître la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité de ces systèmes.

Pour un système de production réparable, on est appelé à appliquer des modèles mathématiques adéquats pour assurer une bonne prévision des risques, ainsi pour avoir un bon rendement du système. Cette modélisation est appelée modélisation stochastique.

Les systèmes de production se dégradent dans le temps qui provoquent un arrêt total ou partiel, et qui produira une diminution du rendement, ainsi qu'une augmentation des coûts de la maintenance.

Afin de pouvoir modéliser la dégradation d'un système et pour mieux comprendre les causes des pannes, nous avons besoin de développer des modèles qui englobent toutes les données de dégradation, ces modèles permettent d'améliorer la fiabilité et la politique de maintenance des systèmes.

Nous nous intéressons dans cette étude à la modélisation de la disponibilité et la fiabilité d'une pompe alimentaire, en se basant sur le processus Wiener et Markov.

L'objectif de cette thèse consiste à développer des modèles de maintenance, en se basant sur un outil d'analyse très puissant qui est les chaînes de Markov, ainsi que le processus Wiener, pour un système qui se dégrade. Dans notre cas, on a étudié un système réparable qui est une pompe centrifuge à 8 étages, cette étude permet de modéliser les comportements dysfonctionnels de ce système, dans le but de minimiser les coûts de maintenance et maximiser la durée de fonctionnement, donc on va définir un modèle de disponibilité et un modèle de fiabilité pour fournir une bonne prédiction des pannes, et l'amélioration de la politique de maintenance.

Le manuscrit de thèse est structuré en quatre chapitres selon la méthodologie suivante :

Le premier chapitre, Démontre la théorie de la FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité), nous avons présenté les principales lois mathématiques nécessaires pour calculer 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, le manque de données...

Le deuxième chapitre, présente les modèles utilisés en sureté de fonctionnement. Nous rappelons les principales méthodes d'analyses fonctionnelles et dysfonctionnelles existantes. La partie dysfonctionnelle d'un système n'étant pas toujours statique, il est nécessaire d'adopter des méthodes dynamiques, ensuite une explication des différents modèles de dégradation et ses processus associés. Tels que les processus markoviens, processus de poisson, processus de Lévy, processus gamma, processus de Wiener.

Le troisième chapitre, sera réservé pour l'étude des pompes centrifuges ; fonctionnement, paramètre de choix, avantages, ainsi que les différentes méthodes d'analyses des pannes au niveau des mécanismes constituant la pompe alimentaire HPT 28-20: telle que la méthode ABC, et AMDEC.

Le quatrième chapitre, porte une identification des indices de fiabilité de système pompe alimentaire (le taux de panne et le taux de réparation), ont été calculés. L'estimation de ces indices passe préalablement par une analyse statistique complète des historiques de la durée de panne et de réparation recueillie sur site pour chaque équipement. 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 pompe alimentaire concernée. La principale caractéristique des chaines de Markov est le processus sans mémoire. Cette dernière nous permis de connaitre l'état de notre système sans avoir recours à son historique. Nous considérons donc les graphes de Markov pour représenter les systèmes de production et étudier les apports des stratégies de maintenance possible pour accroitre leur disponibilité dans le cadre d'un service donné. Les modèles intègrent les différents processus auxquels sont soumis les systèmes. Leur traitement permet une évaluation prévisionnelle du comportement du système et met en valeur les paramètres influant et les principes de gestion de maintenance

convenables. La modélisation des valeurs de TTR par le processus Wiener (mouvement Brownien), est effectuée dans ce chapitre.

# *Chapitre 01 : Sureté de fonctionnement des systèmes Mécanique*

I.1.Introduction	5
I.2. Indicateurs de sureté de fonctionnement dans le système de production	5
I.2.1. Fiabilité	6
I.2.1.1. Intérêts de la fiabilité en mécanique	6
I.2.1.2. Fonction fiabilité ou fonction de survie	7
I.2.1.3. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité	8
A) La Loi exponentielle	8
B) La Loi Normale (Laplace-Gauss)	9
C) Loi de Weibull	9
D) Loi log-normale (ou Galton)	11
E) Loi Gamma	11
F) Loi Béta	12
G) Loi uniforme	12
H) Loi du khi-deux	12
I) Autres Lois	12
I.2.1.4. Spécificité de la fiabilité en mécanique	12
A) Différentes phases du cycle de vie d'un produit	12
B) Taux de défaillance et de réparation pour des composants mécaniques	13
I.2.2. Maintenabilité	14
I.2.3. Disponibilité	15
I.2.3.1. Différentes formes de disponibilité	15
A) Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production $U_i$	15
B) Disponibilité opérationnelle globale, ou résultante ( $D_g$ )	15
C) Disponibilité asymptotique ou intrinsèque ( $D_\infty$ )	16
I.2.3.2. Analyses de disponibilité opérationnelle	16
A) Facteurs qualitatifs de la disponibilité opérationnelle	16
B) Analyses qualitatives d'indisponibilité	16
I.2.4. Sécurité	17
I.3. Métriques de la Sureté de Fonctionnement	17
I.4. Conclusion	18

## I.1. Introduction

Les études de sûreté de fonctionnement regroupent les activités d'évaluation prévisionnelle de la fiabilité, de la maintenabilité, de la disponibilité et de la sécurité d'une organisation, d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces évaluations permettent, par comparaison aux objectifs ou dans l'absolu, d'identifier les actions de conception ou d'amélioration de l'entité pour atteindre le niveau voulu. Ces études consistent généralement à analyser les effets des pannes, dysfonctionnements, erreurs d'utilisation ou agressions de l'entité étudiée.

La sûreté de fonctionnement (SdF) fait partie des enjeux majeurs de ces dernières années et des années à venir. Cette notion désigne à la fois un ensemble de moyens et un ensemble de résultats produits par ces moyens [1] :

- Des méthodes et des outils pour caractériser et maîtriser les effets des aléas, des pannes et des erreurs.
- La quantification des caractéristiques des systèmes pour exprimer la conformité dans le temps de leurs comportements et de leurs actions [2].

Dans ce premier chapitre, nous exposons les termes généraux de la sûreté de fonctionnement qui sont la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. On s'intéresse aussi aux principales lois de probabilité utilisées en fiabilité.

## I.2. Indicateurs de sûreté de fonctionnement dans le système de production

La Sûreté de Fonctionnement est définie, comme étant :

- La fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité.
- La science des défaillances.
- La confiance justifiée dans le service délivré.
- Le maintien de la qualité dans le temps [3].

La définition « Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité » que l'on retrouve dans l'acronyme FMDS, fait référence à ces différents termes et met en avant leur complémentarité. Si la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité sont des performances d'un système, la sûreté de fonctionnement ne se réduit pas uniquement à une de ces performances, elle se construit à travers toutes ces dernières.

La définition « Science des défaillances » suppose la connaissance, l'évaluation, la prévision, la mesure et la maîtrise des défaillances. La sûreté de fonctionnement apparaît ainsi comme l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données [4].

La définition « Confiance justifiée dans le service délivré » dépend principalement de la perception des utilisateurs. Le service délivré par un système et son comportement perçu par son ou ses utilisateurs, sachant qu'un utilisateur est un autre système (humain ou physique) qui interagit avec le système considéré.

La définition « Maintien de la qualité dans le temps » prend en compte la conformité aux exigences (explicites ou non). Elle présente le défaut de laisser supposer qu'une activité de sureté de fonctionnement se conduit nécessairement dans le cadre d'une démarche qualité, ce qui est insuffisant [5].

Globalement, la définition de la Sureté de Fonctionnement est considérée comme étant la conjugaison de ces quatre définitions. L'ensemble de ces définitions est cohérent et fournit une image plus complète de la SdF prise selon plusieurs points de vue [6].

### **I.2.1. Fiabilité**

#### **I.2.1.1. Intérêts de la fiabilité en mécanique**

Les évaluations fiabilistes des systèmes mécaniques reposent sur de nombreux paramètres en premier lieu 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 [7].

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. 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 leurs sont propres. Un même type de système peut avoir plusieurs équipements dont la fiabilité varie significativement.
- Les conditions d'utilisation et l'environnement de fonctionnement ne sont pas les mêmes pour chaque système. 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 dégradation 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, 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.

### **I.2.1.2. 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 :

$$R(t) = P(tf > t) = 1 - P(tf \leq t) = 1 - F(t) \quad (I.1)$$

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

Pour compléter l'approche théorique de la notion de fiabilité, il est nécessaire de définir les notions suivantes :

La fonction  $f(t)$  désigne la densité de probabilité de  $t$  et elle est donnée par :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{I.2})$$

La fonction de répartition  $F(t)$  et la fonction de fiabilité  $R(t)$  sont exprimées à partir de la fonction de densité  $f(t)$  dans les relations suivantes [6] :

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (\text{I.3})$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (\text{I.4})$$

### I.2.1.3. Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

Il existe plusieurs lois quand on peut utiliser on maintenance industrielle. Le choix de la loi utilisée pour modéliser un système dépend des données recueillies de celui-ci pendant une période de temps données.

#### A) La loi exponentielle

La loi exponentielle a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant la quelle le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Elle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre, le taux de défaillance  $\lambda$  [8]. Les propriétés principales de la distribution exponentielle sont :

- Densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{I.5})$$

- Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{I.6})$$

- Fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{I.7})$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \lambda = C^{te} \quad (\text{I.8})$$

- Espérance :

$$E(t) = 1/\lambda \quad (\text{I.9})$$

- Variance :

$$\sigma^2 = 1/\lambda^2 \quad (\text{I.10})$$

- Ecart type :

$$\sigma = 1/\lambda \quad (\text{I.11})$$

### B) 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  $+\infty$ . Elle est caractérisée par :

- Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{I.12})$$

- Fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (\text{I.13})$$

- Fiabilité :

$$R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^\infty e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (\text{I.14})$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^\infty e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx} \quad (\text{I.15})$$

### C) 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 [3]:

$\beta$ : Paramètre de forme ( $\beta > 0$ );

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

$\gamma$ : Paramètre de position ( $\gamma > 0$ ).

Elle est caractérisée par :

- Fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{I.16})$$

- Densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{I.17})$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{I.18})$$

- La durée de vie moyenne ou MTTF :

$$\text{MTTF} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (\text{I.19})$$

Avec  $\Gamma$  la fonction gamma définie par :

$$\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx \quad (\text{I.20})$$

La loi de Weibull est définie par deux paramètres lorsque  $\gamma = 0$ .

Lorsque  $\beta = 1$  et  $\gamma = 0$ , on se retrouve dans le cas particulier de la loi exponentielle avec

$$\lambda = 1 / \eta$$

Aussi, lorsque  $\beta \approx 3,5$  et  $\gamma = 0$ , on est dans le cas d'une distribution normale [6]:

Suivant les valeurs de  $\beta$ , 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 décrit par la courbe en baignoire. (Figure. I.1)

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

Le cas  $\gamma < 0$  est non défini.

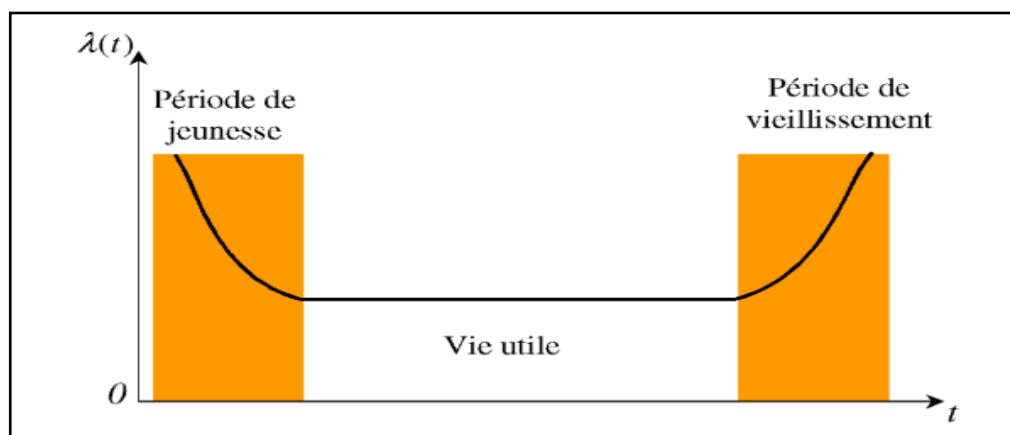


Fig. I.1. Courbe en baignoire

### D) Loi Log-normale (ou de Galton)

Une variable aléatoire continue est positive  $t$  et 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 la moyenne  $m$  et l'écart-type  $\sigma$  : Elle est caractérisée par :

- Fiabilité :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log t - m}{\sigma}\right) \quad (\text{I.21})$$

Avec :  $\Phi$  ; fonction de répartition de la loi normale réduite

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{I.22})$$

- La fonction de répartition :

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\log(t) - m}{\sigma}\right) \quad (\text{I.23})$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m}{\sigma}\right)^2}}{t \int_t^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} f(x) dx} \quad (\text{I.24})$$

### E) Loi Gamma

La loi gamma est la loi de l'instant d'apparition du  $\alpha^{\text{ème}}$  évènement dans un processus de Poisson. Soit  $\{Ti\}$   $i = 1, 2, \dots, \alpha$ , le vecteur représentant les durées inter-évènements (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  $\beta$ , alors le temps cumulé d'apparition de  $\alpha$  défaillances suit une loi Gamma de paramètre  $(\alpha, \beta)$ .

- Sa densité de probabilité s'écrit :

$$f(t) = \frac{\beta^\alpha \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta t}}{\Gamma(\alpha)} \quad \alpha \geq 0; \text{ et } \beta \geq 0 \quad (\text{I.25})$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta^\alpha \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta t}}{\int_t^{\infty} \frac{\beta^\alpha \cdot u^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta u}}{\Gamma(\alpha)} du} \quad \text{avec } \Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-X} X^{\alpha-1} dx \quad (\text{I.26})$$

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

### F) Loi Bêta

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

- la densité de probabilité

$$f(t) = \frac{\Gamma(\alpha+b)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(b)} t^{\alpha-1} (1-t)^{b-1} \quad (I.27)$$

### G) 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  $[0, \alpha]$  sont données par les formules suivantes :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} & \text{si } 0 \leq t \leq \alpha \\ 0 & \text{si } t > \alpha \end{cases} \quad (I.28)$$

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

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-\alpha} & \text{si } \alpha \leq t \leq b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (I.29)$$

### H) 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  $\nu$  appelé degrés de liberté et  $n$  est définie que pour des valeurs positives.

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

$$\mathcal{F}(t) = \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\frac{\nu}{2})} t^{\frac{\nu}{2}-1} \cdot e^{-\frac{t}{2}} \quad t \geq 0 \quad (I.30)$$

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

### I) Autres lois

Il existe d'autres lois de probabilité comme : la loi binomiale, la loi de Poisson, la loi hypergéométrique, gaussien inverse... [9].

#### I.2.1.4. Spécificité de la fiabilité en mécanique

##### A) 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 I.1). 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) [10].

### B) Taux de défaillance et de réparation 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, 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 (Figure. I.2) [11].

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 [12].

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.

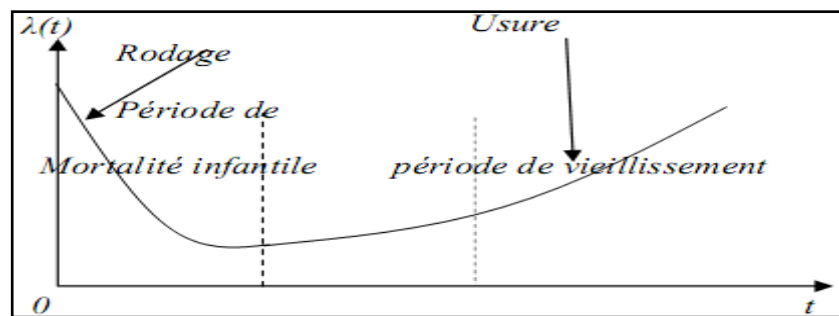


Fig. I.2. La courbe du taux de défaillance en mécanique.

Contrairement aux composants électroniques, les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, ... [2].

Le taux instantané de défaillance  $\lambda(t)$ , est une des caractéristiques de la fiabilité. La valeur  $\lambda(t) dt$  représente la probabilité conditionnelle d'avoir une défaillance dans l'intervalle de temps  $[t, t + dt]$ , sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance dans l'intervalle de temps  $[0, t]$ . Ainsi, en appliquant le théorème des probabilités conditionnelles, puis le théorème des probabilités totales,  $\lambda(t)$  s'écrit :

$$\lambda(t)dt = \frac{\text{prob (défaillant sur } [t, t + dt] \text{ sans défaillance sur } [0, t])}{\text{prob (non défaillant sur } [0, t])} \quad (\text{I.31})$$

$$\lambda(t)dt = \frac{\text{prob (défaillant sur } [t, t + dt]) - \text{prob (défaillance sur } [0, t])}{\text{prob (non défaillant sur } [0, t])} \quad (\text{I.32})$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{I.33})$$

On en déduit que la fiabilité peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right) \quad (\text{I.34})$$

Taux de réparation instantané : La valeur  $\mu(t) dt$  représente la probabilité pour qu'une entité n'étant pas réparée à  $t$  le soit à  $t + dt$ . Le taux de réparation  $\mu(t)$  s'écrit alors [6] :

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \cdot \frac{dM(t)}{dt} \quad (\text{I.35})$$

### I.2.2. Maintenabilité

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 mesuré par la probabilité d'être remise, par une action de maintenance, dans des conditions opérationnelles définies, dans

une durée fixée, les ressources et les conditions d'environnement étant préalablement spécifiées.

$$M(t) = \text{prob}(E \text{ est réparable sur } [0, t]) \quad (\text{I.36})$$

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.

### I.2.3. Disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir les fonctions requises dans les conditions données et à un instant donné. Elle est caractérisée par la probabilité  $D(t)$  que l'entité  $E$  soit en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

$$D(t) = P(E \text{ non défaillant à l'instant } t) \quad (\text{I.37})$$

#### I.2.3.1. Différentes formes de disponibilité

##### A) Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production $U_i$

La disponibilité opérationnelle «*Dop*», est l'évaluation de la disponibilité obtenue à partir de mesures de temps saisis à partir des états d'un équipement. Elle est évaluée à partir des relevés de temps relatifs :

- à une période de temps (1 jour, 1 semaine,  $n$  mois, 1 an) ;
- À un équipement ou, s'il s'agit d'une ligne de production, d'un tronçon  $U_i$  ;
- Aux temps d'indisponibilité propre de moyenne  $MTI$  et des durées de bon fonctionnement de moyenne  $MTBF$  suivant le modèle :

$$D_{OP} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} < 1 \quad (\text{I.38})$$

Avec :  $MTBF$ : moyenne des temps de bon fonctionnement.

$MTI$ : moyenne des temps d'indisponibilité.

##### B) Disponibilité opérationnelle globale, ou résultante ( $D_g$ )

Cette disponibilité de ligne s'obtient par composition des  $D_{op}$  d'unités, suivant la présence et la valeur de stocks intermédiaires dits « stocks tampons » que la logique du flux tendu tend à supprimer. Elle constitue un gisement d'amélioration de la productivité. À ce titre, elle représente un objectif de maintenance à atteindre suivant la conjoncture de la production (en surcapacité ou en limite de capacité). L'améliorer passe inexorablement par l'amélioration des  $D_{op}$  ( $U_i$ ) les plus faibles.

### C) Disponibilité asymptotique ou intrinsèque ( $D_{\infty}$ )

Pour un équipement donné, il existe une limite de disponibilité  $D_{\infty} = D$  au même titre qu'il existe une limite de performance de production (temps de cycle ou cadence maximale) plus visible et mieux connue (capacité de production nominale du cahier des charges).

Cette disponibilité intrinsèque est une caractéristique initiale de l'équipement, de valeur difficile à « construire » a priori. Par contre, elle est la résultante de la prise en compte initiale des critères qualitatifs de maintenabilité et de fiabilité qui doivent figurer au cahier des charges de fourniture.

### I.2.3.2. Analyses de disponibilité opérationnelle

#### A) Facteurs qualitatifs de la disponibilité opérationnelle

La disponibilité opérationnelle d'un équipement est la résultante de nombreux facteurs que nous avons succinctement identifiés et mis en famille suivant la figure (I.3).

#### B) Analyses qualitatives d'indisponibilité

De façon analogue aux analyses qualitatives et aux expertises de pannes qui ont fait la preuve de leur richesse d'exploitation comme source de progrès, il est souhaitable de réaliser au bureau des méthodes des « analyses d'indisponibilité » paramétrées par les MTI. Après avoir mis en mémoire, classé, puis sélectionné certaines indisponibilités critiques ou anormales (longues ou répétitives), nous analyserons l'indisponibilité à trois niveaux :

- **1<sup>er</sup> niveau**, analyse de la défaillance à l'origine de l'indisponibilité. S'il s'avère possible de la guérir (maintenance proactive) ou de la prévenir (maintenance préventive), inutile d'aller au-delà. Sinon ;
- **2<sup>eme</sup> niveau** : analyse des critères de disponibilité énumérés ci-dessus. Il s'agit alors d'opérer un diagnostic identifiant le ou les critères à l'origine des temps d'arrêt propres anormalement pénalisants. Puis de rechercher des améliorations qui peuvent être de nature technique ou organisationnelle ;
- **3<sup>eme</sup> niveau** : analyse des conditions de l'intervention, ou de la série d'interventions, pour remettre en cause la logistique de maintenance et son organisation. Par exemple, l'analyse des 2 heures d'indisponibilité mettra en évidence 1 h 15 dédiée à la recherche interne (magasin), puis chez un distributeur voisin, de la pièce de rechange nécessaire

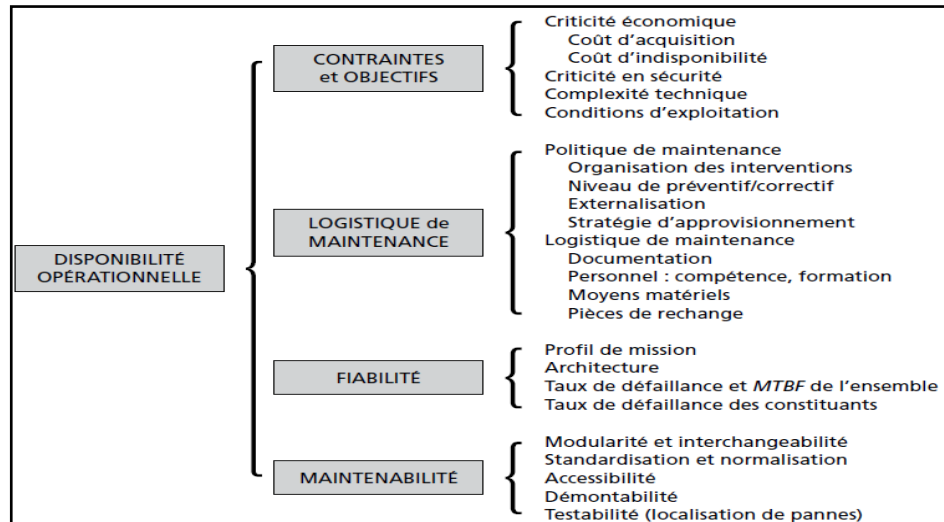


Fig. I.3. Critères de disponibilité opérationnelle.

### I.2.4. Sécurité

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité  $S(t)$  que l'entité  $E$  ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [3].

$$S(t) = P(E \text{ évite des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]) \quad (I.49)$$

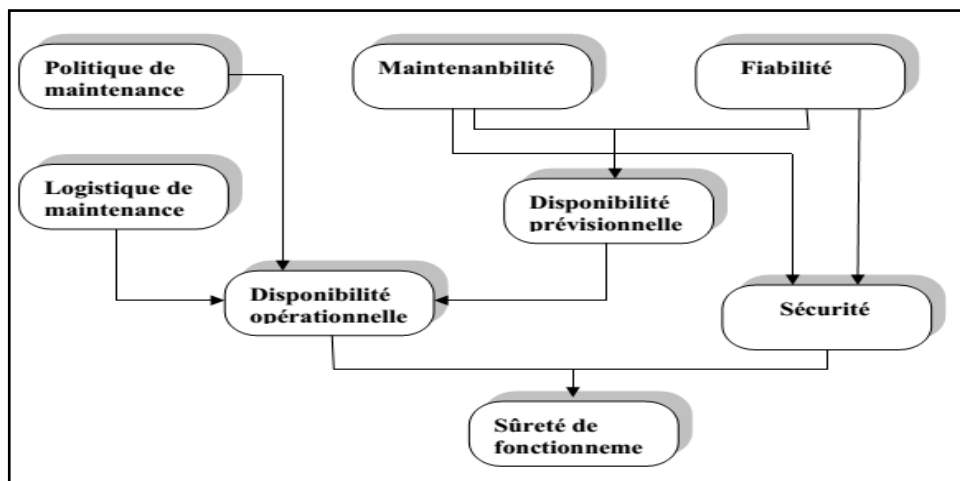


Fig. I.4. Relation entre fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité.

### I.3. Métriques de la Sureté de Fonctionnement

Des grandeurs associées à la sureté de fonctionnement peuvent être calculées à partir des mesures de probabilité. Ces grandeurs suivantes caractérisent des durées moyennes [13] :

- **MTTF** (Mean Time To Failure) : Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (I.40)$$

- **MTTR** (Mean Time To Repair) : Durée moyenne de réparation.

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt \quad (I.41)$$

- **MUT** (Mean Up Time) : Durée moyenne de fonctionnement après réparation.
- **MDT** (Mean Down Time): Durée moyenne d'indisponibilité après défaillance.
- **MTBF** (Mean Time Between Failure): Durée moyenne entre deux défaillances.

$$MTBF = MDT + MUT \quad (I.42)$$

Ces durées sont représentées dans la figure (I.5).

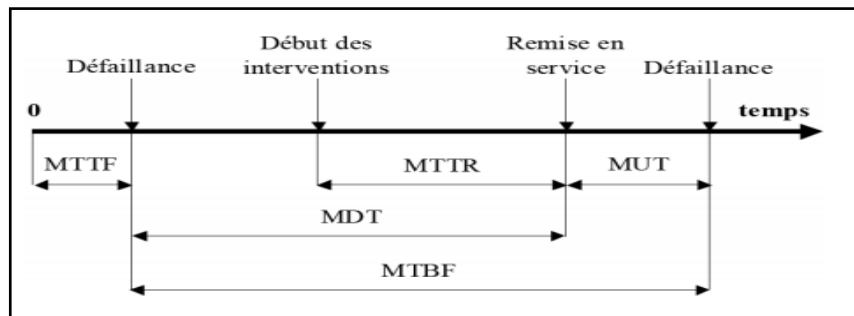


Fig. I.5. Durées moyennes associées à la SdF [2].

#### I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un rappel sur la SdF, la deuxième partie consiste à présenter la fiabilité dans les différents domaines ; fiabilité électronique, fiabilité mécanique... Il est nécessaire de présenter la fiabilité en fonction du temps et en particulier pour les composants mécaniques. Dans le chapitre suivant, nous présentons les méthodes d'analyse pour la sûreté de fonctionnement des systèmes réparables ainsi que la modélisation stochastique de dégradation de système complexe.

# ***Chapitre 02 :***

## ***Méthodes d'analyse et Modélisation***

### ***des systèmes réparable***

II.1 Introduction	20
II.2. Méthodes d'analyse de la sureté de fonctionnement d'un système réparable	20
II.2.1. Méthodes d'analyse fonctionnelle	20
II.2.2. Méthodes d'analyse dysfonctionnelle	21
II.2.2.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)	21
II.2.2.2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)	21
II.2.2.3. Arbre de Défaillance (AdD)	22
II.2.2.4. Diagramme de Fiabilité (DF)	23
II.2.2.5. Méthode de l'Espace des Etats (MEE)	24
II.2.2.6. Réseaux Bayésiens	24
II.2.3. Méthodes de simulation	24
II.2.3.1. Méthodes des réseaux de Pétri (RdPS)	24
II.2.3.2. simulation de monte-carlo (SMC)	25
II.3. Pourquoi la Modélisation	25
II.4. Modélisation par les processus stochastique	26
II.4.1. Différents modèles de dégradation	26
II.4.1.1. modèles à dégradation discrète	26
A) Processus de poisson	27
B) Processus Semi-markovien	27
C) Processus de Markov	28
II.4.1.2. modèles à dégradation continue	29
A) Processus de Lévy	30
B) Processus de Gamma	30
C) Processus de Wiener (mouvement brownien	32
II.5. La modélisation et la l'analyse statistique	35
II.6. les tests statistiques	36
II.6.1. principe d'un test d'hypothèses	37
II.7. Conclusion	37

## II.1. Introduction

La modélisation de la dégradation des systèmes est capitale pour la maîtrise des risques industriels, pour la gestion de leur durée de vie, pour l'optimisation des opérations d'inspection, de maintenance et de réparation, ainsi que pour le choix des engagements des constructeurs sur la garantie de leurs équipements [14]. La modélisation probabiliste de la dégradation nécessite la prise en compte de l'évolution des incertitudes au cours du temps. Ces incertitudes résultent de deux causes: d'une part la dégradation Connecté à la structure, fonction des conditions d'exploitation préalablement spécifiées, d'autre part des imperfections affectant la prévision des conditions opérationnelles, l'état du système et les modèles de dégradation, parmi ces modèles : les processus stochastiques ou processus aléatoires, qui décrivent l'évolution d'une grandeur aléatoire et peut prendre une série d'état successif en fonction du temps(ou de l'espace).

Ce chapitre commence par une représentation des différentes méthodes et techniques d'analyse de la sûreté de fonctionnement, ainsi que les différents modèles de dégradation à espaces d'états, et de temps continus ou discrets, avec ou sans mémoire, Parmi ces modèles on trouve en particulier : la chaîne de Markov, le processus Gamma, le processus de Wiener, le processus de poisson, processus de Lévy...

## II.2. Méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système réparable

Un système réparable est un système qui se dégrade et se répare pour revenir dans des états plus favorables. Pour analyser le fonctionnement de ce système, il existe plusieurs méthodes telles que :

### II.2.1. Méthodes d'analyse fonctionnelle

Avant de réaliser des études sur un système, il est nécessaire de connaître son utilité et son fonctionnement. Pour cela, l'analyse fonctionnelle permet de décrire synthétiquement les modes de fonctionnement d'un système et de connaître les fonctions à garantir. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette analyse : APTER, SADT, FAST, arbre fonctionnel, etc. Elles sont toutes fondées sur l'expression du besoin du système et sa spécification technique. Il est donc possible d'identifier [15]:

- les fonctions et leurs caractéristiques.
- les performances avec des critères de valeurs attendues.
- les contraintes extérieures.

L'analyse fonctionnelle considère le système du point de vue de sa finalité en prenant en compte tous les paramètres concernant le système et son environnement. Pour ce faire, il faut dématérialiser le produit et mettre en évidence les composants fonctionnels avec la méthode suivante :

- répondre aux spécifications du cahier des charges.
- définir les fonctions principales et contraintes.
- établir des blocs diagrammes fonctionnels.

### **II.2.2. Méthodes d'analyse dysfonctionnelle**

L'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système consiste à analyser les défaillances des composants pour estimer leurs conséquences sur le service rendu par le système. Les principales méthodes utilisées lors d'une analyse de la sûreté de fonctionnement sont :

#### **II.2.2.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)**

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode généralement utilisée pour l'identification d'une part des risques d'un système complexe et d'autre part pour l'évaluation de la gravité des conséquences liées aux risques [13,16,17]. Il est recommandé de commencer l'APR dès les premières phases de la conception en utilisant toutes les données alors disponibles et de continuer à compléter cette analyse jusqu'à la fin de vie du système [13]. L'APR a pour objectifs :

- L'identification des dangers et de leurs causes (entités dangereuses, situations dangereuses, accidents potentiels,...).
- L'évaluation et l'acceptation des risques permettant une hiérarchisation.
- La proposition de mesures propres à réduire et à contenir les risques à des niveaux acceptables [2].

#### **II.2.2.2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC)**

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticités (AMDEC) est une méthode de détermination des défaillances applicables à tous types de systèmes [15]. C'est surtout un outil d'aide à la conception qui permet de prendre en compte les défaillances réelles et potentielles et de les corriger le plus rapidement possible. Cette méthode est applicable tout le long du cycle de vie du système pour le maîtriser et l'améliorer. Au cours du

cycle de vie du système, l'AMDEC permet d'agir sur les causes de défaillance les plus critiques afin de se rapprocher des zéro défaillances.

L'élaboration de l'AMDEC, est réalisée en quatre étapes qui sont présentées ci-dessous :

- Décomposition du système en composants.
- Recensement des modes de défaillance des composants.
- Effets et conséquences des modes de défaillance des composants.
- Risques découlant des défaillances des composants.

Dans un premier temps, il est important de décomposer le système en éléments plus petits. Cette décomposition doit être assez pour savoir identifier tous les modes de défaillance attachés à chaque élément. Cette première étape aboutit donc à une liste de composants à laquelle on associe différents modes de défaillance possible. Dans un deuxième temps, il est nécessaire de décrire ce qui va se passer dans le système quand le mode de défaillance étudiée est apparu. On doit indiquer, dans cette partie, les effets vue de l'extérieur du système ainsi que les effets sur l'accomplissement des fonctions du cahier des charges [2].

Les objectifs d'une AMDEC sont :

- L'amélioration des systèmes (objectif fiabilité),
- Le diagnostic des défaillances (objectif maintenance),
- La maîtrise du fonctionnement (objectif performance attendue) [6].

### **II.2.2.3. Arbre de Défaillance (AdD)**

Les arbres de défaillances permettent de réaliser une description graphique de l'agencement des évènements conduisant à une défaillance [15]. L'évènement sommet pour lequel on cherche à évaluer la probabilité est plus communément appelé l'Evènement Redoute (ER). La construction d'un arbre de défaillance est faite de façon déductive. Elle débute en partant de l'évènement sommet et descend jusqu'aux évènements élémentaires par arborescence (Figure II.1) [6].

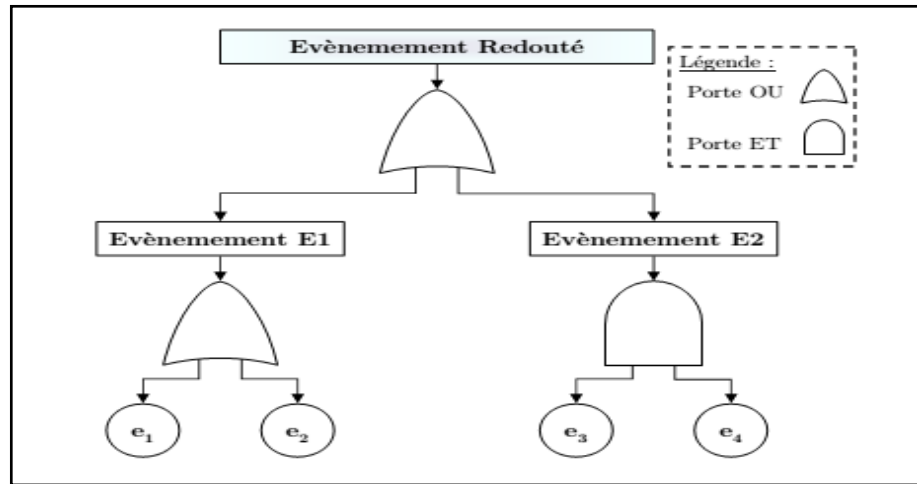


Fig. II.1. L'arbre de défaillance

Dans l'exemple de la Figure (II.1), pour que l'évènement redouté se réalise, il faut que l'un des évènements E1 ou E2 se réalise. Pour que l'évènement E1 se réalise, il faut que l'un des évènements de base e1 ou e2 se réalise et pour que l'évènement E2 se réalise, il faut que les deux évènements de base e3 et e4 se réalisent en même temps. Ainsi, l'évènement redouté peut s'écrire :

$$ER = E1 \text{ ou } E2 = (e1 \text{ ou } e2) \text{ ou } (e3 \text{ et } e4) \quad (\text{II.1})$$

Et l'utilisation des lois de l'algèbre booléenne permet de mettre l'expression booléenne de l'évènement redouté sous la forme:

$$ER = E1 + E2 = (e1 + e2) + (e3 \cdot e4) \quad (\text{II.2})$$

#### II.2.2.4. Diagramme de Fiabilité (DF)

La Méthode du Diagramme de Fiabilité (DF) est utilisée pour analyser et calculer la fiabilité [18,19,20,21]. Elle est aussi dénommée Méthode du Diagramme de Succès. L'analyse par DF a pour but de représenter l'architecture du système. Pour cette modélisation, des blocs représentent généralement des composants, des sous-systèmes ou des fonctions. La modélisation consiste à rechercher les liens entre ces blocs, elle permet de visualiser la mission réalisée par le système [22]. Un bloc est considéré comme un interrupteur fermé lorsque l'entité est en état de fonctionnement ou un interrupteur ouvert lorsque l'entité est en état de panne. Le système est déclaré en état de fonctionnement si le "signal" qui entre dans le diagramme est récupéré à la sortie, sinon le système est en panne.

D'une part, le DF permet une analyse qualitative en déterminant les chemins qui conduisent à la réussite de la mission du système et la recherche des composants apparaissant dans le plus grand nombre de ces chemins et les scénarios qui conduisent à l'échec de la mission, pour éviter les incidents. D'autre part, le DF permet une analyse quantitative qui a pour objectif en particulier de définir la probabilité de bon fonctionnement du système. Les

calculs reposent sur les probabilités de réussite des missions des constituants du système. La méthode a ses limites d'application : il faut s'assurer de l'indépendance entre les blocs et ne permet pas de modéliser des systèmes dynamiques [2].

#### **II.2.2.5. Méthode de l'Espace des Etats (MEE)**

La Méthode de l'Espace des Etats (MEE) permet l'analyse de fiabilité des systèmes réparables [13,18,23,24,20,21]. Supposons un système constitué par des composants, chaque composant ayant un nombre fini d'état de fonctionnement et de panne ; on construira un graphe dont les sommets correspondront aux différents états du système et les arcs correspondront aux transitions (panne et réparation) entre états. Pour un système à  $n$  composants, si chaque composant a deux états (fonctionnement et panne), le nombre maximum d'état est  $2^n$ , le calcul de la fiabilité est réalisé à partir de différents états du système.

Le principal avantage de cette méthode est de permettre la modélisation de systèmes réparables. La méthode est souvent difficile à appliquer pour des systèmes de grande taille caractérisés par une explosion des états [2].

#### **II.2.2.6. Réseaux Bayésiens**

Le problème de la modélisation et de l'analyse de la fiabilité dynamique se pose dès lors que l'état de fonctionnement du système et l'état des variables fonctionnelles du système s'influencent mutuellement [25]. Les Réseaux Bayésiens Dynamiques (DBN) constituent un outil mathématique intéressant pour modéliser ce problème en permettant une représentation graphique des processus stochastiques. Ces DBN sont utilisés pour représenter l'interaction complexe entre l'état du système et l'état des variables processus, d'une part, et le processus et la perturbation externe, d'autre part. Si l'intérêt de l'approche est évident, son application à des problèmes physiques réels reste difficile [26], car elle ne permet pas de décrire simplement les états de fonctionnement et de dysfonctionnement du système. Ainsi, nous allons nous orienter vers les réseaux de Pétri qui est une méthode plus simple et la plus pratique pour estimer la fiabilité et la durabilité d'un système complexe [6].

### **II.2.3. Méthodes de simulation**

#### **II.2.3.1. Méthodes des réseaux de Pétri (RdPS)**

Les réseaux de Pétri ont été inventés en 1962 par Carl Adam Pétri. Ils sont basés sur la théorie des automates. Ces réseaux permettent de représenter le comportement des systèmes dans les conditions de fonctionnement normal ainsi que leur comportement en cas de

défaillance de leurs composants [27,28,29,30,31,32,33]. Le principal avantage des réseaux de Pétri est la possibilité d'analyser le comportement dynamique d'un système en présence de défaillances. Cette modélisation dynamique permet d'obtenir des mesures en termes de fiabilité. Un réseau de Pétri permet de modéliser d'une part le fonctionnement d'un système et d'autre part les occurrences de défaillances [6]

### **II.2.3.2. Simulation de Monte-Carlo (SMC)**

La méthode est basée sur la simulation informatique de variable aléatoires. L'approche consiste à créer un grand nombre de scénarios en répétant l'attribution d'une valeur numérique à la (aux) variable(s) dépendant du déroulement des processus stochastiques puis à effectuer un traitement statistique des résultats successifs obtenus (calcul de la moyenne, et de la dispersion,...). sur la distribution de probabilités des résultats [34].

La simulation de MC est un outil numérique basé sur le tirage au sort de nombres aléatoires. La quantité que l'on désire estimer correspond à l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, évoluant selon un processus stochastique. L'estimation est obtenue en moyennant les résultats collectés lors d'un grand nombre d'histoires simulées du système. Afin de voir apparaître un événement redouté (rare en général) un nombre suffisant de fois, on doit faire un grand nombre de simulations, ce qui implique des temps de calcul important [35,36,37].

De nombreuses techniques d'accélération de la simulation permettent de réduire ces temps. Elles sont basées soit sur une diminution de la complexité du modèle, soit sur la réduction du nombre de scénarios à simuler, en favorisant l'apparition des événements rares. Toutefois, ces méthodes ne sont pas toujours faciles à mettre en œuvre, car elles impliquent des hypothèses assez fortes et/ou ne fournissent pas forcément des estimateurs de qualité [36].

### **II.3. Pourquoi la Modélisation**

Une défaillance intervient quand le système n'est plus en mesure de délivrer la fonction requise. Par conséquent, une panne est toujours la résultante d'une défaillance. La maintenance vise à prévenir les défaillances du système et à intervenir sur celui-ci quand une panne survient pour rétablir ses fonctionnalités [38]. Le premier objectif de la maintenance est donc de maintenir, d'évaluer et d'améliorer la fiabilité du système à partir de la fiabilité de ses composants de base. Chaque système peut être décomposé en sous-systèmes, équipements et composants de base [39]. Dans ce cadre, la capacité à modéliser la défaillance

et plus généralement la dégradation du système apparaît comme un élément primordial dans l'élaboration et l'optimisation de la politique de maintenance.

#### **II.4. Modélisation par les processus stochastique**

Pour tout système de production, on est appelé à appliquer des modèles mathématiques adéquats pour assurer une bonne prévision des risques, ainsi pour avoir un bon rendement du système. Cette modélisation appelée modélisation stochastique, qui utilise les processus stochastiques en fiabilité pour modéliser l'évolution d'un système au cours du temps. La modélisation stochastique des systèmes techniques concerne souvent des systèmes réparables cette approche est à la base des méthodes de surveillance, de diagnostic et de maintenance [40].

##### **II.4.1. Différents modèles de dégradation**

les modèles de dégradation ne se limitent pas à un fonctionnement binaire mais intègrent des états supplémentaires entre l'état de marche et l'état de panne. Pour modéliser l'évolution de la dégradation d'une entité, il est nécessaire de déterminer des lois de passage entre les différents états. Cette modélisation devra tenir compte de la nature de l'indicateur de dégradation que l'on décide de suivre. Pour ce faire, on distingue généralement deux grandes classes de dégradation : les modèles à dégradation discrète et les modèles à dégradation continue [41,38].

###### **II.4.1.1. Modèles à dégradation discrète**

Les modèles à dégradation discrète font référence à des dégradations de type chocs (Figure II.2). Chaque choc, à occurrence aléatoire, va incrémenter la dégradation de l'entité modélisée. Cet incrément de dégradation peut être déterministe ou aléatoire. Un choc entraîne un saut d'un état de dégradation à un autre. Entre deux chocs consécutifs, on considère que l'état du système reste stable (Figure II.2). Les incréments de dégradation s'additionnent jusqu'à la défaillance totale de l'entité. Parmi les modèles à dégradation discrète les plus répandus il y a le processus de poisson et les processus markoviens ou semi-markoviens. Ces modèles peuvent être utilisés pour définir une politique de maintenance optimale selon un critère donné. Par exemple, Feldman [42] modélise l'instant du saut (choc) par un processus semi markovien, en vue de définir une politique de remplacement optimale, minimisant un certain coût.

Dans Castanier [43], les processus markoviens sont utilisés pour modéliser le processus d'évolution d'un système à dégradation graduelle. La transition d'un état  $i$  à un autre état  $j$  du

système est gérée par une matrice de transition. Le taux de transition est constant dans le cas markovien. Il est fonction du temps dans le cas non markovien. L'estimation de cette matrice de transition est d'autant plus délicate qu'elle nécessite généralement un grand nombre de données de retours d'expérience. [44]. En pratique, la caractérisation des transitions entre les différents états peut s'avérer délicate. De plus, un grand nombre de données est nécessaire pour garantir la pertinence de l'estimation.

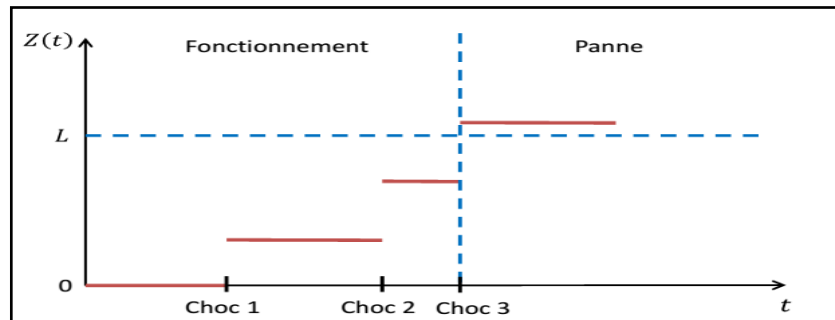


Fig. II.2. Représentation d'un modèle à dégradation discrète [38]

#### A) Processus de poisson

Le processus de Poisson est un processus fréquemment utilisé pour modéliser les instants auxquels se produisent des phénomènes aléatoires, comme l'arrivée d'appels téléphoniques ou encore les instants de pannes d'un équipement. Ce modèle doit décrire le nombre d'occurrence d'un événement aléatoire répétitif, pendant un intervalle de temps donné. Il s'agit alors d'un processus de comptage. Soit  $(N_t ; t > 0)$  est un processus de comptage.  $N_t$  représente le nombre d'événements qui se sont produits dans l'intervalle de temps  $[0; t]$ [44].

#### B) Processus Semi-markovien

L'étude des chaînes semi-markoviennes permet d'étudier des processus dont le temps de séjour dans un état peut suivre une loi discrète quelconque (pas forcément exponentielle), tout en gardant une évolution markovienne entre les états successifs. La structure d'un processus semi-markovien est identique à celle d'un processus de Markov de sauts, tel que les transitions sont réalisées suivant une chaîne de Markov, La seule différence entre ces deux processus vient du fait que la durée entre deux sauts pour un processus de Markov de sauts suit une loi exponentielle alors que pour un processus semi-markovien elle peut suivre n'importe quelle distribution. Soit  $\mathcal{E} = \{1; \dots; s\}$  l'ensemble des états du système à modéliser. On note  $S_n$  une suite croissante de variables positives :  $0 = S_0 \leq S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_n \leq \dots$  : Tel que  $\tau_n = S_{n+1} - S_n$  et  $J_n$  est un processus à valeurs dans  $\mathcal{E}$ . Soit  $X_t$  l'état du processus à l'instant  $t$  où  $X_t = J_n$ , pour  $S_n \leq t \leq S_{n+1}$  [44].

### C) Processus de Markov

Les chaînes de Markov sont des processus stochastiques très utilisées dans la modélisation des systèmes de nature discrète, et plus précisément pour modéliser l'évolution temporelle des systèmes dynamiques [45,40]. On considère le système comme un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini « d'états » de fonctionnement ou de panne (il est possible d'admettre des états dits « dégradés »). Généralement pour la méthode d'espace des états, le système est modélisé sous forme d'états : l'état  $i$  dans lequel se trouve le système à un instant  $t$  ne dépend que des états  $(i-1)$  ou  $(i+1)$ . Le passage d'un état à un autre se réalise suivant une loi exponentielle, les taux de défaillance  $\lambda$  et de réparation  $\mu$  sont souvent supposés constants. Les différents états de fonctionnement et de panne peuvent être représentés par un graphe où l'on fait apparaître, la possibilité de passage d'un état à l'autre (Figure II.3). C'est ce que l'on appelle un graphe de transition. Les probabilités de passage d'un état à l'autre caractérisent la disponibilité du système.

La probabilité de fonctionnement d'un système se stabilise vers une valeur constante au cours du temps si le système possède un régime permanent. C'est l'asymptote de la fonction de disponibilité  $A(t)$ . L'application industrielle de Deniau et al [46], qui est un exemple particulier, conduit à développer un modèle qui repose sur le concept de réparation minimale enrichi par l'introduction de l'actualisation des données. L'optimisation est basée sur le concept de maximisation du revenu global d'exploitation. On dispose donc d'un ensemble d'états de composants qui, combinés, permettent de définir l'ensemble des états du système. Cet ensemble est divisé en deux sous ensembles (Figure II.3) :

- état de fonctionnement,
- état de panne.

Ces états doivent être définis préalablement. Dans le cas de  $n$  composants « binaires », on obtient un nombre maximal de  $2^n$  états. Ensuite, il faut recenser toutes les « transitions » possibles entre les différents états du système en identifiant leurs causes.

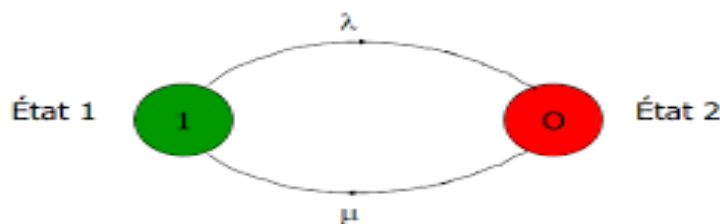


Fig. II.3. Modèle Markovien [47].

- **Définition :**

Une chaîne de Markov est une suite de variables aléatoires  $(X_n, n \in \mathbb{N})$ ,  $X_n$  représente l'état du système à l'instant  $n$ . La propriété fondamentale d'une chaîne de Markov dite propriété de Markov, est que son évolution future ne dépend du passé qu'au travers de sa valeur actuelle. Autrement dit, conditionnellement à  $X_n$ ,  $(X_0, \dots, X_n)$  et  $(X_{n+k}, k \in \mathbb{N})$  sont indépendants [48]. Nous pouvons alors définir la loi de "probabilité de transition" d'un état  $i$  vers un autre état  $j$  par :

$$P_{ij} = P(X_n = j / X_{n-1} = i) \quad (\text{II.3})$$

D'autre part, c'est un modèle dynamique pour lequel le futur dépend de l'état présent et du hasard est appelé une chaîne de Markov : c'est un modèle simple pour représenter un phénomène aléatoire évoluant au cours du temps .

Les applications des chaînes de Markov sont très nombreuses : réseaux, sciences de la vie (génétique des populations, modèles d'épidémie), mathématiques, finance (les cours de la bourse), gestion de stock, algorithmes stochastiques d'optimisation, simulation, théorie du signal (problèmes de filtrage, de prédiction), traitement d'image, traitement de la parole, informatique (files d'attente dans les réseaux)... [48,38,49].

Dans la modélisation de dégradation, on trouve deux façons différentes d'utiliser les chaînes de Markov. La première est de supposer que les états du système à modéliser sont discrets et finis. Par exemple, pour certaines applications on considère qu'un système fonctionne sous deux ou plusieurs niveaux de dégradation, impliquant différents taux de rendement répartis d'une façon discrète entre plusieurs états. Ces états modélisent tous les niveaux possibles de fonctionnement allant du fonctionnement parfait du système jusqu'à l'échec total. Ce type de modèles est souvent utilisé pour la modélisation de la maintenance préventive [50,51,52,53,54,55]. La deuxième façon d'introduire les chaînes de Markov dans la modélisation des phénomènes aléatoires, particulièrement la dégradation, est de supposer que l'environnement ou fonctionne le système présente une structure markovienne [56,57], supposent que le taux de dégradation d'un système dépend totalement de l'environnement. Il considère aussi que, à son tour, cet environnement peut être caractérisé par une chaîne de Markov à temps continu.

#### **II.4.1.2. Modèles à dégradation continue :**

Les modèles à dégradation continue sont, quant à eux, pertinents pour modéliser des phénomènes tels que la fatigue, l'érosion graduelle d'un matériau ou encore l'usure

progressive d'une pièce mécanique, etc. Pour ces modèles, il est nécessaire de connaître la loi des incréments de dégradation entre deux instants consécutifs afin de prédire le niveau de dégradation à tout instant (Figure II.4).

On considère généralement que le processus de dégradation est markovien. Cela implique que les incréments de détérioration ne dépendent ni de l'âge, ni de l'état de santé de l'entité mais uniquement de la durée d'observation. Cette hypothèse se justifie naturellement si la seule information disponible sur l'état de l'entité est l'accroissement de sa dégradation entre deux observations. Les propriétés d'indépendance et de stationnarité des incréments conduisent à retenir la classe des processus de Lévy [58]. Pour la modélisation de la dégradation d'une entité.

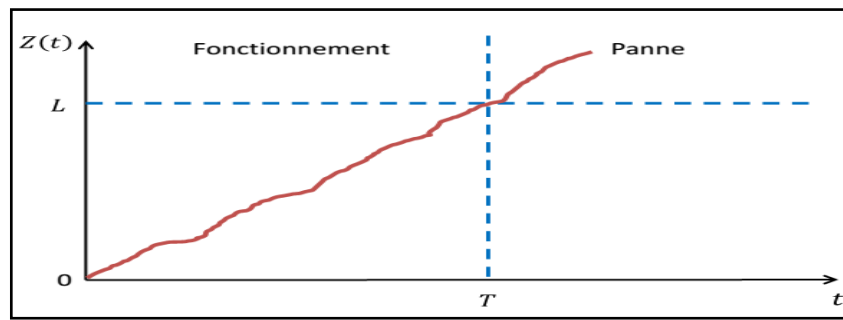


Fig. II.4. Représentation d'un modèle à dégradation continue.

#### A) Processus de Lévy

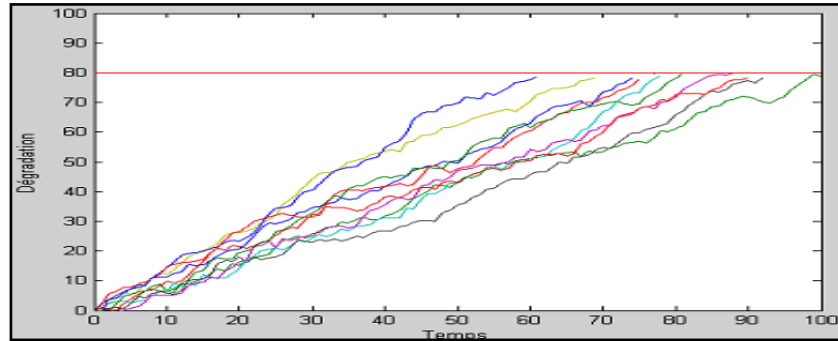
Les modèles à dégradation continue conviennent pour représenter des phénomènes observables sur de nombreux systèmes industriels. Ce constat conduit naturellement à nous focaliser sur cette classe de dégradation et plus particulièrement sur les processus de Lévy.

En théorie, un processus de Lévy ne peut pas être utilisé pour modéliser une dégradation à la fois continue et croissante. La solution consiste alors à se placer dans le cas limite d'un processus de sauts présentant un nombre infini de sauts sur un intervalle de temps fini. Cette solution implique que la loi de probabilité des incréments soit à support positif et infiniment divisible. Cela nous amène à introduire un processus qui vérifie ces conditions, c'est le processus Gamma.

#### B) Processus de Gamma

Le processus Gamma est un processus de Lévy dont les incréments de dégradation suivent une loi Gamma [59]. Cette caractéristique donne aux processus Gamma une grande flexibilité pour modéliser des comportements de dégradation très différents. Notons que la loi Gamma est à support positif. Par conséquent, le processus Gamma définit un processus à accroissements positifs, adapté à la modélisation de dégradation continue et monotone.

Nous modélisons ainsi le fait que l'état de santé de l'entité ne peut pas s'améliorer sans intervention extérieure. Ce processus a été largement utilisé dans la littérature pour modéliser des phénomènes aussi variés que l'usure par abrasion, la fatigue, la corrosion, la croissance des fissures [60,61,62].



**Fig. II.5. Trajectoires simulées par le processus Gamma**

Un processus Gamma stationnaire  $Ga(\alpha, \beta) : Y(t), t > 0$ , de paramètre de forme  $\beta$  et de paramètre d'échelle  $\alpha$  est défini mathématiquement de la façon suivante (Figure II.5):

- $Y(0) = 0$  ;
- Les incréments de  $X(t)$  sont indépendants et positifs ;
- Quelque soit  $t > 0$  et  $h > 0$ , la loi d'accroissement  $Y(t + \Delta t) - Y(t)$  suit une loi Gamma  $Ga(\alpha h, \beta)$  de densité [63] :

$$f(y) = \frac{\beta^{-\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} y^{\alpha h - 1} e^{-\beta y} \quad (II.4)$$

Avec ;  $\Gamma(\alpha h)$  : la fonction gamma.

Notons que la méthode la plus courante pour l'évaluation des paramètres du processus Gamma est la méthode du maximum de vraisemblance [64]. On définit ensuite l'espérance  $E$  et la variance  $Var$  des incréments telles que:

$$E = \frac{\alpha}{\beta} \quad (II.5)$$

$$V = \frac{\alpha}{\beta^2} \quad (II.6)$$

Pour les entités dont la dégradation est définie par un processus Gamma de paramètre  $\beta$  et  $\alpha$ , la défaillance apparaît suite à un excès de dégradation. Autrement dit quand l'indicateur de dégradation  $Z(t) > L$ . Dans ce cadre, la fonction de répartition est donnée par:

$$F(t) = P(T \leq t) = \frac{\Gamma(\alpha t, L\beta)}{\Gamma(\alpha t)} \quad (II.7)$$

La fiabilité, quant à elle, s'exprime par:

$$R(t) = P(T > t) = P(Z(t) < L) = 1 - \frac{\Gamma(\alpha t, L\beta)}{\Gamma(\alpha t)} \quad (\text{II.8})$$

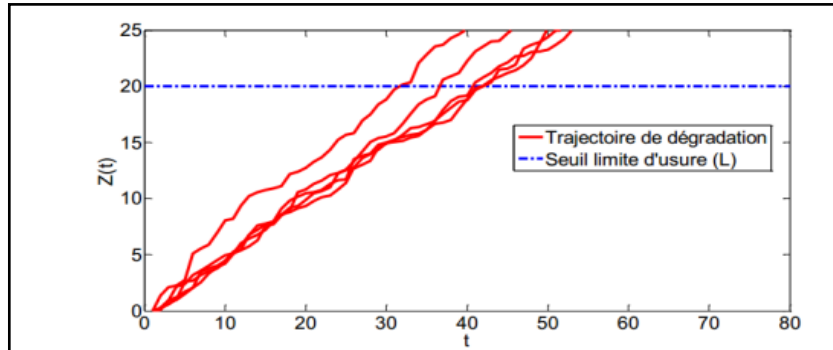


Fig. II.6. Trajectoires simulées par le processus Gamma ( $\alpha=2, \beta=4$ )

### C) Processus de Wiener (mouvement brownien)

Le processus de Wiener est un processus de Lévy à trajectoire continue dont les incréments suivent des lois normales. Il permet de modéliser une dégradation continue et croissante en moyenne mais non monotone. Cela signifie que l'incrément de dégradation a une probabilité non nulle d'être négatif. Cette propriété tolérée dans certaines conditions [65,66], ne permet pas de modéliser des dégradations monotones comme la propagation d'une fissure ou les phénomènes d'usure par abrasion. Il est donc nécessaire de se tourner vers des processus qui privilégient la monotonie.

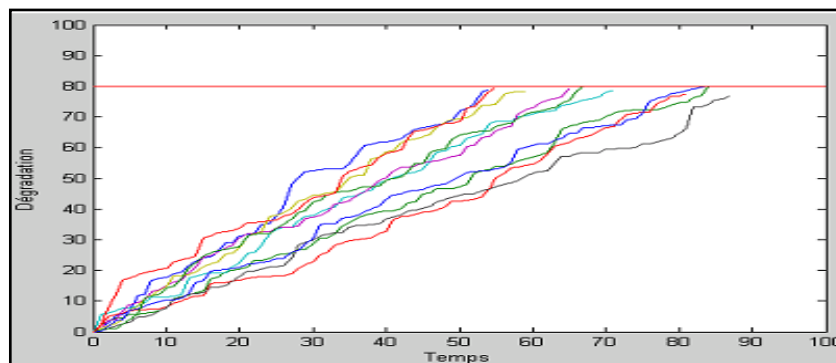


Fig. II.7. Trajectoires simulées par le processus Wiener

Parmi les modèles sans mémoire, Louis Bachelier a proposé en 1900 un modèle pour le mouvement des prix des actions à temps continu dans lequel il était probablement le premier à impliquer l'objet mathématique qui est aujourd'hui connu sous le nom de processus de Wiener ou de mouvement brownien. Cet objet, le mouvement brownien, porte le nom de Robert Brown, un botaniste écossais qui a découvert en 1827 un mouvement erratique des particules micrométriques dans le fluide interne des grains de pollen. Quelques années plus tard,

Einstein Wiener et d'autres chercheurs font des études poussées sur ce sujet. Einstein établit ainsi l'équation de diffusion des particules micrométriques. En 1923, Norbert Wiener réalise une modélisation efficace du mouvement brownien ainsi qu'une étude mathématique sur la continuité et la non-dérivabilité de ses trajectoires. Aujourd'hui, le mouvement brownien (ou le processus de Wiener) est largement utilisé comme un objet mathématique pour la modélisation de différents phénomènes aléatoires continus et fortement fluctuants [67].

• **Le processus de Wiener standard:**

Le processus de Wiener à une tendance croissante [68], décrit des trajectoires de dégradation croissante en moyenne. Par contre, la probabilité de voir la dégradation décroître sur un intervalle est non nulle. Nous nous limiterons au processus de Wiener avec tendance linéaire.  $Y(t)$ ,  $t > 0$  est un processus de Wiener à tendance linéaire  $m$  et de variance  $\sigma^2$  si :

- $Y(0) = 0$  presque sûrement
- $Y$  est un processus à accroissements indépendants
- Quelque soit  $t > 0$  et  $h > 0$ , la loi de l'accroissement  $Y(t+h) - Y(t)$  est une loi normale  $N(mh, \sigma^2 h)$  de densité [63] :

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi h}} \exp\left[-\frac{(y-mh)^2}{2h\sigma^2}\right] \quad (\text{II.9})$$

Pour tout  $t > 0$ ,  $E(Y(t)) = mt$ ,  $\text{Var}(Y(t)) = \sigma^2 t$  et  $\text{CV}(Y(t)) = \sigma / m\sqrt{t}$ , avec  $E$  ; l'espérance,  $\text{Var}$  ; la variance et  $\text{CV}$  ; le coefficient de variation.

Dans le processus Wiener, l'évolution de la dégradation au cours du temps en fonction de la loi normale, est représentée par le modèle suivant, avec dans ce cas  $N(0,1)$  une loi normale de moyenne  $m=0$  et d'écart-type  $\sigma=1$

$$W(t + \Delta t) - W(t) = \beta \times N(0, 1) + \alpha \times h \quad (\text{II.10})$$

Le processus de Wiener standard, noté souvent dans la littérature par  $W(t)$ , est l'un des processus de Lévy les mieux connus. Il constitue un bloc fondamental de construction pour toute une collection de processus plus généraux. Des modèles stochastiques dont le processus de Wiener est le processus de base sont présentés. Le processus de Wiener généralisé ou le mouvement Brownien avec dérive est définie comme suit :

$$B(t) = \mu_d t + \sigma_d W(t) \quad (\text{II.11})$$

Avec :  $\mu_d$ ,  $\sigma_d$  sont respectivement les deux paramètres de dérive et de volatilité du modèle.

Les processus de Wiener font l'objet de larges applications dans l'analyse des données de dégradation ainsi que des données financières. Par exemple, Park and Padgett [69] ont utilisé ce processus pour définir un modèle de base qui décrit l'évolution de dommages cumulatifs

des matériaux. Yu Wang [70] utilise le modèle pour étudier l'usure de la tête magnétique des disques durs. Doksum [71] a supposé que la dégradation dans la matière d'isolation des câbles électriques suit un processus de Wiener. En outre, les auteurs considèrent que cette dégradation est accélérée lorsque la tension est plus élevée. Le facteur de stress, autrement appelé covariable environnementale, est alors introduit. Dans de nombreuses applications, les facteurs de stress environnementaux comme la température, l'humidité, les vibrations, le taux d'utilisation..., peuvent influencer au processus étudié. La plupart des approches existantes permettent à certains paramètres des processus stochastiques de varier en fonctions du temps ou des covariables. Pour choisir un moyen approprié pour incorporer les covariables environnementales dans le modèle mathématique, une bonne compréhension de la façon dont les facteurs d'accélération affectent les paramètres du modèle est indispensable.

- **Mouvement brownien géométrique :**

Le processus de Wiener standard et ses dérivés sont largement utilisés pour modéliser des phénomènes non-monotones. Le processus de Wiener se base sur l'hypothèse forte concernant la distribution normale des incréments. Cette hypothèse offre au modèle des propriétés intéressantes qui facilitent l'emploi, la calibration et les différents calculs mathématiques sur les différents caractéristiques et fonctions d'utilité du modèle. Pourtant cette hypothèse présente aussi le point faible suivant : la distribution normale des accroissements aboutit à une probabilité non-nulle d'avoir une valeur négative de l'accumulation des incréments. En pratique, on se trouve souvent dans un cas où le processus étudié devrait être toujours positif. C'est par exemple le cas dans la modélisation des phénomènes de dégradations où l'état neuf système correspond à une dégradation nulle, ainsi que pour la modélisation de certaines mesures naturellement non-négatives (vitesse de vent, intensité de lumière, mesures de puissance ou de production...) et la modélisation des indices financières (prix des actifs, valeurs de stock, indices boursiers...). En plus des valeurs négatives non-tolérées, d'autres caractéristiques détectables sur l'évolution du phénomène aléatoire ainsi que la propriété de ses incréments peuvent aussi imposer certaines modifications du mouvement brownien.

Pour la modélisation des phénomènes à valeurs non-négative une modification du modèle de Wiener en utilisant la transformée logarithmique est suggérée. La solution de ce modèle, se représentant sous une forme exponentielle du mouvement Brownien. Elle est connue sous le nom du mouvement Brownien géométrique. Le mouvement brownien géométrique a été proposé pour modéliser les prix des actifs par Samuelson [72]. Plus tard, il a été utilisé par

Merton [73] et Black and Scholes [74], comme un modèle de prix des actions pour la valorisation des options. Ce modèle devient ensuite connu en finance sous le nom du modèle de Black-Scholes et il peut être défini comme étant la solution de l'équation différentielle, stochastique suivante:

$$dY(t) = \mu_d Y(t)dt + \sigma_d Y(t)dW(t) \quad (\text{II.12})$$

Où :  $\mu_d$  ,  $\sigma_d$  représentent respectivement les paramètres de dérive et de volatilité du processus de diffusion.

Dans ce modèle le changement de la valeur de Y (t) est proportionnel à sa valeur actuelle. En appliquant le théorème de dérivation des fonctions composées (chaine rule) correspondante au processus d'Ito, l'équation différentielle stochastique pour la fonction  $f(Y(t)) = \ln Y(t)$  peut être déduite de l'équation (II.12) comme suit :

$$d \ln Y(t) = \left( \mu_d - \frac{\sigma_d^2}{2} \right) dt - \sigma_d W(t) \quad (\text{II.13})$$

Prenons  $\mu_d - \frac{\sigma_d^2}{2}$  La solution explicite de cette SDE s'écrit comme une fonction exponentielle d'un processus de Wiener avec dérive comme suit :

$$Y(t) = Y(0) \exp \left[ \left( \mu_d - \frac{\sigma_d^2}{2} \right) t - \sigma_d W(t) \right] \quad (\text{II.14})$$

D'après cette équation le processus Y (t) ne peut plus atteindre de valeurs négatives. Les accroissements calculés sur la transformée logarithmique du processus Y (t) correspondent au changement relatif de sa valeur :

$$d \ln Y(t) = \ln Y(t + dt) - \ln Y(t) = \ln \frac{Y(t+dt)}{Y(t)} \quad (\text{II.15})$$

La distribution de transition de ce processus de l'état Y (s) = x à l'état Y (t) = y est définie comme suit [75] :

$$f(s, x; t, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(t-s)\sigma_d^2}} \exp \left[ - \frac{(\ln(y) - \ln(x) - (\mu_d - \frac{\sigma_d^2}{2})(t-s))^2}{2\sigma_d^2(t-s)} \right] \quad (\text{II.16})$$

## II.5. La modélisation et la l'analyse statistique

La modélisation stochastique a pour but essentiel de préciser des lois de probabilité rendant compte des variations aléatoires de certains phénomènes, variations dues à des causes soit inconnues, soit impossible à mesurer.

Au sein de la modélisation stochastique, la modélisation probabiliste surtout pour but de donner un cadre formel permettant, d'une part de décrire les variations aléatoires, d'autres part d'étudier les propriétés générales des phénomènes qui les régissent. Plus appliquée, la

modélisation statistique consiste essentiellement à définir des outils appropriés pour modéliser des données observées, en tenant compte de leur nature aléatoire.

Le calcul des probabilités est donc un des outils essentiels de la statistique pour pouvoir extrapoler à la population les résultats constatés sur l'échantillon mais on ne peut y réduire la statistique : à côté du calcul des probabilités.

La statistique utilise l'informatique car les calculs à mettre en œuvre nécessitent l'emploi d'ordinateurs : l'informatique a révolutionné la pratique de la statistique en permettant la prise en compte de données multidimensionnelles ainsi que l'exploration rapide par simulation de nombreuses hypothèses [34].

## II.6. Les tests statistiques

La théorie des tests consiste à formuler des hypothèses particulières sur les paramètres ou sur les lois qui interviennent dans les problèmes étudiés, puis à apporter un jugement sur ces hypothèses. Ce jugement est basé d'une part, sur l'acceptation d'un certain risque dans la prise de décision, et d'autre part sur les résultats obtenus sur un ou plusieurs échantillons extraits de la population concernée.

Les tests peuvent être classés en différentes catégories :

- Tests sur une hypothèse relative à la valeur particulière d'un ou plusieurs paramètre(s) ou tests paramétriques.
- Tests de conformité de deux distributions ou tests d'ajustement entre une distribution théorique et une distribution expérimentale.
- Teste de comparaison de deux populations (comparaison des moyennes des variances...).
- Test d'indépendance de deux caractères quantitatifs ou qualitatifs.

Un test d'hypothèse ou test statistique est une démarche conduisant à élaborer une règle de décision permettant de faire un choix entre deux hypothèses statistiques, les hypothèses envisagées à priori s'appellent :

- «  $H_0$  » l'hypothèse nulle selon laquelle on fixe à priori la valeur d'un paramètre.
- «  $H_1$  » l'hypothèse alternative, on peut choisir pour cette hypothèse n'importe quelle hypothèse compatible avec le problème étudié, mais différente de  $H_0$

Avec toute démarche statistique, il faut définir à quelle condition l'une ou l'autre des hypothèses sera considérée comme vraisemblable.

Les deux hypothèses ne jouent pas le même rôle. En effet, c'est l'hypothèse nulle  $H_0$  qui est soumise au test et toute démarche statistique consiste à la considérer comme vraie. Si le test conduit à la rejeter, c'est l'hypothèse alternative  $H_1$  qui sera considérée comme vraie.

### **II.6.1. Principe d'un test d'hypothèses**

La nature d'une expérience stochastique d'où les résultats d'essais effectués dans le passé nous permettent souvent d'émettre une hypothèse relative à l'expérience considérée. Cette hypothèse peut avoir trait, soit à un paramètre inconnu soit à la forme d'une loi de probabilité ou à la liaison stochastique entre deux variables aléatoires.

De telles hypothèses statistiques sont alors acceptées ou rejetées en vu des résultats numériques obtenus lors de la réalisation de  $n$  expériences indépendantes. Un test est donc un procédé permettant de décider si une hypothèse donnée, notée généralement  $H_0$ , peut être considérée comme vraie ou fausse, notons cependant qu'aucune décision statistique ne peut être prise avec une certitude absolue, quelle qu'en soit la conclusion, le risque de se tromper existe toujours.

### **II.7. Conclusion**

Ce chapitre, présente un rappel sur les méthodes existantes pour étudier la sureté de fonctionnement des systèmes complexes, à savoir, l'analyse qualitative et l'analyse quantitative. nous avons souhaité montrer plusieurs approches pour la modélisation des dysfonctionnements d'un système réparable. L'approche choisie nous impose de prendre en compte la logique de fonctionnement du système et d'être capable de modéliser la fiabilité de chaque composant qui le compose. Pour exprimer cette fiabilité, plusieurs types de modèles peuvent être envisagés. Leur objectif commun est de décrire l'évolution du composant d'un état de marche vers un état de panne. Lorsqu'il est impossible de traduire la complexité du mécanisme de défaillance, la modélisation stochastique est recommandée. Cette modélisation intègre deux grands types de modèles: modèles à dégradation continue, modèles à dégradation discret. Nous avons aussi abordé la théorie des probabilités et statistique, car cette dernière permet de modéliser les phénomènes aléatoires à travers les processus stochastiques utilisés pour la prédiction et le pronostic de la durée de vie de certain équipement ainsi de leur fiabilité, et de leur taux de défaillance.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les méthodes d'analyses des pannes de la pompealimentaireHPT28-20.

# ***Chapitre 03 :***

## ***Analyse des arrêts d'un système réparable,***

### ***Cas : pompe centrifug***

III.1.Introduction	39
III.2. Classification des turbomachines	39
III.2.1. Suivant la forme du rotor	39
III.2.2. Comportement du fluide	40
III.2.3. Sens du transfert d'énergie	40
III.2.4. Nombre d'éléments disposés en série	40
III.2.5. Mode d'action du fluide	41
III.2.6. Degré d'injection	41
III.3.Définition et principe de base des pompes	41
III.4. Les différents organes d'une pompe centrifuge	41
III.4.1. Organes ayant une fonction hydraulique	41
III.4.2. Organes ayant une fonction mécanique	42
III.4.3. Organes ayant une fonction d'étanchéité	43
III.5.Paramètres de travail d'une pompe centrifuge	44
III.5.1. Le débit	44
III.5.2. La hauteur manométrique totale	44
III.5.3. La Pression	44
III.5.4. Puissance	44
III.5.5. Pertes et rendements	45
III.6. Paramètres de choix des pompes centrifuges	46
III.7. Avantage des pompes centrifuges	47
III.8. Etude de cas ; Pompe alimentaire HPT 28-20 à 8 étages	47
III.8.1. Historique des pannes de la pompe alimentaire	49
III.8.2.Présentation de la méthode ABC	51
III.8.2.1.Détermination du cadre de l'étude et ses limites	51
III.8.2.2.Construction de la courbe ABC	51
III.8.2.3.Représentation graphique	51
III.8.2.4. Analyse ABC de la pompe alimentaire HPT28-20	52
III.8.3. Analyse de L'AMDEC	53
III.8.3.1. Classification des éléments par leurs criticités	60
III.8.3.2. Amélioration de la disponibilité	60
III.9. Conclusion	60

### III.1. Introduction

Les pompes centrifuges sont le type de pompe le plus répandu dans l'industrie. Leur fonction est d'assurer le débit de liquide souhaité par l'exploitant mais dans des conditions de pression imposée par les procédés et les applications, avec des contraintes particulières à l'installation, l'environnement, la fiabilité, la sûreté, etc, ils doivent être utilisés dans des conditions bien précises, en respectant quelques règles simples. Il en résultera une réduction non seulement de l'énergie consommée, mais aussi des risques encourus, des coûts de maintenance, des temps d'immobilisation et du niveau de bruit de l'installation. La sécurité des hommes et leur mieux-être seront la conséquence de ces différents facteurs. Chaque constructeur doit être en état de choisir des pompes selon les exigences technologiques, voilà pourquoi il doit bien connaître les constructions de ces machines, leur principe de fonctionnement, les paramètres de réglage, les règles de l'entretien et la base théorique pour prévoir l'état de la machine dans les différentes conditions d'emploi. Le but de ce chapitre est d'étudier la pompe alimentaire HPT 28-20, de leurs pannes qui entraînent des modifications de fonctionnement, et qui réduisent l'efficacité et la fiabilité de la pompe, ainsi que les différentes méthodes d'analyse de ces pannes telle que la méthode ABC, et AMDEC.

### III.2. Classification des turbomachines

Un premier classement naturel des turbomachines est fait à partir de la nature du fluide utilisé. Selon ce critère elles peuvent appartenir à deux groupes : les machines à fluides incompressibles telles que les pompes, les ventilateurs, et les machines à fluides compressibles, dont les compresseurs.

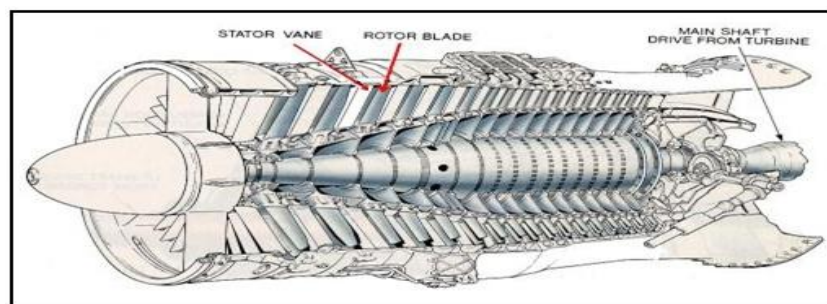


Fig. III.1. Rotor de turbomachine moderne.

Il existe de nombreuses manières différentes de classer les turbomachines :

#### III.2.1. Suivant la forme du rotor :

On distingue principalement trois grands types de machines suivant la manière dont la particule fluide traverse le rotor de la machine :

**A) Machines radiales :**

L'écoulement s'effectue dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. On parle de machines centrifuges dans le cas de machines génératrices, et de machines centripètes dans le cas de machines réceptrices.

**B) Machines axiales :**

L'écoulement s'effectue dans un plan parallèle à l'axe de rotation.

**C) Machines hélicoïdes :**

Il s'agit de machines intermédiaires dans lesquelles l'écoulement s'effectue dans des surfaces de révolutions dont la méridienne est inclinée par rapport à l'axe de rotation [76],

Les trois types de machine sont représentés par la figure (III.2).

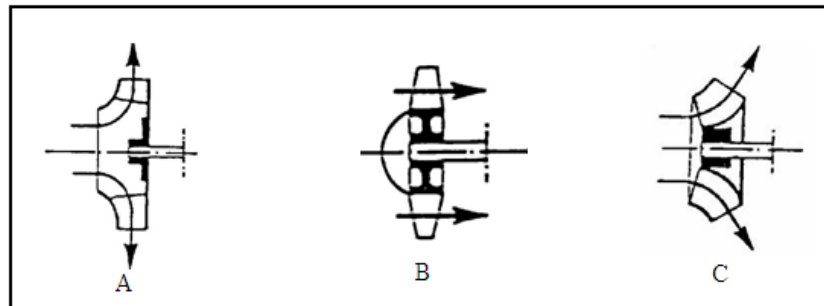


Fig. III.2. Classification des turbomachines suivant la forme du rotor.

**III.2.2. Nature du fluide :**

Le fluide utilisé dans les turbomachines peut avoir un comportement incompressible ou compressible. Dans ce dernier cas, l'étude est plus complexe et nécessite une analyse thermodynamique propre à la mécanique des fluides compressibles [77].

**III.2.3. Sens du transfert d'énergie :**

C'est-à-dire suivant s'il faut transformer l'énergie d'un fluide en énergie mécanique ou inversement, dans le premier cas il s'agit des machines réceptrices telles que les turbines hydrauliques; dans le second cas il s'agit de machines génératrices comme les pompes, ventilateurs, etc. Les hélices aériennes et marines rentrent dans cette catégorie. Enfin il existe des machines, les turbines-pompes qui peuvent jouer les deux rôles.

**III.2.4. Nombre d'éléments disposés en série :**

Une turbomachine élémentaire ou monocellulaire, comporte en principe deux séries d'aubages, les uns fixes, les autres mobiles. L'association d'un organe fixe et d'une roue mobile constitue une cellule capable de caractéristiques déterminées. Dans certains cas, il est nécessaire de disposer plusieurs cellules en série, le fluide parcourant successivement chacune d'elles, d'où l'appellation de machines multicellulaires.

### **III.2.5. Mode d'action du fluide :**

On distingue les machines dites à action et les machines dites à réaction.

### **III.2.6. Mode d'injection :**

On distingue les machines à injection totale ou partielle suivant que tous les canaux ou certains d'entre eux seulement sont remplis de fluide actif [78].

Les pompes sont classées, selon leur principe de fonctionnement, en deux groupes : les pompes volumétriques qui transportent le fluide grâce à un changement de volume à l'intérieur d'une ou plusieurs cavités et les pompes rotodynamiques dans lesquelles a lieu un échange de quantité de mouvement entre le fluide et les aubes de la machine [79].

### **III.3. Définition et principe de base des pompes centrifuge**

La pompe centrifuge est une machine élévatoire qui suivant le principe physique de l'action et la réaction adapte son débit en fonction de l'énergie totale qui lui est demandée. Les points de fonctionnement (hauteur manométrique, débit) sont donc des caractéristiques hydrauliques du réseau qu'elle alimente [80].

Le principe de base de n'importe quelle pompe est de faire transporter un liquide d'un niveau à un autre, pour des pressions en amont ainsi qu'en aval de la pompe différente [81].

D'une façon générale, le principe est de fournir au liquide transporté l'énergie nécessaire pour qu'il puisse se déplacer d'un point à un autre.

### **III.4. Les différents organes d'une pompe centrifuge**

Une pompe centrifuge se compose des parties essentielles suivantes :

#### **III.4.1. Organes ayant une fonction hydraulique :**

- Une roue à aubes tournant autour d'un axe : La roue d'une pompe centrifuge se compose de deux disques (dit aussi flasques) qui sont reliés entre eux par l'intermédiaire d'un certain nombre d'aubes. L'un des deux flasques est calé sur l'arbre par l'intermédiaire d'un noyau. L'autre flasque possède en son centre un orifice (dit aussi ouïe) dont l'axe de rotation de la roue et qui doit permettre le passage du liquide.
- Un diffuseur : C'est un organe fixe concentrique à l'axe de la pompe. Constitué d'ailettes, ces dernières sont inclinées de telle façon qu'elles reçoivent le liquide tangentiellement pour éviter les chocs et de diminuer les pertes. Ce diffuseur dirige le sens d'écoulement du fluide.
- Un corps sous forme de volute : pour la collecte du fluide, il canalise le fluide sortant du diffuseur vers la tubulure de sortie [82].

Dans certains cas, on utilise un diffuseur autour de la roue à aubes. Il est équipé d'une roue à aubes fixes, il sert à réduire les pertes de charge en fractionnant le flux du fluide. Pendant la rotation de la roue d'action, le fluide qui la traverse subit l'action de 2 forces :

- Force centrifuge qui est dirigée de l'axe de rotation vers la périphérie de la roue d'action.
- Force d'interaction hydrodynamique entre les aubes tournantes et le fluide qui passe par les canaux d'aubage. Le déplacement relatif des aubes par rapport au fluide provoque une force réactive dont la composante est dirigée le long du profil de l'aube.

Sous l'action des deux catégories de forces, le fluide se déplace dans les canaux de la roue d'action de la lisière d'entrée (vue) de l'aube vers la lisière de sortie. Le processus de déplacement du fluide est accompagné par l'accroissement de la pression (hauteur statique) ainsi que l'augmentation de la vitesse du fluide (hauteur dynamique).

L'aspiration du fluide à l'intérieur de la roue d'action est due à la dépression qui apparaît pendant la rotation de la roue d'action. Cette dépression conjuguée à la pression atmosphérique provoque l'écoulement naturel du fluide vers l'entrée de la roue à aubes [82].

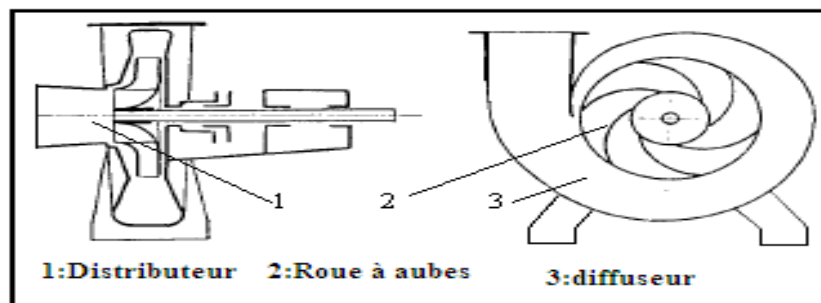


Fig.III.3. Schéma d'une pompe centrifuge

#### III.4.2. Organes ayant une fonction mécanique :

- **Arbre** : L'arbre est en acier inoxydable et l'unité qui provoque le mouvement de rotation des organes de travail de la pompe. Il est soumis à l'action de toute une série des forces extérieurs (pression du fluide) selon la grande taille de la pompe, pour faciliter le montage et démontage, l'arbre est devisée en arbre intérieur, intermédiaire et supérieur, ils seront ajustés avec précision d'un bout à l'autre, et ce pour diminuer ces forces sans risques.
- **Les paliers** : Les conditions que doivent remplir les paliers sont :
  - Guidage de l'arbre en rotation.
  - Montage facile.

- Le cas échéant, possibilité de réglage d'un alignement. Les paliers dans ce cas sont lubrifiés par le liquide (huile), pompe (autolubrification) et se sont des paliers chemises renouvelables (paliers lisses).

#### III.4.3. Organes ayant une fonction d'étanchéité :

- **Joint :** Pour éviter que le liquide ne s'échappe pas à l'arrière de la roue, on place un joint entre l'arbre rotatif et le corps de pompe. Le joint est la partie la plus délicate de la pompe. Il existe deux types principaux de joints ;
  - Les joints de garniture (bagues d'étanchéité).
  - Les joints mécaniques.
- **Joint de garniture :** Le joint de garniture, ou garniture d'étanchéité est en graphite combiné à l'amiante ce joint est formé d'une garniture d'une presse étoupe et d'un bague à croisillon.
- **Garniture :** La garniture est en graphite, pour la rendre anti-lubrifiante il n'est pas nécessaire de la lubrifier avec de l'huile. Car elle est maintenue sur le dispositif d'entraînement de l'arbre, qui tourne et produit un frottement. La graphite diminue ce frottement et donc diminue la chaleur produite par ce frottement. Le graphite est ainsi maintenu en bon état. C'est entre l'arbre et la garniture que peut s'échapper le liquide. Il est donc nécessaire de maintenir ces bagues au niveau de l'arbre tournant.
- **Presse-étoupe :** C'est une pièce nommée presse-étoupe exerce une pression pour garantir que la garniture adhère à l'arbre. Le resserrage des écrous de la tige de fixation fait que la garniture adhère bien à l'arbre, cependant, Il ne fait pas serrer le presse-étoupe trop fort, si non la garniture s'use. Elle empêche que le liquide sort de la presse étoupe. Souvent pour empêcher une rayure, ou un autre dommage de l'arbre, on la protège par une chemise, de sorte qu'éventuellement ce n'est que la chemise qu'il faut remplacer, ce qui se traduit par une diminution du cout des réparations.
- **Bague à croisillon :** Bien qu'elle contienne du graphite, son contact avec l'arbre crée un frottement et donc de la chaleur. Il est donc nécessaire de le refroidir. Pour cela, il existe un circuit spécial qui amène l'eau de refroidissement au joint. Cette eau pénètre dans une bague métallique à croisillon dans la quelle peut circuler et même pénétre entre l'arbre et la garniture pour réduire la chaleur. L'eau sort par un tuyau de vidange, qui garantit de cette manière que l'eau soit remplacée par de l'eau fraîche d'une manière continue .

### III.5. Paramètres de travail d'une pompe centrifuges

#### III.5.1. Le débit :

Le fonctionnement d'une pompe ne se limite pas à faire déplacer le liquide en lui donnant une pression mais de déplacer une certaine quantité de liquide pendant un certain temps, qui varie d'une pompe à une autre. La quantité du liquide déplacé pendant ce temps est appelé le débit de la pompe il peut être mesuré en [83]:

- Volume ( $m^3/h$  ; L/h).
- Masse (kg/s)

#### III.5.2. La hauteur manométrique totale :

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre la pompe fournit une certaine énergie appelée hauteur manométrique ( $H_m$ ). Cela dépend des conditions d'aspiration et de refoulement, et le type de circuit (fermé – ouvert).

Dans le cas d'une pompe à axe horizontale. On définit la hauteur comme suit :

$$H_m = H_g + \Delta H \quad (\text{III.1})$$

#### III.5.3. La Pression:

La pression peut être absolue ou effective, au cas ou la pression  $P$  est comptée à partir de zéro ; on l'appelle pression absolue, dans le cas ou elle est comptée à partir de la pression atmosphérique ; on l'appelle pression effective ou bien manométrique.

Par conséquent la pression absolue est égale à la somme des pressions atmosphérique et effective :

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{eff} \quad (\text{III.2})$$

#### III.5.4. La Puissance:

- **La Puissance hydraulique**

La puissance hydraulique est une puissance utile transformée à l'énergie des liquides sans tenir compte des pertes de charge.

$$p_h = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot H_m \quad (\text{III.3})$$

- **La Puissance consommée**

La puissance consommée est une puissance mécanique absorbée par l'arbre de la pompe.

$$p_c = M \cdot \omega \quad (\text{III.4})$$

### III.5.5. Pertes et rendements :

On appelle pertes de charge les déperditions de pression affectant le fluide qui circule dans une conduite, un raccord ou une composante du système. Ces pertes de charges sont imputables à la consommation de l'énergie nécessaire au maintien du débit.

Les pertes qui se produisent dans une pompe peuvent être classées en trois catégories:

- **Les Pertes hydrauliques:**

Sont dues aux frottements des particules liquides entre elles et aux frottements des particules liquides sur les parois solides (surfaces aubes et flasques, etc.)

Les pertes hydrauliques sont caractérisées par le rendement hydraulique [83].

$$\eta_{hy} = \frac{H_r}{H_{th}} \quad (\text{III.5})$$

Avec ;  $H_r$  : la hauteur réelle

$H_{th}$  : la hauteur théorique

- **Les Pertes volumétriques**

Sont dues aux fuites des liquides à travers les jeux (joints d'étanchéité). Ces pertes sont caractérisées par le rendement volumétrique.

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_{th}} \quad (\text{III.6})$$

Avec ;  $Q_r$  : le débit réel

$Q_{th}$  : le débit théorique

- **Les Pertes mécaniques:**

Sont dues aux frottements mécaniques des pièces entre elles (Presse-étoupe, paliers et bagues d'usures).

$$\eta_{méc} = \frac{P_{hy}}{P_{méc}} \quad (\text{III.7})$$

Avec ;  $P_r$  : La puissance hydraulique

$P_{th}$  : La puissance théorique

Le rendement global caractérisant une machine est:

$$\eta = \eta_{hy} \cdot \eta_v \cdot \eta_{méc} \quad (\text{III.8})$$

Le rendement indique le taux de performance hydraulique, mécanique et volumique d'une pompe. Ce dernier est défini par rapport de la puissance fournie par la pompe au liquide à la puissance absorbée sur l'arbre de la pompe, c'est-à-dire :

La puissance absorbée sur l'arbre est égale à la puissance fournie par le moteur d'entraînement, elle est appelée aussi « puissance sur arbre » [81]

### III.6. Paramètres de choix des pompes centrifuges

Une pompe centrifuge doit être choisie selon les conditions suivantes :

- **Conditions hydrauliques**

Les hauteurs manométriques d'aspiration et de refoulement, le débit à assurer sont reportées sur les courbes caractéristiques de diverses pompes possibles, l'accent a été porté sur l'intérêt qui s'attache à choisir une machine bien adaptée aux conditions du problème à résoudre, c'est-à-dire susceptible de fonctionner dans la zone de son rendement maximal, conduisant au coût le plus faible du mètre cube d'eau élevée. (figure III.5)

- **Conditions mécaniques**

Lorsqu'on modifie la résistance du circuit, par exemple en fermant partiellement une vanne, le point de fonctionnement se déplace, ce qui modifie le débit passant dans l'installation, aux positions limites on trouve [84]:

- Dans la position vanne totalement ouverte : débit maximum de l'installation compte tenu de la pompe installée.
- Dans la position vanne totalement fermée : débit nul. (figure III.4)

Les valeurs de la vitesse de rotation, couple, de la puissance absorbée et du rendement sont à prendre en considération pour choisir le type du moteur d'entraînement de la pompe. Notons que ce problème ne se pose que dans le cas d'une pompe fournie indépendamment de son moteur, généralement l'ensemble du groupe moto-pompe est livré par le constructeur qui a procédé aux adaptations nécessaires.

- **Conditions d'installation et d'entretien**

Elles sont fort importantes et ne doit pas être négligées, les conditions d'aspiration et d'amorçage, l'encombrement du groupe (lié généralement à la direction de l'axe : horizontale ou verticale) doivent intervenir pour orienter le choix sur tel type de pompe. Les propriétés physico-chimiques du liquide pompé (température, ....) ont une importance considérable dans le choix des matériaux constitutifs de la pompe et ce pour éviter ou même réduire les risques de corrosion. En fin les facilités d'entretien doivent également être prises en compte pour arrêter le choix [84].

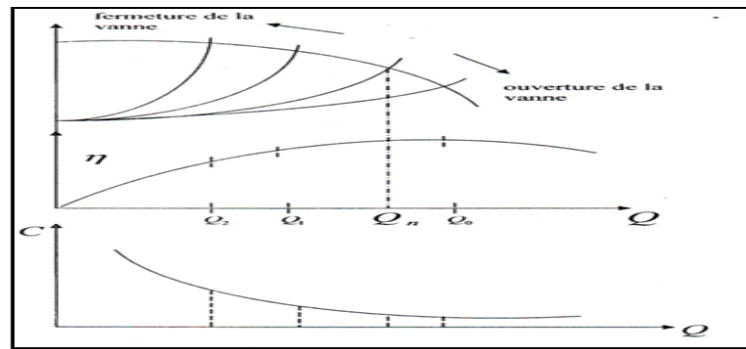


Fig. III.4. Influence de la vanne de réglage

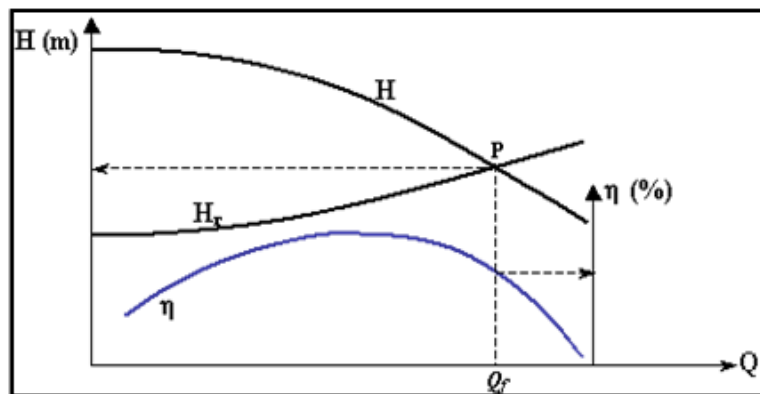


Fig. III.5. Point de fonctionnement d'une pompe

### III.7. Avantage des pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont appliquées éventuellement au pompage des liquides clairs ou chargés mais non visqueux. Elles ont pour avantage :

- La simplicité de conception et de construction, puisque l'entraînement de la partie tournante est réalisée par des moteurs électrique de prix raisonnables.
- Un fonctionnement souple et relativement silencieux.
- L'absence de risque surpression accidentelle à l'intérieur de l'appareil, l'obstruction de l'orifice de refoulement n'entraîne qu'un barbotage sans conséquences graves.
- Grande facilité d'adaptation à des problèmes variés par une simple modification ou ajustement d'un organe interne.

### III.8. Etude de cas ; Pompe alimentaire HPT 28-20 à 8 étages

Les pompes alimentaires se sont les machines auxiliaires les plus importantes des installations de générateurs de vapeur dans les centrales de gaz .

Le générateur de vapeur en question est alimenté en eau par (2) groupes moto pompes (plein débit), identique, qui ne fonctionnent simultanément.

Sur la même ligne d'arbre d'un groupe moto-pompe, on peut citer les sous-systèmes suivant :

- Une pompe nourricière SULZER, modèle NPT 48-25, ayant un débit de 520 T/h m une pression de 12 bar et une vitesse de 1500 tr/min.
- Un réducteur de vitesse (SKODA), 2980/1500 tr/min, d'une puissance de 134.5 kW.
- Un moteur électrique d'entraînement (SKODA), ayant une vitesse de 2980 tr/min et une puissance de 4100 kW.
- Un multiplicateur coupleur (NEYPRIC), type R17K
- Une pompe alimentaire principale (SULZER) à 08 étages, ayant les caractéristiques suivantes :
  - Hauteur manométrique : 1900 Mce
  - Vitesse de rotation : 4710 tr/min
  - Débit massique au refoulement : 530 T/h
  - Débit volumique au refoulement : 152 l/s



**Fig.III.6. Vue générale de la pompe alimentaire HPT 28-20 à 8 étages**

Le principe de fonctionnement du groupe est décrite de la manière suivante, la pompe nourricière aspire dans la bêche alimentaire et refoule dans la pompe alimentaire. L'entrée dans la pompe nourricière se fait axialement, tandis que le refoulement est dirigé vers le bas. Les tubulures d'aspiration et de refoulement de la pompe alimentaire sont dirigées vers le haut.

Le coupleur permet une variation de vitesse de la pompe alimentaire, donc une bonne utilisation du matériel, quel que soit le débit à assurer au générateur de vapeur.

Il est souhaitable de faire fonctionner périodiquement le groupe de secours afin de s'assurer de sa disponibilité.

Pour un fonctionnement correct, différents paramètres sont contrôlés au moyen d'appareils en local, avec transmission de certains paramètres en salle de commande, tels que les pressions d'aspiration et de refoulement, la température des différentes pompes.... Des alarmes sont signalées au cas où l'un des paramètres de fonctionnement atteint des valeurs non admises pour un bon fonctionnement.

### **III.8.1. Historique des pannes de la pompe alimentaire :**

Selon l'historique du groupe moto-pompe, on remarque que la pompe alimentaire représente seule environ 56% du totale des pannes du groupe motopompe. Ce qui nous a obligé à établir une analyse plus approfondie de cette situation.

- **Les Actions de maintenance concernant les pannes mécanique ;**
  - Remplacement des tresses de presse étoupe (11 fois pendant 3 ans avec un temps d'arrêt 62 h).
  - Démontage de la tuyauterie d'injection de prise de débit, Rodage du siège du mamelon (14 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 172h).
  - Remplacement du mamelon de serrage de prise de débit
  - Nettoyage de la tuyauterie d'eau de refroidissement, Nettoyage des 5 filtres de la pompe encrassé (04 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 34h).
  - Remplacement chemise presse étoupe (02 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 32h).
  - Recharge avec soudure et moulage sur la bride de fixation de la tuyauterie de prise de débit, Remplacement de toute la jointure et remontage.
  - Soudage et moulage sur plan de joint de la bride de fixation de la tuyauterie de prise de débit, Remplacement d'un joint et remontage.
  - Remplacement de coussinet neuf (01 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 16h).
  - Rodage plan de joint du mamelon, Remplacement des jointes torique sur la prise de débit.
  - Usinage à la fraise du joint d'étanchéité, Remplacement joint neuf. (01 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 4h).
- **Les Actions de maintenance concernant les pannes de l'instrument ;**
  - Etalonnage du transmetteur. (02 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 2h)
  - Remplacement du tachymètre. (02 fois pendant 3ans avec un temps d'arrêt 2h)
  - Remplacement du relais XA18.
  - Remplacement du relais XT11.

D'après l'historique des pannes de la pompe alimentaire, on doit présenter le tableau suivant :

Tableau.III.1. : Classification des différents types de panne de la pompe alimentaire

N°	type	N <sup>bre</sup> des pannes	durée d'arrêt (h)	cumule N <sup>bre</sup> de pannes %	cumule heures d'arrêt %
1	Mécanique	33	320	84.61	98.15
2	instrument	06	6	15.38	1.85
Total		39	326	100	100

Les deux figures (III.7, III.8), représentent les histogrammes de types des panne par rapport aux cumuls heures d'arrêt et aux cumuls nombre des pannes respectivement.

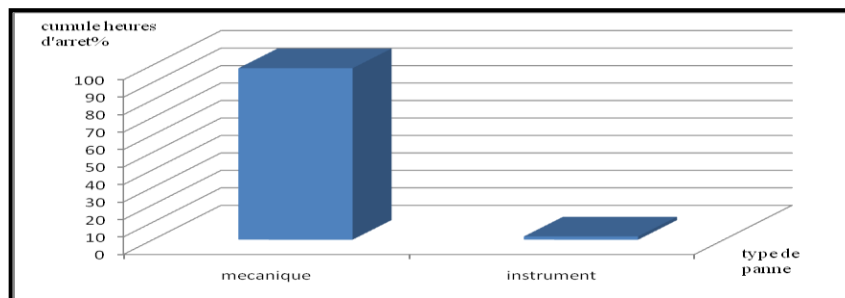


Fig.III.7. Classification des pannes par rapport au cumul d'heures d'arrêt.

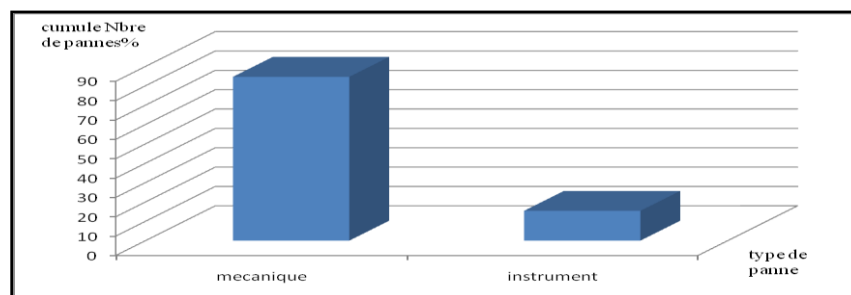


Fig.III.8. Classification des pannes par rapport aux cumuls nombre des pannes.

On remarque d'après les figures (III.7, III.8), Les pannes des éléments mécaniques sont responsables de 98,15% des heures d'arrêt cumulées. Les causes responsables de 1.85% des heures d'arrêt cumulées sont de natures instrument. Le nombre des pannes de type mécanique représentent 84.61% des N<sup>br</sup> des pannes cumulés, 15.38% sont dus aux pannes relatives aux éléments instruments.

A partir de ces résultats, sous forme d'histogrammes, on constate facilement que les causes des pannes de type mécanique (84,61%) sont responsables de la majorité des effets (98,15%) avec un nombre important de pannes.

Donc on doit concentrer nos efforts sur la partie mécanique de la pompe alimentaire, pour déterminer bien évident la minorité d'éléments responsables de la majorité des effets, afin de choisir la politique de maintenance la plus convenable.

### III.8.2.Présentation de la méthode ABC :

La méthode ABC est un moyen d'analyse, qui permet de classer les éléments qui représentent la fraction la plus importante du caractère étudié, en indiquant les pourcentages pour un critère déterminé.

La représentation de la méthode est la courbe ABC, qui permet de visualiser de façon simple les résultats.

Le tracé de cette courbe passe par les étapes décrites ci-dessous.

#### III.8.2.1.Détermination du cadre de l'étude et ses limites :

- Définir la nature des éléments à classer: défaillances, pièces de rechange, bons de travail...
- Choisir le critère de classement : coût, temps, nombre d'heures d'utilisation du matériel...
- Rechercher la période représentative : les valeurs du critère choisi doivent correspondre à une période représentative pour le caractère étudié, en général, l'année ou le semestre convient.

#### III.8.2.2.Construction de la courbe ABC :

- Rechercher le nombre qui caractérise les éléments retenus : c'est la documentation de l'entreprise qui fournit cette information,
- Classer les éléments par valeur décroissante puis cumuler les valeurs dans le même ordre,
- Tracer la courbe : en général, on distingue trois zones principales sur la courbe, appelées A, B et C, d'où le nom de la méthode,
- Interpréter la courbe.

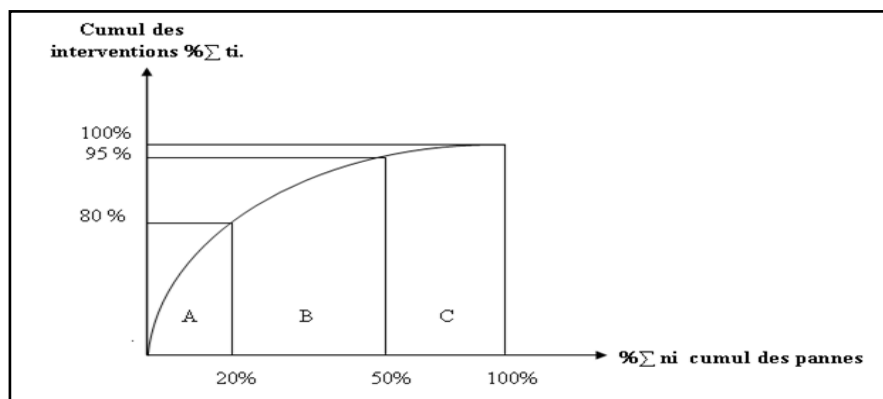


Fig III.9. Représentation graphique de la méthode ABC

#### III.8.2.3.Représentation graphique :

La courbe ABC fait apparaître trois zones d'où l'application de courbe ABC en cumulant les valeurs décroissantes du critère étudié:

- Zone A : 20% du nombre des éléments représentent 80% du critère étudié,
- Zone B : les 30% d'éléments en plus représentent 15% en plus du critère étudié,
- Zone C : les 50% d'éléments restants ne représentent plus que 5% du critère étudié.

#### III.8.2.4. Analyse ABC de la pompe alimentaire HPT28-20:

L'analyse ABC consiste à déterminer la minorité des causes responsables de la majorité des effets. On peut alors faire un plan d'action sélectif qui s'attaque aux éléments essentiels en l'occurrence les éléments mécaniques. On optimise ainsi l'action en ne s'intéressant pas aux nombreux éléments qui ne sont responsable que d'une très petite minorité d'effets à éliminer.

Le tableau ci-dessous présente les différents organes mécaniques défailants avec leur temps d'arrêt.

**Tableau .III.2. Les principaux organes mécaniques défailants et leurs temps d'arrêt.**

N°	Désignation	N <sup>bre</sup> des pannes	Heures d'arrêt	Cumul N <sup>bre</sup> des pannes %	Les Heures d'arrêt Cumulées%
1	Remplacement des tresses de presse étoupe (tresses de presse étoupe)	11	62	9.52	53.75
2	Prise de débit intermédiaire (siège, mamelon.....)	14	172	14.28	73.125
3	Remplacement chemise de presse étoupe (chemise de presse étoupe)	02	32	38.09	83.75
4	Remplace coussinet neuf (Coussinet)	01	16	52.38	93.75
5	Nettoyage du filtre encrassé (Filtre)	04	34	71.42	98.75
6	Usinage à la fraise du joint d'étanchéité Remplacement joint neuf (joint d'étanchéité)	01	4	100	100

La courbe ABC correspondante est représentée par la figure (III.10)

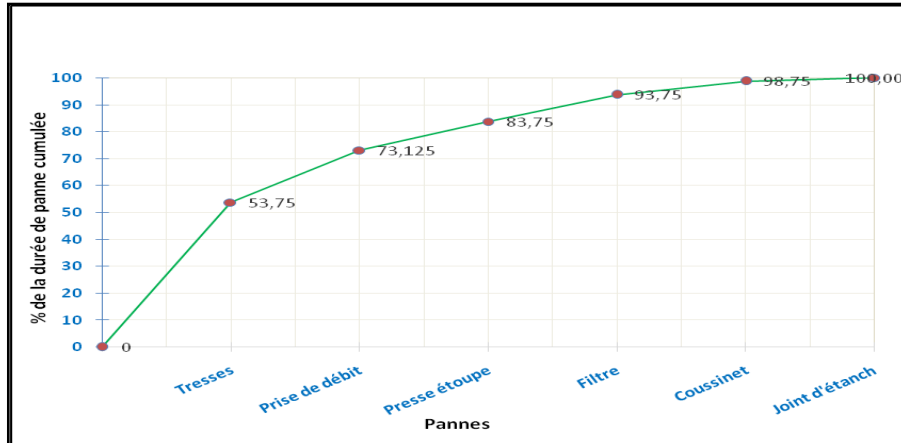


Fig.III.10. la courbe ABC de la pompe alimentaire HPT28-20

D'après la figure (III.10), on distingue clairement les trois zones de courbe ABC. On constate que Les arrêts cumulés de la pompe provoquent 83,75% des heures d'arrêts (zone A). Il est évident que si on concentre les efforts sur l'amélioration de la fiabilité des organes correspondants à ces pannes (prise de débit intermédiaire, chemise et tresses de presse étoupe), on peut aller chercher des réductions de couts très importantes (couts de la maintenance et d'arrêt de la production). Généralement, les éléments appartenant à la catégorie A sont sélectionnés pour la maintenance préventive systématique.

Les éléments défaillants dans la zone B (Filtre) représentent 10% des valeurs cumulées du critère. Cette zone à moins d'intérêt vis-à-vis du critère étudié que la zone A.

Dans la zone C, la panne du joint d'étanchéité et Coussinet, ne revient qu'à 6.25% du temps d'arrêt total, c'est la zone de plus petite importance.

les résultats obtenus permettent de prendre des décisions suivante:

- On organise une politique de maintenance préventive systématique ou préventive Conditionnelle
- On améliore la fiabilité de ces machines
- On prévoit des stocks de pièces de rechange avec une plus grande attention.

### III.8.3. Analyse de L'AMDEC :

L'AMDEC est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition fonctionnelle de système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires. Les éléments sont : arbre, palier, diffuseur, dispositif d'étanchéité, Soupape de sécurité.

La méthode AMDEC est basée sur :

- A) Analyse des mécanismes de défaillance.

- B) Identification des modes de défaillance.
- C) Recherche des causes.
- D) Recherche des effets.
- E) Recensement des détections.
- F) Evaluation de la criticité : Cette phase consiste à évaluer la criticité des défaillances de chaque élément, à partir de plusieurs critères de cotations indépendants. C'est l'aspect quantitatif de l'analyse.

Pour chaque critère de cotation, on attribue un niveau (une note ou un indice), un niveau de criticité en est ensuite déduit, ce qui permet de hiérarchiser les défaillances et d'identifier les points critiques.

L'évaluation de la criticité se fonde sur l'état actuel ou prévu de la machine au moment de l'étude. Les critères de criticité s'expriment dans le tableau AMDEC par leurs niveaux respectifs.

- **Estimation du temps d'intervention :**

Estimation du temps d'intervention de maintenance corrective, pour chaque combinaison cause-mode effets. La notion de temps d'intervention (TI) est un élément utile pour coter ensuite le niveau de gravité. Elle concerne directement les équipes de la maintenance.

- **Evaluation des critères de cotation :**

Evaluer le niveau atteint par les critères de fréquence, gravité en probabilité de non-détection, pour chaque combinaison cause-mode-effet.

Les critères de cotation utilisée sont (selon les standards) :

- La fréquence d'apparition de la défaillance.
- La gravité de la défaillance.
- La probabilité de non-détection de la défaillance.

A chaque critère, on associe un niveau, respectivement F pour la fréquence, G pour la gravité et D pour la probabilité de non-détection.

Pour effectuer cette évaluation, on utilise des barèmes de cotation définis selon trois 3 ou plus fréquemment quatre 4 ou même cinq 5 niveaux. On s'appuie sur :

- Les connaissances des membres du groupe sur les dysfonctionnements.
- Les banques de données de fiabilité, historiques d'avaries, retour d'expérience, etc.

- **Calcul de criticité :**

Calculer le niveau de criticité, pour chaque combinaison cause-mode-effet, à partir des niveaux atteints par les critères de cotation. La valeur de la criticité est calculée par le produit des niveaux atteints par les critères de cotation :

$$C = F \cdot G \cdot D \quad (\text{III.9})$$

Dans le cas où l'on utilise des grilles de cotation à 4 niveaux pour F et D et une grille à 5 niveaux pour G, C varie de 1 à 80 (C peut prendre 25 valeurs différentes). Les défaillances peuvent alors être classées en deux catégories par comparaison avec un seuil criticité admissible  $C_{lim}$  pré défini par exemple  $C_{lim} = 16$

- Défaillance critique pour lesquelles  $C \geq C_{lim}$  .
- Défaillance non critique pour lesquelles  $C < C_{lim}$  .

Souvent on considère également comme critique une défaillance dont la gravité est importante (G=5 par exemple), sauf si F et D sont tous les deux égaux à 1

Tableau.III.3. Analyse AMDEC

Sous-système : pompe alimentaire										
L'élément	fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
Arbre +roue	-Transforme l'énergie mécanique fournie en énergie hydraulique par l'arbre au fluide sous forme d'énergie cinétique - pour l'arbre c'est transmettre la force d'entraînement et résister à la poussée axiale et la vitesse	- fléchissement d'arbre -Blocage de l'arbre - Cisaillement d'arbre	-température élevée du liquide -Destruction des roulements -Le poids grand, poussée axiale	-Arrêt total de la pompe	-indicateur de t et indicateur de vibration - refoulement insuffisant ou inexistant - arrêt immédiat par coupure électrique -bruit anormal -désalignement de l'arbre.	2	4	2	16	-alignement ou changement de l'arbre -changement des ailettes ou réparation -réparation ou changement du rouet
		-Destruction des ailettes de la roue - jeu	-Cavitation -Débit trop réduit -Vortex (turbulence) -Echauffement excessif -Jeu dans les roulements	-Diminution du rendement -Débit insuffisant -Vibration et bruit						

Sous-système : pompe alimentaire										
L'élément	fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
palier	-supporter les charge axiales et permettant la rotation de l'ensemble - Guider l'ensemble mobile et supporter les charges radiales	-usure ou endommagement -surchauffe - Grippage	-Poussée excessive causée par des dérangements mécaniques ou leurs usures -Pression élevée qui n'est pas pareille à la pression du projet	-Courte durée des coussinets du palier -Surchauffement et grippage du palier	-indicateur de vibration -bruit anormal	2	4	2	16	- changement des coussinets des paliers -souffler les filtres ou changer
			-l'huile lubrifiant insuffisant -abrasion de l'huile lubrifiant	-Infiltration du liquide ou condensation dans le bati						- changement d'huile de lubrification

Sous-système : pompe alimentaire										
L'élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
Diffuseur	-Transforme l'énergie cinétique en énergie de pression, il dirige le sens d'écoulement du fluide	-mauvais écoulement -la pression d'écoulement diminue	Elargissement de l'arbre	-arrêt de la pompe -diffuseur défectueux (l'usure)	-faible pression de refoulement -faible débit -faible rendement	2	4	2	16	-Réparation du diffuseur par changement de la matière ou changement du diffuseur.

Sous-système : pompe alimentaire										
L'élément	fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
Soupape de sécurité	Assure le réglage du débit qui doit retrouver la bêche alimentaire	Rupture des tresses de presse étoupe	Usure des tresses	Fuite	Fuite visuelle	1	3	2	6	

Sous-système : pompe alimentaire										
L'élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action à engager
						F	G	D	C	
Dispositif d'étanchéité	Assurer l'étanchéité du système.	Courte durée provoque la fuite à l'étanchéité.	-le liquide contient des corps étrangers ou des substances abrasives. -joint non conforme au fluide pompé. -usure excessive de la chemise de revêtement arbre. - jeu entre les bagues d'étanchéité	-Arrêt de la pompe.	Détection visuelle	3	4	2	24	- Changement des bagues d'étanchéité ou des joints. -Serrage des boulons mal serrés.
		-Débit refoulé insuffisant. -Absorption d'une puissance excessive.	-serrage excessive de presse- étoupe ou compression de la tenue mécanique.	- débit insuffisant. -Diminution du rendement.						Changement des presse-étoupe.

### III.8.3.1. Classification des éléments par leurs criticités

On a choisi la valeur 16 comme seuil de criticité, les éléments dont la criticité dépasse 16 dans le tableau, agir en priorité à des actions correctives appropriées.

Tableau .III.4 les Actions correctives sur les éléments de la pompe

Catégorie	Élément	Criticité	Action correctives
1	Dispositif d'étanchéité	24	Remise en cause complète de la conception
2	Rotor, palier, diffuseur	16 16	Amélioration des performances des éléments. Maintenance préventive systématique

### III.8.3.2. Amélioration de la disponibilité

Pour l'amélioration de la disponibilité de la pompe alimentaire HPT28-20, il faut concentrer les actions de maintenance sur la 1<sup>ère</sup> catégorie (causes ayant une criticité supérieure à 16) en appliquant une maintenance préventive systématique (contrôle, nettoyage, lubrification, ....) et maintenance conditionnelle (capteurs,...).

Pour la 2<sup>ème</sup> catégorie (causes ayant une criticité 16) il faut appliquer une maintenance systématique (changement des équipements périodiquement).

Pour le reste d'équipements (causes ayant une criticité inférieure à 16) on peut appliquer une maintenance corrective.

### III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, et après un bref descriptif de la machine, nous avons collecté les données relatives aux différents arrêts engendrés au cours du fonctionnement, tels que les défauts mécanique, thermique, hydraulique, défauts de montage ou de construction également..., ces derniers peuvent s'avérer de lourdes conséquences. Pour cela, nous avons proposé deux méthodes d'analyse, la méthode d'analyse ABC pour prioriser l'importance des arrêts, et celle AMDEC afin la criticité des arrêts potentiels, ce qui vont permettre de définir : les exigences de sureté de fonctionnement de manière précise, et d'en identifier les fonctions critiques du système.

# ***Chapitre 04 :***

## ***Modélisation stochastique et calcul analytique***

### ***de la disponibilité d'une moto-pompe***

IV.1. Introduction	62
IV.2. Calcul fiabiliste d'un système	62
IV.3. Etude fiabiliste d'une pompe alimentaire	64
IV.3.1. Analyse du processus de dégradation par l'évolution de TTR	65
IV.3.1.1. Analyse statistique des valeurs de TTR	66
IV.3.1.2. Vérification de l'ajustement de l'adéquation de distribution normale des valeurs de TTR	68
IV.3.1.3. Modélisation du temps de réparation (TTR) par le processus de dégradation Wiener	68
IV.3.2. Détermination des caractéristiques de fiabilité	69
IV.3.2.1. Calcul du taux de défaillance $\lambda$	69
IV.3.2.2. Calcul du taux de réparation $\mu$	69
IV.3.3. chaîne de Markov de système étudié	70
IV.3.4. Interprétation des résultats	73
IV.4. Conclusion	74

## **IV.1. Introduction**

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, à partir leur influence sur le niveau de la sureté de fonctionnement des systèmes électromécaniques. Le niveau de la sureté de fonctionnement peut améliorer par l'optimisation d'un ensemble des paramètres tel que la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

Le calcul de la fiabilité d'un équipement constitue un outil incontournable pour évaluer l'efficacité de n'importe quelle système. Dans le cas d'un système réparable, il est nécessaire d'introduire un autre concept probabiliste : il s'agit de celui de la disponibilité [85].

Ce chapitre est consacré pour discuter le processus stochastique qui est une approche mathématique permet de suivre l'évolution d'un phénomène au cours du temps.

En plus, nous présentons les résultats d'une modélisation stochastique réalisée sur l'analyse statistique de l'évolution de la disponibilité d'un système pompe centrifuge, ce dernier est installé dans un complexe industriel. Ces calculs sont basés sur le temps total de réparation TTR et le taux de réparation, ces deux derniers paramètres sont calculés continuellement, et ce pour étudier l'impact de l'arrêt sur le fonctionnement de système. L'analyse des résultats va nous permettre d'étudier le phénomène de dégradation du système par l'utilisation des processus stochastiques, ils représentent un ensemble de variables aléatoires ( $X_T$ ) dans l'ensemble des observations. Ces derniers sont couramment utilisés, en plus d'autres modèles tels que ; processus de Markov, processus de Wiener.....

## **IV.2. Calcul fiabiliste d'un système**

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, conçus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné [86]. Pour chaque système, il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer. La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [48]. C'est donc une grandeur comprise entre 0 et 1.

Rappelons que la durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu. Selon le système étudié, elle s'exprime en termes de temps, de kilomètres, ou autre. Le fait

que la défaillance d'un système puisse survenir à n'importe quel moment nous amène à considérer cette grandeur comme une variable aléatoire à laquelle nous pouvons associer une fonction de densité de probabilité  $f(t)$ . Il importe de rappeler que  $f(t) dt$  est la probabilité que la durée de vie d'un système soit comprise entre  $t$  et  $t + dt$ , ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre  $t$  et  $t + dt$ .

La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux ( $\lambda$ ) appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Il est défini comme étant la probabilité conditionnelle que l'équipement tombe en panne entre l'instant  $t$  et  $t + \Delta t$  sachant qu'il a survécu jusqu'à l'instant  $t$ . Il peut aussi être défini comme la proportion de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t$ . Il représente également la vitesse d'arrivée de la panne [87].

$$\lambda(t) = \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{N(t)} \quad (IV.1)$$

Avec:

$N(t)$ : nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t$ ,

$N(t+\Delta t)$ : nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t+\Delta t$ .

L'augmentation de la complexité d'un système mécanique, fait diminuer sa fiabilité, si l'on ne prend pas des mesures compensatoires. Un système formé de composants indépendants, c'est-à-dire en série, si un seul des composants est en panne, le système ne fonctionne plus. On dit que le système est sans redondance. La fiabilité de ces systèmes se détériore dramatiquement avec l'augmentation du nombre des composants [88].

Lorsqu'on étudie la fiabilité, on s'intéresse non seulement à la probabilité de panne, mais aussi au nombre de pannes, et en particulier, au temps requis pour faire les réparations.

Dans cette perspective, deux nouveaux paramètres de la fiabilité deviennent notre centre d'intérêt. La disponibilité est la probabilité qu'un système pour qu'il soit disponible pour être utilisé à un moment donné. Cette définition est proche de celle de la fiabilité, sauf que le système demandé doit fonctionner à l'instant ( $t$ ) et non sur une période de temps ( $0$  à  $t$ ).

Pour un système avec un taux de défaillance  $\lambda$  constant (équation IV.3) et d'un taux de réparation  $\mu$  constant (équation IV.4), la disponibilité instantanée classique de l'équipement de production est calculée par l'expression suivante:

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} + \frac{\lambda}{\mu+\lambda} e^{-(\mu+\lambda)t} \quad (IV.2)$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (IV.3)$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (IV.4)$$

$$MTTR = \frac{\sum TR}{N} \quad (IV.5)$$

Avec : TR est le temps de réparation

MTTR : est la moyenne des temps techniques de réparation.

MTBF : est la moyenne des temps de bon fonctionnement.

Lorsque  $\lambda$  et  $\mu$  sont indépendants du temps et lorsque (t) devient grand, on constate que D(t) tend vers une valeur constante. Cette valeur est souvent dénommée disponibilité asymptotique. Elle est donnée par:

$$D_{\infty} = \frac{1}{1+\lambda/\mu} \quad (IV.6)$$

La détermination de D(t) se fera à partir de l'estimation des paramètres de la fiabilité.

Par analogie avec la fiabilité, il est possible de donner à la maintenabilité une définition probabiliste et qui est : « la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, pour des limites de temps désirés, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions et avec des moyens prescrits ».

La fonction maintenabilité : est la probabilité pour qu'un dispositif soit réparé à un temps donné t, elle est donnée par l'expression suivante :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (IV.7)$$

### IV.3. Etude fiabiliste d'une pompe alimentaire

Nous présentons dans cette étude le cas d'un process d'alimentation d'une chaudière qui fonctionne à temps plein, durant toute l'année sans interruption en régime 3x8 (fonctionnement en continu). Le groupe qui assure le bon fonctionnement de ce système est composé des éléments suivants :

- Un moteur électrique (assure l'entraînement des deux pompes).
- Un coupleur réducteur (réduire la vitesse de rotation coté pompe nourricière).
- Une pompe nourricière (assure l'amorçage continue de la pompe alimentaire).
- Une pompe alimentaire (assure l'alimentation de la chaudière en eau).

L'étude fiabiliste effectuée est basée sur l'analyse de l'historique de la pompe alimentaire. Particulièrement sur le temps de bon fonctionnement (TBF) ainsi que le temps total de réparation (TTR).

Nous proposons pour cette étude la description d'une méthode de traitement statistique des TTR pour la mise en place d'une méthode pour la recherche d'une loi de probabilité ajustable à l'échantillon étudié. Cette dernière fournira les caractéristiques :  $R(t)$ ,  $F(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  [89].

Pour se faire, on procède à une analyse statistique pour la description de la loi de distribution des TTR, ensuite on effectuera un test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov couramment utilisé dans telle analyse.

Les valeurs des TBF et TTR sont présentés sur le tableau (IV.1).

**Tableau. IV.1. Durée du bon fonctionnement TBF et de réparation TTR de la pompe d'alimentation**

N°	TTR	TBF	N°	TTR	TBF	N°	TTR	TBF
1	1	11087	10	5	1996	19	9	6398
2	16	9200	11	7	1158	20	6	4407
3	1	7172	12	8	6808	21	5	4072
4	4	1042	13	3	2968	22	4	2986
5	4	5550	14	7	3237	23	10	2488
6	4	3798	15	8	1407	24	18	3665
7	9	2566	16	3	4521	25	8	1258
8	5	6523	17	5	2366	26	18	3888
9	6	5332	18	8	3358	27	8	2253

#### IV.3.1. Analyse du processus de dégradation par l'évolution de TTR

Parmi les processus de dégradation, on trouve les processus stochastiques, Markov, Levy, Gamma, Wiener.... Sachant que, chaque processus exige une distribution bien défini de l'échantillon qu'on doit analyser. Citant comme exemple, une distribution normale est nécessaire pour un processus de Wiener qui possède une tendance linéaire ou non linéaire  $W(t)$  qui est caractérisé par les paramètres  $m$  et  $\sigma$ , respectivement la tendance linéaire (la moyenne) et la variance.

Les conditions initiales d'un tel processus :  $W(0) = 0$ ,  $W(t)$  est un processus stochastique avec des augmentations indépendantes avec des trajectoires continues.

Pour tout  $t > 0$  et  $\Delta t > 0$ , la loi d'évolution du processus Wiener est donnée par ;

$$W(t + \Delta t) - W(t) = (m\Delta t, \sigma^2\Delta t) \quad (IV.8)$$

Avec :  $(m\Delta t, \sigma^2\Delta t)$  les paramètres de la loi normal.

Pour un temps  $t > 0$ ,

- la fonction de densité de probabilité est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi\Delta t}} e^{-\frac{(x-m\Delta t)^2}{2\sigma^2\Delta t}} \quad (IV.9)$$

- La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi\Delta t}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m\Delta t}{\sigma\sqrt{\Delta t}}\right)^2} dx \quad (IV.10)$$

La description du taux de réparation  $\mu$  en fonction du TTR est donnée par la figure (IV.1).

Pour notre cas, l'analyse de la dégradation de la pompe est basée essentiellement sur l'analyse de l'évolution du temps de réparation TTR cumulé qui est donné par la figure (IV.2), et par l'évolution des TTR.

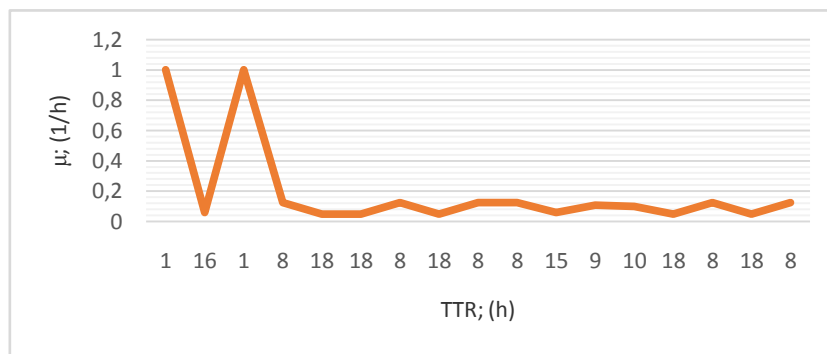


Fig. IV.1. Le taux de réparation

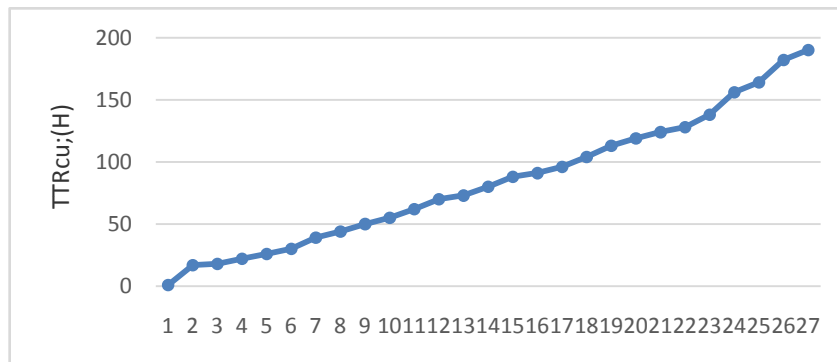


Fig. IV.2. Le temps de réparation cumulé

#### IV.3.1.1. Analyse statistique des valeurs de TTR

Une analyse statistique a été effectuée sur l'évolution du temps de réparation (TTR), et ce avec l'utilisation du logiciel statistique Easy fit 5.4.

D'après les figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6), l'analyse nous a permis de vérifier la distribution des TTR par rapport à la loi normale. Comme, nous avons mentionné que cette condition est exigée pour décrire un tel processus de dégradation Wiener.

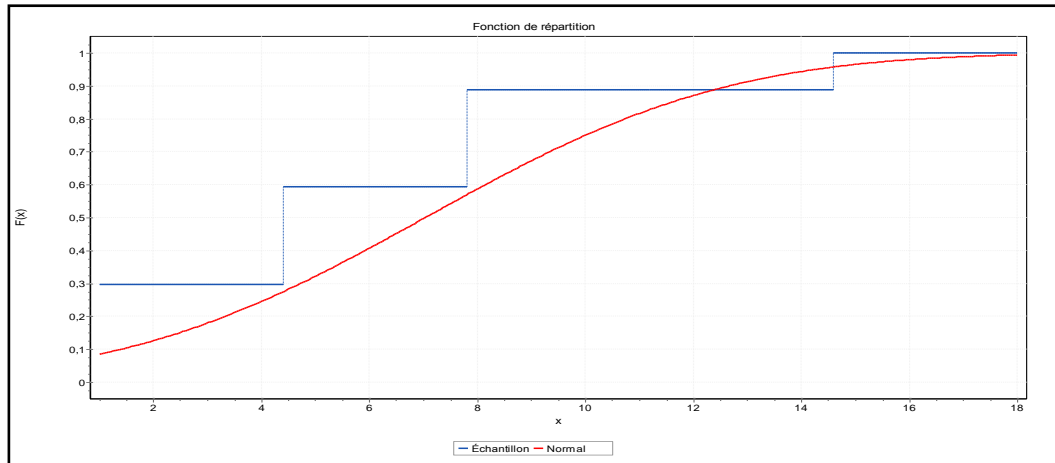


Fig. IV.3. Fonction de répartition

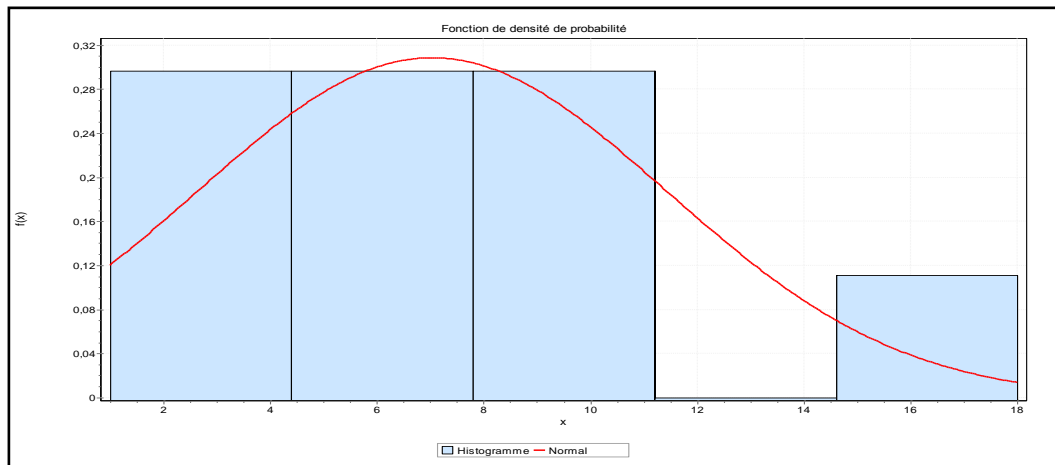


Fig. IV.4. Fonction de densité de probabilité

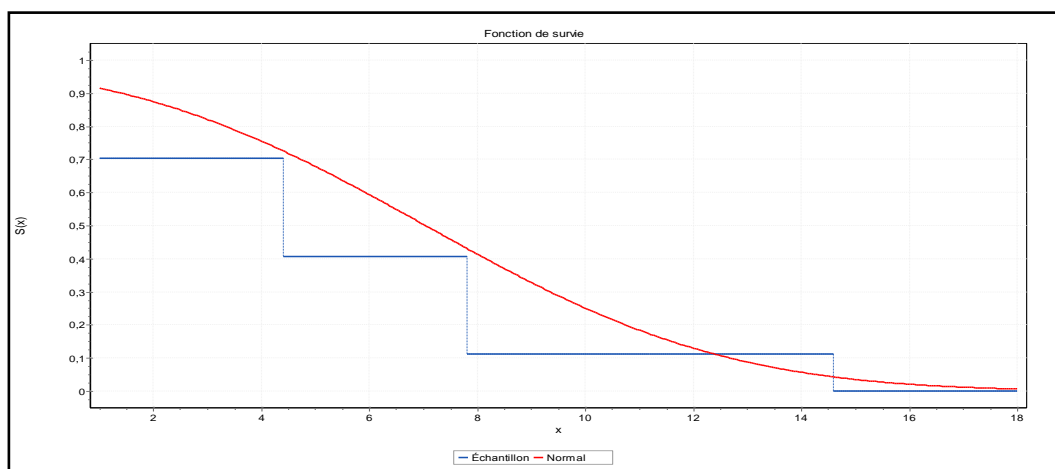


Fig. IV.5. Fonction de fiabilité

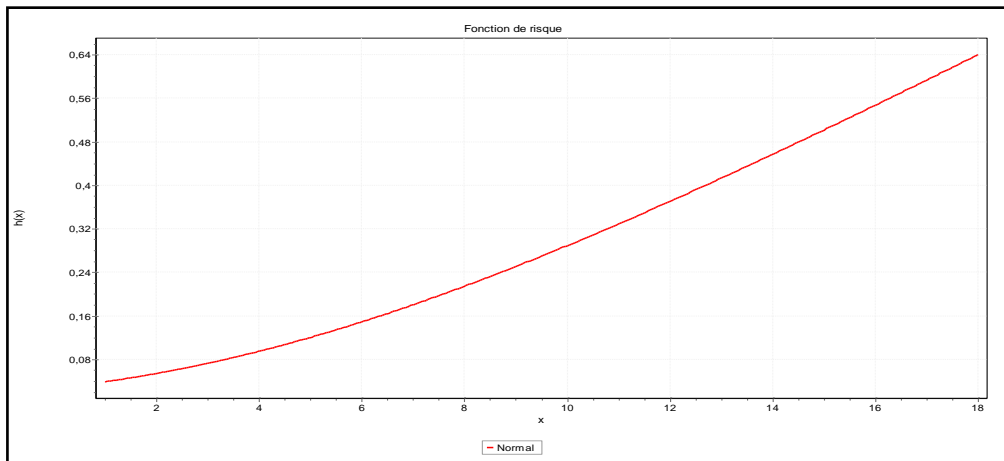


Fig. IV.6.Fonction de risque

#### IV.3.1.2. Vérification de l'ajustement de l'adéquation de distribution normale des valeurs de TTR :

D'un autre côté pour confirmer si la distribution des données (TTR) suit une loi normal ou non, on doit effectuer des tests d'ajustement. Un tel test de Kolmogorov Smirnov, qui fait la comparaison de la fonction de distribution uniforme avec la fonction de distribution de l'échantillon analysé. L'idée à travers ce test est de calculer la distance maximale entre les fonctions théoriques et empiriques. Si cette distance dépasse une certaine valeur, que l'on lira dans un tableau, on dira que l'échantillon est à rejeter.

Les résultats du test selon Kolmogorov Smirnov sont donnés par le tableau (IV.2).

Tableau IV.2. Résultats du test statistique pour la loi Normal

Test de Kolmogorov-Smirnov, loi Normal ( $\delta= 4.3,$ $m=7$ )	Valeurs
Taille de l'échantillon	27
statistiques	0,19113
Valeur de P	0,24438
$\alpha$ (risque)	0.05
Valeur critique	0,25438

#### IV.3.1.3. Modélisation du temps de réparation (TTR) par le processus de dégradation Wiener

Faisant suite à l'analyse statistique des TTR, dont nous avons confirmé que la distribution suit une loi normale  $N(4.3, 7)$ . Le modèle de Wiener approprié à l'évolution des TTR est donné par l'équation (IV.11) :

$$W(t + \Delta t) - W(t) = 4,3xN(0, \Delta t) + 7x\Delta t \quad (IV.11)$$

Selon l'équation (IV.11), les valeurs modélisées sont présentés par la figure suivante :

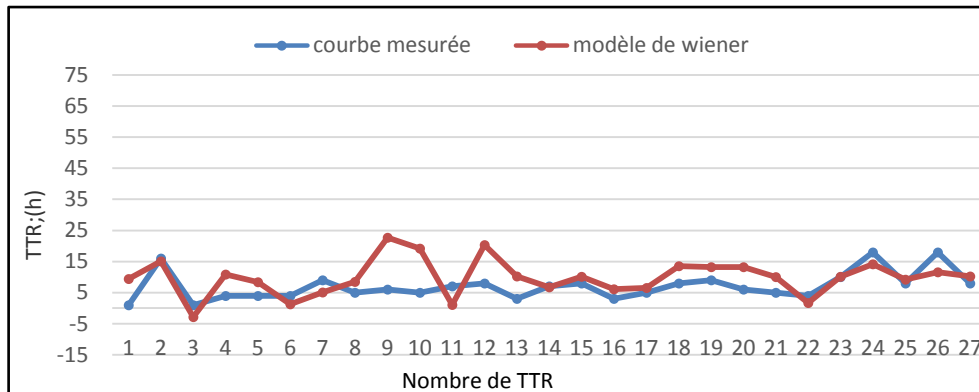


Fig. IV.7. Temps de réparation TTR calculé et modélisé pour une loi normale  $N(4.3, 7)$

Ainsi, les valeurs de TTR cumulées, d'après le modèle Wiener proposé doivent être comparées avec les valeurs calculées analytiquement, cette correspondance est décrite par la figure (IV.8).

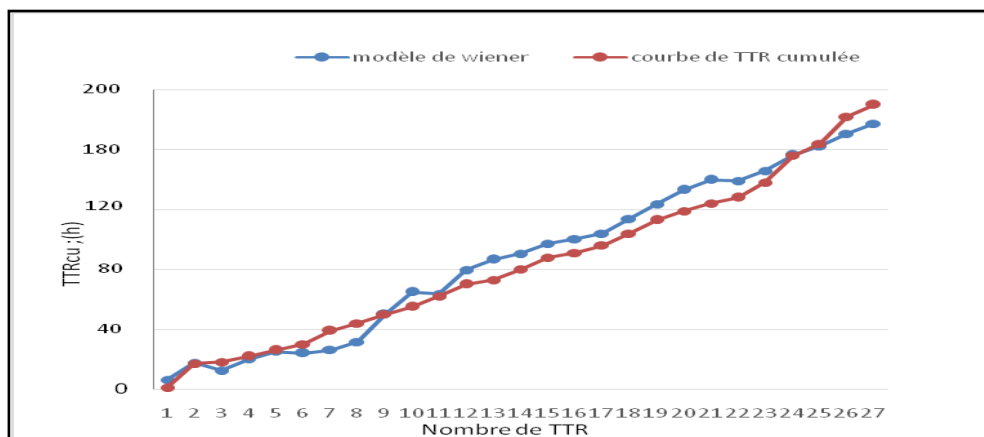


Fig. IV.8. Représentation du temps cumulé de réparation calculé et avec le modèle Wiener pour une loi normale  $N(55,50)$

### IV.3.2. Détermination des caractéristiques de fiabilité

#### IV.3.2.1. Calcul du taux de défaillance $\lambda$ :

D'après l'historique du groupe moto-pompe, et Pour calculer le taux de défaillance  $\lambda$ , on doit d'abord calculer la MTBF. Dans notre cas la somme des TBF est 29304 heures et N est égal à 27. Alors on peut calculer  $\lambda$ .

#### IV.3.2.2. Calcul du taux de réparation $\mu$ :

Pour calculer le taux de réparation  $\mu$ , on doit d'abord calculer la MTTR. Dans notre cas la somme des TTR est 172 heures et N est égal à 27. Alors on peut calculer  $\mu$ .

### IV.3.3. Chaîne de Markov du système étudié

Cette méthode résulte d'une théorie mathématique dans les grandes lignes seront présentées. On dispose d'un ensemble d'états de composants qui, combinés, permettent de définir l'ensemble des états du système. Cet ensemble est divisé en deux sous ensembles:

- état de fonctionnement,
- état de panne.

Le système moto-pompe est modélisé comme deux sous-systèmes montés en série (dispositifs d'étanchéité-niveau et soupape de sécurité). La panne de l'un des deux sous-systèmes provoque l'arrêt ou une indisponibilité du système.

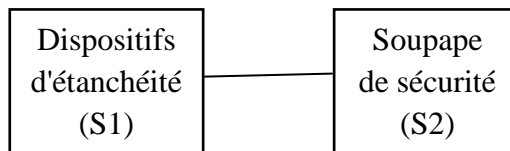


Fig. IV.9. Les deux sous système étudiés

Sachant que le taux de défaillance constant, la loi exponentielle pour la modélisation de la probabilité de défaillance de la pompe alimentaire est imposée. Les différents états du système doivent être définis préalablement. Dans le cas de  $n$  composants « binaires », on obtient un nombre maximal de  $2^n$  états [90]. Ensuite, il faut recenser toutes les « transitions » possibles entre les différents états du système en identifiant leurs causes. Dans notre cas  $n=2$  donc le nombre des états  $2^2=4$ .

- Etat 0: les sous-systèmes ; S1, S2 fonctionnent.
- Etat 1: les sous-systèmes ; S1 est en panne, S2 fonctionne.
- Etat 2: les sous-systèmes S2 est en panne, S1 fonctionne.
- Etat 3: les sous-systèmes S1, S2 est en panne.

La chaîne de Markov associée à ce système est donnée dans la figure (IV.10).

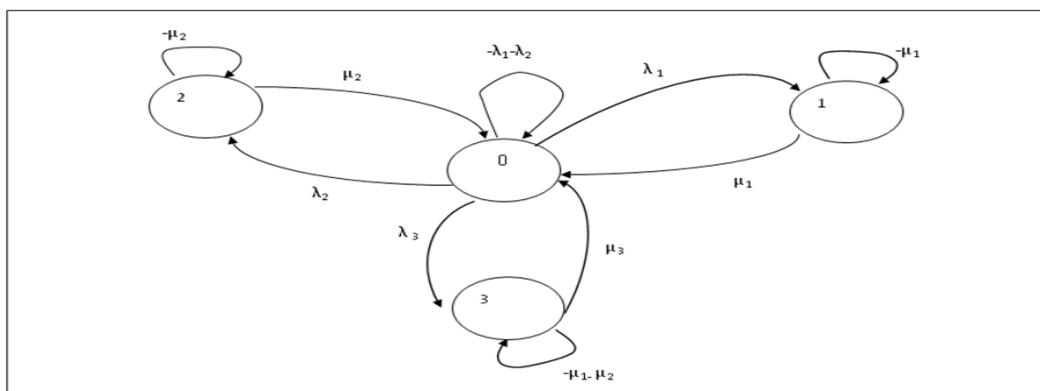


Fig. IV.10. Chaîne de Markov du système étudié

L'équation d'états associés au modèle graphique donné par la figure (IV.10) est la suivante:

$$\left. \begin{aligned} P'_0(t) &= -2(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1P_1(t) + \mu_2P_2(t) + (\mu_1 + \mu_2)P_3(t) \\ P'_1(t) &= \lambda_1P_0(t) - \mu_1P_1(t) \\ P'_2(t) &= \lambda_2P_0(t) - \mu_2P_2(t) \\ P'_3(t) &= (\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) - (\mu_1 + \mu_2)P_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (IV.12)$$

Dans le cadre d'étude de la disponibilité du système, on est amené à résoudre ces équations différentielles et à utiliser la transformée de Laplace. La technique est de passer d'un espace temporel à l'espace de Laplace, où les équations sont plus aisées à résoudre, on obtient alors :

$$D(s) = P_0 \cdot (si - M)^{-1} \cdot i_e \quad (IV.13)$$

Sachant que:

$P_0$ : vecteur de condition initial

$$P_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)$$

s: Variable de Laplace

$$i: \text{Matrice d'identité, avec: } i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$i_e$ : Vecteur de sommation

la Matrice de transition M combiné le graphe est:

$$M = \begin{bmatrix} -4\lambda & \lambda & \lambda & 2\lambda \\ \mu & -\mu & 0 & 0 \\ \mu & 0 & -\mu & 0 \\ 2\mu & 0 & 0 & -2\mu \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

La solution est basée directement sur la transformée de Laplace, donc l'équation (IV .13) devient:

$$D(s) = P_0 \cdot \begin{bmatrix} s + 4\lambda & -\lambda & -\lambda & -2\lambda \\ -\mu & s + \mu & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & s + \mu & 0 \\ -2\mu & 0 & 0 & s + 2\mu \end{bmatrix}^{-1} \cdot i_e \quad (IV.15)$$

D'où le modèle de la disponibilité du système est donné par l'équation suivante:

$$D(s) = \frac{s^2 + 3\mu s + 2\mu^2}{s^3 + (4\lambda + 3\mu)s^2 + (6\lambda\mu + 2\mu^2)s} \quad (IV.16)$$

En revenant à l'espace temps "t"

$$D(t) = \frac{\vartheta}{3\lambda + \vartheta} + \frac{6\lambda}{2(3\lambda + \vartheta)} \times e^{-\left(2\lambda + \frac{3\vartheta}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(16\lambda^2 + \vartheta^2)}\right)t} \quad (\text{IV.17})$$

D'après les équations (I.7), (IV.2), (IV.7), (IV.17), on a tous les paramètres nécessaires pour tracer les figures (IV.11, IV.12, IV.13)

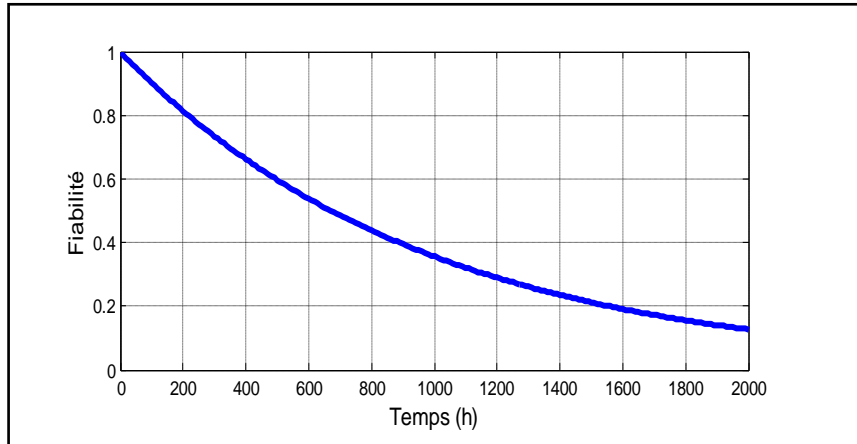


Fig. IV.11. La Fiabilité du système

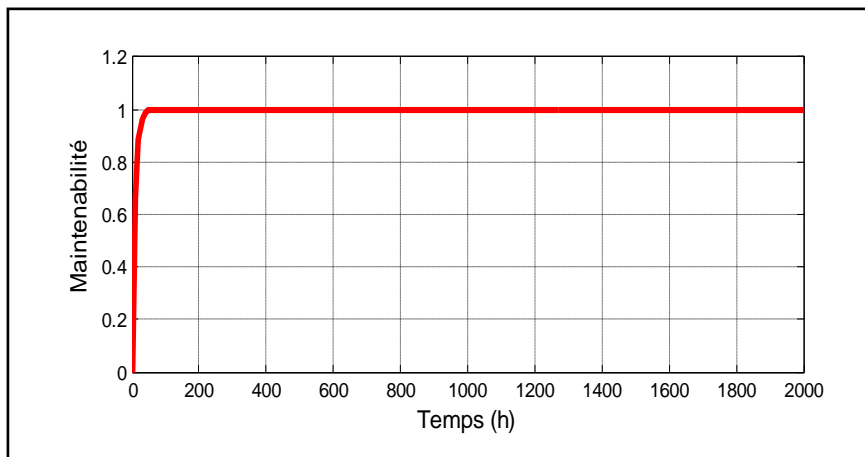


Fig. IV.12. La Maintenabilité du système

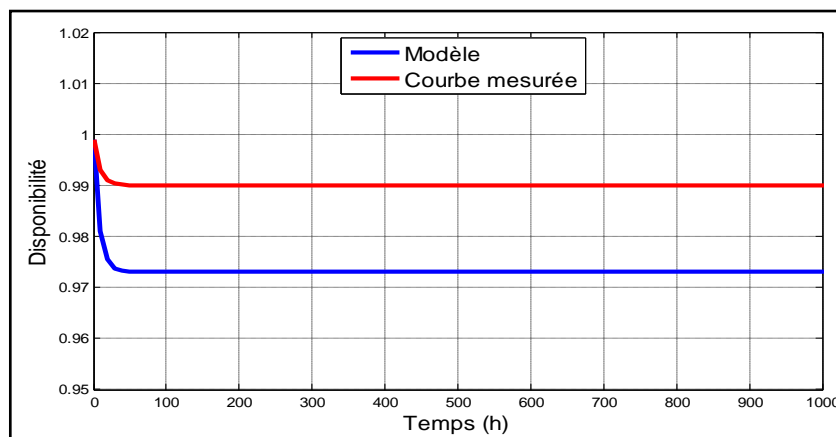


Fig. IV.13. La Disponibilité du système

#### IV.3.4. Interprétation des résultats

Les figures (IV.3) et (IV.4) montrent respectivement la fonction de distribution et celle de densité des temps de réparation (TTR), elles confirment que l'échantillon des TTR suit une loi normale  $N(m, \sigma)$ , dont les paramètres sont : la moyenne  $m = 7$  et l'écart type  $\sigma = 4,3$ .

Les différents temps de réparation du système motopompe sont donnés par la figure (IV.7), ils sont des valeurs aléatoires. En effet, le temps de réparation cumulé a été calculé et par la suite modélisé.

La figure (IV.8) montre clairement que le modèle Wiener suggéré apporte une bonne estimation de la probabilité des arrêts du système de production étudié, et que l'évolution du temps de réparation TTR cumulé selon le modèle proposé suit la même allure que celui calculé par la méthode analytique. En plus et d'après la valeur du coefficient de corrélation ( $R = 0.987$ ), les valeurs des TTR calculées et modélisées sont bien corrélées, ce qui confirme la robustesse du modèle Wiener proposé pour décrire une telle situation de dégradation d'un équipement réparable.

D'autre part, d'après la figure (IV.11), qui représente la fonction de la fiabilité du système, on voit clairement que pour un temps moyen de fonctionnement ( $MTBF = 976.8$  h) la fiabilité est de l'ordre 37 %. Cette valeur est jugée faible, elle n'a aucune interprétation sauf que le nombre des pannes est important, il est due au non-respect ou même l'absence d'un programme de maintenance approprié et régulier.

La maintenabilité de la motopompe est représentée par la figure (IV.12), on voit clairement que la maintenabilité augmentent brusquement et atteint des valeurs importantes dans un temps très court, la seule interprétation c'est que l'équipement rencontre des problèmes techniques nécessitant des arrêts programmés pour les prendre en charge.

Tandis que la figure (IV.13) représente la disponibilité du système, d'après l'étude comparative entre les valeurs calculées analytiquement à la base des MTBF, et celles basées sur le modèle de Markov proposé, on voit clairement que les valeurs de la disponibilité calculées et modélisées sont bien corrélées. En conséquence, le coefficient de corrélation est de l'ordre ( $R = 0.996$ ) cette valeur confirme que le modèle markovien proposé est très puissant, et va servir pour la prédiction de l'état future de la motopompe, dont en prévoyant le temps nécessaire pour améliorer le programme d'une action de maintenance préventive.

#### **IV.4. Conclusion**

La maintenance prédictive, joue un rôle très important pour le suivi et l'évolution de la dégradation de l'état de fonctionnement d'un équipement de production dont le but est de prévoir les arrêts. L'analyse du temps des arrêts de réparation (TTR) d'une motopompe durant une période déterminée  $t$  permet systématiquement de faire une évaluation de son état réel, et ce pour calculer sa probabilité d'arrêt courant sa durée de fonctionnement.

Le comportement des équipements réparables, en cas de défaut, va aider à identifier et même évaluer la gravité d'une anomalie. Notre étude montre que la modélisation stochastique est considérée comme un outil mathématique important, capable de fournir une bonne prédiction des éventuelles pannes, et ce à travers l'analyse d'un historique, ou un retour d'expérience fiable.

Dans notre cas, d'une part, nous avons considéré un échantillon de temps des arrêts (TTR) calculés par la méthode analytique classique, ce qui nous a permis de proposer un modèle stochastique d'estimation adéquat, à savoir le modèle de Wiener, dans un objectif de prédire des éventuels arrêts.

D'autre part, un deuxième modèle a été proposé, il s'agit d'une approche Markovienne dynamique, dans un objectif d'effectuer une comparaison avec le calcul analytique en termes d'évaluation des différents indicateurs de la sûreté de fonctionnement d'un tel système, notamment la disponibilité instantanée. Les différents états des composants constitutifs du système, ainsi que les fonctions de transition entre ces états ont été aussi caractérisés. Dont, on voit que les modèles suggérés peuvent également contribuer à la planification d'une maintenance prédictive afin d'éviter des imprévus, dans un objectif d'améliorer la fiabilité d'un tel équipement et sa disponibilité en conséquence.

## *Conclusion générale et perspectives*

### **Conclusion générale et perspectives:**

Les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes et la maintenance associée de plus en plus coûteuse. La maintenance prédictive, consiste à utiliser des modèles pour la prédiction de la fiabilité des composants d'un tel système, dans le but d'augmenter sa disponibilité grâce à la réalisation des interventions anticipées, afin de diminuer le temps de maintenance.

L'ajustement d'un processus Wiener à partir de données d'essais a permis de définir un modèle de fiabilité prévisionnelle, aussi fournir une bonne prédiction des pannes, et aider à la planification des opérations de la maintenance.

La modélisation Markovienne est souvent utilisée lorsqu'on fait appel à l'évaluation de la disponibilité des systèmes réparables, et ce en se basant sur le principe du changement de l'état d'un composant à un autre avec la caractérisation de la fonction de transition entre ces états.

Notre étude montre que la modélisation stochastique est considérée comme un outil mathématique important, capable de fournir une bonne prédiction des éventuelles pannes, pour cela notre recherche est basée sur les chaînes de Markov et les processus de Wiener.

Le premier chapitre, présente des généralités sur la sûreté de fonctionnement des systèmes mécaniques. Les différents indicateurs de la sûreté de fonctionnement, ainsi que les différents métriques ou durées caractérisant la sûreté de fonctionnement pour l'évaluation des performances d'un système industriel et mécanique en particulier.

Le deuxième chapitre est dédiée pour la description des méthodes d'analyse utilisées pour la modélisation des systèmes réparable, à savoir les processus stochastiques. Dans ce contexte les méthodes d'analyse fonctionnelles et dysfonctionnels, ainsi que celles de simulation ont été largement discutées, dans un but de les utiliser pour la modélisation des phénomènes aléatoires de dégradation des systèmes complexes. En plus, quelques modèles de dégradation à savoir : les modèles discrets (modèle de Poisson, les modèles Markoviens, ...), et les modèles continus (modèle de gamma, modèle de Wiener, ...).

Une analyse approfondie sur le dysfonctionnement des systèmes réparables a été présentée dans le troisième chapitre. L'étude a été concentrée sur une pompe centrifuge stratégique dans le processus d'une centrale de production de l'énergie électrique.

Le dernier chapitre présente, d'une part un modèle stochastique de Markov décrivant la variation de la disponibilité instantanée de la pompe centrifuge. D'autre part, un modèle du processus de Wiener afin de caractériser l'évolution du temps de réparation (TTR), et ce pour l'aide à la décision ainsi qu'au diagnostic des différents types de défauts, ainsi que les causes probables qui peuvent affecter ou même perturber le fonctionnement de la machine (pompe alimentaire). Les deux modèles sont jugés adéquats pour la prédiction des états futurs du système étudié, et par conséquent l'amélioration du programme de la maintenance.

La projection de ce travail dans l'avenir est résumée dans les principales perspectives et extensions envisagées, et qui sont les suivantes :

- La généralisation des modèles proposés pour la validation des indicateurs de dégradation d'autres machines industriels.
- La prise en compte d'autres lois de dégradation, telles que (Weibull, Gamma,...), et ce pour la proposition d'autres modèles mathématiques puissants et significatifs pour l'analyse fonctionnelle des machines tournantes.

## *Bibliographie*

- [1] Y.Mortureux. La sûreté de fonctionnement, Méthodes pour maîtriser les risques. Techniques de l'Ingénieur, AG4670, pp1–17,2001.
- [2] A.Gabriel Mihalache. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques. application sur système embarqué,Thèse de doctorat, École doctorale d'angers, 2007.
- [3] A.Demri. Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle. PhD thèses, Université d'Angers, 2009.
- [4] A.Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité, facteurs humains, informatisation, Eyrolles, Paris, 1988.
- [5] Y.Mortureux. La sûreté de fonctionnement. Méthodes pour maîtriser les risques, Techniques de l'ingénieur, octobre 2001.
- [6] R.Laronde. Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables. Application à un système photovoltaïque, Thèse de doctorat , A l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers, 2011.
- [7] R. Cigolini, A. Deshmukh, L. Fedele,S. Mccomb Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management ,Springer,2009.
- [8] A. Desroches. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Lavoisier, Tec&doc édition, mai 1995.
- [9] I.Mahdi. Analyse quantitative et qualitative de la sûreté de fonctionnement des convertisseurs statiques. Mémoire de magister, Université de Boumerdes, 2012.
- [10] J.Marie .Auberville – Ellipses.vol (05), 2004.
- [11] W.Owen et W.Padgett. Accelerated test models for system strength based on birnbaum-saunders distributions Lifetime Data Analysis. vol (05), pp 133-147, 1999.
- [12] R.Doyle. Mechanical reliability. In IEEE Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Tutorial notes, USA, 1991.
- [13] A. Villemeur. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. 1988.
- [14] I.Ayadi.Optimisation des politiques de maintenance préventive dans un cadre de modélisation par modèles graphiques probabilistes. Algorithme et structure de données Université Paris-Est, 2013.
- [15] P. Lyonnet. Ingénierie de la fiabilité. Lavoisier, 2006.
- [16] G. Zwingelstein. La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM, Hermes, Paris, 1996.

- [17] J.Morel, C.Sourisse, et C.Merlaude. La sûreté des machines et installations automatisées, Sadave-CITEF, Paris, 1992.
- [18] A.Pagès , et M.Gondran. Fiabilité des systèmes, Eyrolles, Paris, 1980.
- [19] C.Cocozza-Thivent. Processus stochastiques et fiabilité des systèmes. Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [20] A.Birolini. Quality and Reliability of Technical Systems. Springer, Berlin, 1997.
- [21] E.G.Frankel. Systems reliability and risk analysis. Kluwer Academic. Dordrecht, Netherlands, 1988.
- [22] J.M.Cloarec, Y.Mortureux, P. R.Leclercq. Guide : démarche et méthodes de sûreté de fonctionnement des logiciels. Institut de Sûreté de Fonctionnement(ISdF),le groupe de travail M2OS, 2014.
- [23] R.Schoenig, J-F.Aubry,T.Cambois, et T.Hutinet. An aggregation method of markov graphs for the reliability analysis of hybrid systems. Reliability Engineering & System Safety, vol 91(2),pp 137–148, 2006.
- [24] J-L.Bon. Fiabilité des systèmes .Méthodes mathématiques, Masson, Paris,1995.
- [25] A.Tchangani, D.Noyes. Attempt to model dynamic reliability using dynamic bayesian networks, Proc, QUALITA, 2005.
- [26] A.Carbabaye , R. Laulheret. Evaluation de la sureté de fonctionnement des systèmes dynamiques par modélisation récursive. Proc, QUALITA, 2005.
- [27] R. David et H,Alla. Du Grafcet aux réseaux de Pétri. Hermès, 1992.
- [28] O.Daniel. Les réseaux de pétri stochastiques pour l'évaluation des attributs de la sureté de fonctionnement des systèmes manufacturiers. PhD thesis, LAG Grenoble, 1995.
- [29] Y.Dutuit, E.Châtelet, J-P. Signoret et P.Thomas. Dependability modeling and evaluation by using stochastic Petri nets: Application to two test cases. Reliability Engineering & System Safety.vol (55), N<sup>o</sup>(2), pp 117-124, 1997.
- [30] C.Girault et R.Valk. Petri Nets for Systems Engineering. A guide to modeling verification and application, Springer, 2003.
- [31] M.Haoues, K.Mouss et L.Mouss.L'utilisation conjointe des réseaux de Pétri stochastiques et des processus de Markov pour l'évaluation des performances d'une ligne d'emboutissage. Proc, 5<sup>ème</sup> Conférence Internationale Conception et Production Intégrées, 2007.
- [32] A.Mihalache. Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué. PhD thesis, Université d'Angers, 2007.

- [33] G.Vidal-Naquet et A.Choquet-Geniet. Réseaux de Pétri et systèmes parallèles. Armand Colin, 1992.
- [34] H.Louahem M'sabah. Modélisation du phénomène de dégradation des roulements par le processus Wiener et Gamma. Thèse de doctorat de l'Université de Skikda, 2016.
- [35] E.Veach. Robust Monte Carlo methods for light transport simulation. A dissertation submitted to the department of computer science and the committee on graduate studies of Stanford University, for the degree of doctor of philosophy. 1997.
- [36] A.Dubi. Monte Carlo Applications in systems engineering. John Wiley & Sons, Ltd, England, 2000.
- [37] E.Niel, E.Craye. Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production. Productique : information, commande, communication. Lavoisier, 2002.
- [38] R.Lesobre. Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 2015.
- [39] A.Zeghloul. Maintenance industrielle. Licence professionnelle Hydraulique et commandes associées, Université de Metz, 2004
- [40] N.TAMALOSSI, A. BOUZAOUIT. Etude de la Fiabilité d'un Système réparable par l'utilisation des chaînes de Markov. La 3<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle Skikda , Novembre 2015.
- [41] E. Deloux. Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant, 2008.
- [42] R.M.Feldman. Optimal Replacement with Semi-Markov Shock Models Using Discounted Costs. Mathematics of Operations Research, vol (2), pp 78–90, 1977.
- [43] B.Castanier. Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle, 2001.
- [44] I.Ayadi. Optimisation des politiques de maintenance préventive dans un cadre de modélisation par modèles graphiques probabilistes. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2013.
- [45] L.Banega. Processus Stochastique. Processus de Poisson et Chaînes de Markov, banega@recherche.enac.fr, Septembre 2004.
- [46] S.Deniaud , N.Zerhouni, A.El Moudni, and F.Morel. Sur une modélisation de maintenance préventive à l'Alstom. International Journal of Mechanical production systems Engineering, 1999.

- [47] P.Vrignat. Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2010.
- [48] A.Bouzaouit, O.Bennis, M.GAHGAH. Modélisation de l'évolution dynamique du changement d'état des roulements. *Journal Recent*, ISSN 1582-0246, vol(13), N° (3), pp 254-258, 2012.
- [49] R.Durrett. *Essentials of Stochastic Processes*. Springer Texts in Statistics, Springer-Verlag, New York, 1999.
- [50] G.Chan, and S.Asgarpoor. Optimum maintenance policy with Markov processes. *Electric Power Systems Research*, vol(76), pp 452-456, 2006.
- [51] S.V.Amari, L.Maughlin, and H.Pham. Cost-effective condition-based maintenance using Markov decision processes. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, RAMS'06*, pp 464-469, IEEE, 2006.
- [52] I.W.Soro, M.Nourelfath, and D.Ait-Kadi. Performance evaluation of multistate degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, vol(95), pp 65-69, 2010.
- [53] S.W.Haider, K.Chatti, and G.Y.Baladi. Long-term pavement performance effectiveness of preventive maintenance treatments using Markov Chain algorithm, *Engineering Journal*, vol(16), pp149-158, 2012.
- [54] M.L.Yin, J.E.Angus, and K.S.Trivedi. Optimal preventive maintenance rate for best availability with hypo-exponential failure distribution. *IEEE Transactions on Reliability*, vol(62), pp351-361, 2013.
- [55] C. Zhong, and , H.Jin. A novel optimal preventive maintenance policy for a cold standby system based on Semi-Markov theory. *European Journal of Operational Research*, vol(232), pp405-411, 2014.
- [56] J.P.Kharoufeh. Explicit results for wear processes in a Markovian environment. *Operations Research Letters*, vol (31), pp237-244, 2003.
- [57] J.P.Kharoufeh, S.M.Cox. Stochastic models for degradation-based reliability. *IEEE Transactions*, vol(37), pp533-542, 2005.
- [58] A.Soeren. *Applied Probability and Queues (Stochastic Modelling and Applied Probability)*. Springer, 2<sup>nd</sup> édition, Mai 2003.
- [59] A.Mohamed. A Gamma Wear Process. *IEEE, Transactions on Reliability*, vol (24), N°(2), pp152–153, Juin 1975.

- [60] K.Bouvard, S.Artus, C.Bérengruer et V.Cocquempot. Conditionbased dynamic maintenance operations planning & grouping, Application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety*, vol (96), N° (6), pp 601– 610, 2011.
- [61] V.Northwick, J.Van der Weide, J. Kallen, M. Pandey. Gamma processes and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, vol(92) , pp 1651-1658, 2007.
- [62] J. Lawless and M. Crowder. Covariates and Random Effect in a Gamma Process Model with Application to Degradation and Failure. *Lifetime Data Analysis*, vol(10), pp213–227, 2004.
- [63] J.Baussaron, M.Barreau, L.Gerville-Reache, F.Guerin, P.Schimmerling. Estimation de la fiabilité à partir de mesures de dégradation : quelles méthodes utiliser. 17<sup>ème</sup> Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, La Rochelle, 2010.
- [64] V.Noortwijk. A survey of the supplication of Gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol94 (1), pp2-21, 2009.
- [65] G.A.Whitmore, M.J.Crowder, J.F.Lawless. Failure inference from a marker process based on a bivariate Wiener model. *Lifetime data analysis*, vol (4), N° (3), pp 229–251, 1998.
- [66] C.Martin et L.Jerald. On a scheme for predictive maintenance. *European Journal of Operational Research*, vol(176), N° (3), pp 1713–1722, Février 2007.
- [67] E.Platen, and D.Heath. A benchmark approach to quantitative finance. Springer Finance, Berlin, 2<sup>ème</sup> editions, 2010.
- [68] G.A.Whitmore.Estimating degradation by Wiener diffusion. Process subject to measurements error, *Lifetime Data Analysis*, Vol(1), pp307-319, Kluver Academic Publishers, 1995.
- [69] C.Parkand, W,Padgett. New cumulative damage models for failure using. Stochastic processes as initial damage, *IEEE Transactions on Reliability*, vol (54), pp530-540, 2005.
- [70] Y.Wang, Y.Zhi-Sheng, and T.Kwok-Leung. Stochastic evaluation of magnetic head wears in hard disk drives. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol (50), pp1-7, 2014.
- [71] K.A.Doksum, A.Hoyland. Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the Inverse Gaussian distribution. *Technometrics*, vol(34), pp74, 1992.
- [72] P.A.Samuelson.Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. *Industrial Management Revue*, vol (6), pp41-50, 1965.

- [73] R.C.Merton.Theory of rational option pricing. The Bell Journal of Economics and Management Science, Vol 4(1) ,pp141, 1973.
- [74] F.Black, and M.Scholes. The pricing of options and corporate liabilities. Journal of Political Economy, vol 81,pp637-654, 1973.
- [75] H.Ghamlouch. Modélisation de la dégradation, maintenance conditionnelle et pronostic : usage des processus de diffusion. Thèse de Doctorat, Université de technologie de Troyes,2016
- [76] N.Tamaloussi. Etude de régime rationnel de fonctionnement de motopompe centrifuge. Mémoire de Magister, Université 20 Aout 1955 Skikda, 2012.
- [77] M.Pluviose.C Perilhon .Turbomachines. Description, principes de fonctionnement. 1996.
- [78] D.Bougeard. Energétique des machines. 3ème année, Ecole d'Ingénieurs Centre de Recherche, Département Energétique Industrielle, 2005.
- [79] M.ASUAJE. Méthodologie et optimisation dans la conception et l'analyse des performances des turbomachines a fluide incompressible. Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arte et métiers, Paris, 2003.
- [80] J.PIERRE .Les Pompes Rotodynamiques. 2006.
- [81] M.TAIBI. Machines Hydrauliques. OPU ALGER. 1993
- [82] T.HACHEMI .Pompes et Compresseurs. INHC 2000.
- [83] I.Grant. Basic concepts in turbomachine .2009.
- [84] F.Milsant. Cours d'électrotechnique. 1992.
- [85] Pascal. Modeling malfunctions of a system under maintenance activities, research master's report, 2007.
- [86] P.Claire. ENSEEIHT, Dependability. 3rd TR - SE option, December, 2012.
- [87] A.Bouzaouit, E.Hadjadj Aouel, O.BENNIS. Stochastic modeling for the follow-up the bearing degradation.U.P.B ,Sci, Bull., ISSN 1454-2358, Series D, vol (79),Iss (1), pp 209-218, 2017.
- [88] H.Xing, X.Xiaojiao , T.Wei , L.Yuebing , J.Weiya and Z.Mingjue. Markov stochastic process modeling for evolution of wear depth in steam generator tubes. Advances in Mechanical Engineering, vol (11), pp1–9, 2019.
- [89] <https://www.clicours.com/cours-maintenance-connaissance-des-equipements-et-de-leurs-comportements/>.
- [90] N.Benchouia. La fiabilité des systèmes de pile a combustible pemfc. Thèse de doctorat, 2014.

# *Annexe*

- **Des définitions**

**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 moyenne 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 moyenne par millions d'heures ainsi que des intervalles de confiance, 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 différentes : une estimation des taux de défaillance, nombre de pannes observées, type de pièce, mode d'utilisation, etc

- **Programmation du processus Wiener [35]**

```

Clear all
%-----
% initialisation des paramètres
a=1 ; % Nombre de trajectoires de référence
b=1000 ; % Nombre de trajectoires
n=a+b; % Nombre total de trajectoires tracées
m=5; % Nombre de points par trajectoires
p=5; % Nombre de points pour les courbes théoriques
c=m-1 ; % Nombre de colonnes de la matrice contenant les accroissements de dégradation
l=b ; % Nombre de lignes de la matrice contenant les accroissements de dégradation
Tmax=100 ; % Temps de la simulation
delta T=Tmax/(m-1); % intervalle de temps entre deux points
mu=7; % Moyenne
sigma=4.3; % Ecart-type
X0 = 2.12 ; % valeur initiale de la dégradation
Z0 =7.72 ; % dégradation maximale acceptable
Nclass=floor(1+(10/3))*log(b)) ; % Nombre de classes pour la répartition des défaillances
%-----
% Matrice de temps
temps=zeros(m,1);
for i=1:m % Calcul de la position temporelle de chaque point
temp(i)=(i-1)*deltaT ;
end
temps_th= zeros(p,1);
for i=1:p % Calcul de la position temporelle de chaque point
temps_th(i)= (i-1)*Tmax/(p-1);
end
%-----
% Génération des trajectoires
y= zeros(n,m);
for i=1:m
y(1,i)= mu*temps(i); % Calcul de la dégradation moyenne
y(2,i)= Z0; % Calcul de la dégradation maximale autorisé
end
for j=3:n; % pour chaque autre trajectoire, la valeur initiale de la dégradation vaut X0
y(j,1)=X0 ;
end
for j=3:n; % On génère chaque trajectoire suivant un processus de Wiener
for i=2:m
y(j,i)=y(j,i-1)+normrnd(deltaT*mu,(deltaT^4.3)*sigma);
end
end

```

```
%-----  
% Tracé de l'ensemble des trajectoires  
figure(1)  
plot (temps, y)  
title('Ensemble des Trajectoires')  
ylabel('Niveau de la Dégradation')  
xlabel('Temps')  
grid on
```

**Publication et communication relative a ce travail :**

- N.TAMALOUSSI, A.BOUZAOUIT. Etude de la Fiabilité d'un Système réparable par l'utilisation des chaines de Markov. La 3<sup>eme</sup> Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle Skikda .Novembre 2015.
- Naima TAMALOUSSI, Azzedine BOUZAOUIT. Stochastic modeling of time evolution of a motorcycle pump repair. Acta technica napocensis. Vol. 62, Issue IV, November, 2019.
- Naima TAMALOUSSI, Azzedine BOUZAOUIT, Sihem LAHMAR. La maintenance conditionnelle pour le suivi des defauts de roulement. Séminaire national sur l'électromécanique Annaba 14-15 Mai.2014.
- NaimaTAMALOUSSI,SihemLAHMAR,LakhdarKHOCHEMANE. Optimisation du rendement d'une machine hydraulique par la variation de la vitesse de rotation du moteur. La 3<sup>eme</sup> Conférence Internationale sur les Technologies Mécaniques avancées, Tlemsen .Novembre 2015.