

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université du 20 Août 1955 Skikda

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique



N° d'ordre : D012122006D

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité: Electromécanique

THEME

Etude et analyse des défauts des machines hydrauliques

**Cas : «Paliers d'un compresseur centrifuge par l'utilisation des processus
Gamma et Levy »**

Présenté par :

Par : **BOULEGHLEM Souhila**

Soutenue publiquement le : 15/06/2022

Devant le Jury composé par :

Président :	Abderrezek METATLLA	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur :	Azzedine BOUZAOUIT	Professeur	Université de Skikda
Examineurs:	Abdelouahab BENRETEM	Professeur	Université d'Annaba
	Toufik SEBEGH	MCA	Université de Skikda
	Zoubir ZAHZOUH	MCA	Université de Souk ahras
	Nacereddine MOUHAME D KHERIEF	MCA	ENSET Skikda

Remerciements

Avant toute chose, je remercie dieu qu'il a donné le tout puissant, la force, la volonté et le courage pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de la thèse Monsieur Azzedine BOUZAOUIT Professeur au département génie mécanique de l'université du 20 Août 1955 Skikda, Pour avoir assuré la direction de mes travaux et pour la qualité de son encadrement, ainsi que son soutien scientifique durant toute la durée de thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur MOKHBI Nassir, responsable à la raffinerie de Skikda, pour avoir assuré la documentation, pour ses conseils et son aide à accomplir le travail dans des conditions convenables.

Je tiens à exprimer mes remerciements au président de jurys ; Monsieur Abderrezek METATLLA Professeur, à l'université du 20 Août 1955 Skikda; ainsi que les jurys de soutenance professeur BENRETEM Abdelouahab, docteur SEBAGH Toufik, docteur MOUHAMED KHERIEF nacereddine, docteur ZAHZOUH zoubir, qui me fait l'honneur de participer à ma soutenance.

Je tiens à remercier du fond du cœur ma mère, mon mari Fayçal Benslama qui me supportent toujours; merci à mes chers enfants Assil, Isslam, yahya et Younes.

Je souhaite également exprimer mes remerciements aux collègues et aux amis pour leurs encouragements et soutien. Merci à tous !

Résumé

La modélisation des phénomènes de dégradation aléatoires des systèmes industriels est un outil mathématique et analytique nécessaire pour la sûreté de fonctionnement des équipements. Pour cela, l'importance de cette modélisation est confirmée à travers les différentes applications industrielles. L'analyse des phénomènes de dégradation et de leurs dynamiques permettent en conséquence l'amélioration de la fiabilité des systèmes. Particulièrement, dans le cas d'un système ou l'état de détérioration n'est pas directement observable, c'est-à-dire, lorsque ce dernier est soumis à des phénomènes de dégradation mesurables tels qu'usure, vibration, échauffement.

Dans cette étude, nous avons adopté une approche basée sur les processus stochastiques qui représentent une structure mathématique pour la modélisation, principalement les modèles de dégradation continue, à savoir le processus Gamma et celui de Lévy. Les grandeurs physiques concernées par cette étude sont l'amplitude vibratoire et la température de service de palier d'un compresseur centrifuge.

Les deux échantillons constituant la température de service, ainsi que l'amplitude vibratoire enregistrée sur le palier du compresseur sont testés par un outil statistique (logiciel Easy-fit 5.4). L'idée globale à travers ce test, est de comparer la distribution des données collectées (mesures effectuées) par rapport à des fonctions de répartition théorique.

Une simulation de l'évolution des grandeurs étudiées (amplitude vibratoire et la température) a été proposée. Pour l'évolution de la vibration, la simulation confirme que cette dernière suit un phénomène de dégradation selon un processus Gamma. Tandis que, la variation de température de service du palier est décrite par un processus Lévy.

Mots clés : *Paliers lisses, phénomènes stochastiques, processus de Levy, processus Gamma, simulation.*

Abstract

The modeling of random degradation phenomena of industrial systems is a mathematical and analytical tool necessary for the operational safety of equipment. For this, the importance of this modeling is confirmed through the various industrial applications. The analysis of degradation phenomena and their dynamics consequently makes it possible to improve the reliability of the systems. Particularly, in the case of a system where the state of deterioration is not directly observable, that is to say, when the latter is subject to measurable degradation phenomena such as wear, vibration, heating.

In this study, we adopted an approach based on stochastic processes which represent a mathematical structure for modeling, mainly continuous degradation models, namely the Gamma process and the Levy process. The physical quantities concerned by this study are the vibration amplitude and the service temperature the bearing of a centrifugal compressor.

The two samples constituting the operating temperature, as well as the vibration amplitude recorded on the bearing of the compressor are tested by a statistical tool (Easy-fit 5.4 software). The overall idea through this test is to compare the distribution of the collected data (measurements made) with theoretical distribution functions.

A simulation of the evolution of the quantities studied (vibration amplitude and temperature) has been proposed. For the evolution of the vibration, the simulation confirms that the latter follows a phenomenon of degradation according to a Gamma process. While, the service temperature variation of the bearing is described by a Levy process.

Keywords: *Plain bearings, stochastic phenomena, Levy process, Gamma process, Simulation.*

الملخص

تعد نمذجة ظواهر التدهور العشوائي للأنظمة الصناعية أداة رياضية وتحليلية ضرورية للسلامة التشغيلية للمعدات. لهذا ، يتم تأكيد أهمية هذه النمذجة من خلال التطبيقات الصناعية المختلفة. وبالتالي ، فإن تحليل ظواهر التدهور ودينامياتها يجعل من الممكن تحسين موثوقية الأنظمة. على وجه الخصوص ، في حالة النظام حيث لا يمكن ملاحظة حالة التدهور بشكل مباشر ، أي عندما يخضع الأخير لظواهر تدهور قابلة للقياس مثل التآكل والاهتزاز وارتفاع درجة الحرارة.

في هذه الدراسة ، اعتمدنا نهجًا قائمًا على العمليات الستوكاستيكية التي تمثل بنية رياضية للنمذجة ، خاصة نماذج التدهور المستمر ، وهي عملية جاما وعملية الكميات الفيزيائية المعنية بهذه الدراسة هي سعة الاهتزاز ودرجة حرارة خدمة حامل ضاغط الطرد المركزي.

يتم اختبار القياسات التي تشكل عينة درجات الحرارة والاهتزازات المسجلة على الحامل،

باستخدام برنامج إحصائي Easy-fit 5.4.

الفكرة العامة خلال لهذا الاختبار هي مقارنة دالة توزيع البيانات المجمعة (القياسات التي تم إجراؤها) مع دالة التوزيع النظري.

تم اقتراح محاكاة لتطور الكميات المدروسة (سعة الاهتزاز ودرجة الحرارة) بالنسبة لتطور الاهتزاز ، تؤكد المحاكاة أن الأخير يتبع ظاهرة تدهور وفقًا لعملية جاما. في حين يتم وصف التغير في درجة حرارة خدمة المحمل بواسطة عملية ليفي.

الكلمات المفتاحية: محامل منزلق ، ظاهرة ستوكاستيكية ، عملية ليفي ، عملية جاما ، المحاكاة.

Table de matières

Remerciements	
Résumé	
Table de matières	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Etat de l’art.....	4
 <i>Chapitre I : La théorie des compresseurs</i>	
I.1. Introduction.....	6
I.2. Rôle des compresseurs.....	6
I. 3. Classification des compresseurs.....	7
I.3. 1. Les compresseurs volumétriques.....	7
I.3. 1.1. Les compresseurs alternatif.....	8
a) Les compresseurs à pistons.....	8
b) Les compresseurs à membrane.....	8
I.3. 1.2. Les compresseurs rotatifs.....	10
a) Les compresseurs à vis.....	10
b) Les compresseurs à lobes.....	10
c) compresseur spiro-orbital.....	11
d) Compresseur à palettes.....	12
I.3. 2. Les compresseurs dynamiques.....	13
a) Les compresseurs axiaux.....	13
b) Les compresseurs centrifuges.....	14
b.1) Description générale d’un compresseur Centrifuge.....	15
b.2) Principe de fonctionnement d’un compresseur centrifuge	16
b.3) Paramètres et grandeurs physiques des compresseurs centrifuges.....	19
b.4) Les performances d’un compresseur centrifuge.....	22
b.5) Les instabilités aérodynamiques dans un compresseur centrifuge.....	23
➤ Le phénomène de pompage d’un compresseur centrifuge.....	23
➤ Le phénomène de décrochage tournant.....	25
➤ Limites de pompage et de contrôle.....	25

➤ Conséquences du phénomène de pompage sur compresseur.....	26
I.4. Domaine d'utilisation des compresseurs.....	28
I.5. Conclusion.....	28
<i>Chapitre II : Les paliers et leur lubrification</i>	
II.1. Introduction.....	29
II.2 Classification des paliers.....	29
II.2.1. Paliers de roulements.....	29
II.2.2. Paliers secs.....	30
II.2.3. Paliers poreux.....	30
II.2.4. Paliers magnétiques.....	31
II.2.5. Les paliers fluides.....	33
II.2.5.1. Paliers hydrodynamiques.....	33
A. Paliers à géométrie variable.....	34
B. Paliers à géométrie fixe.....	36
a. Les Paliers multilobés.....	36
b. Les Paliers à films amortisseurs.....	37
c. Les paliers à arc partiel.....	38
d. Les paliers lisses cylindriques.....	39
d.1. Caractéristiques géométriques d'un palier lisse.....	40
d.2. les types des paliers lisses cylindriques.....	41
d.3. Principe de fonctionnement d'un palier lisse.....	41
d.4. Les avantages et les inconvénients des paliers lisses.....	42
d.5. Les différents régimes de lubrification des paliers.....	42
A. le régime de lubrification avec contact.....	43
B. Le régime de lubrification hydrodynamique.....	44
C. le régime de lubrification mixte.....	44
II.2.5.2. Paliers hydrostatiques.....	45
II.2.5.3. Paliers hybrides.....	45
II.3. Défauts spécifiques aux paliers lisses.....	45
II.3.1. Défaut d'Instabilité de palier lisse	46
II.3.2. Défaut de mésalignement dans les paliers lisses.....	47
II.3. 3. Défauts de lubrification-Instabilité.....	47
II.3.4. Défaut de jeu du palier lisse.....	48

II.3. 5. Phénomène de tourbillonnement d’huile.....	49
II.3.6. Frottement et usure de contact.....	50
II. 3.7. Mauvais serrage mécanique (jeu de fondation).....	51
II.4. Conclusion.....	51
<i>Chapitre III : Introduction aux processus stochastiques</i>	
III.1. Introduction.....	52
III.2. Les paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité.....	53
III.2.1. Variable aléatoire.....	53
III.2.2. Types de variables aléatoire.....	53
III.2.3. La densité de probabilité.....	53
III.2.4. La fonction de répartition.....	54
III.2.5. La fonction de fiabilité.....	54
III.2.6. Le taux de défaillance ou taux d’avarié.....	55
III.2.7. Le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) « <i>Mean Time between Failure</i> ».....	56
III.3. Les lois de probabilités.....	56
III.3. 1. Les lois discrètes.....	57
III.3. 2. Les lois continues.....	57
III.4. Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilités.....	58
III.4.1. La loi exponentielle.....	58
III.4.2. La loi de Wei bull.....	59
III.4.3. La loi normale.....	61
III.4. 4. La loi log-normale.....	62
III.4. 5. La loi Gamma.....	63
III.4.6. La loi Bêta.....	64
III.4.7. La loi uniforme.....	65
III.5. Les processus stochastiques.....	65
III.5. 1. Définitions.....	66
III.5. 2. Propriétés d’un processus.....	66
III.6. Les processus de dégradation.....	67
III.6.1. Processus de Markov.....	67
III.6.2. Processus de Poisson.....	68
III.6. 3. Martingale.....	69
III.6.4. Réseaux bayésiens(RB).....	70

III.6.5. Réseaux de Pétri Stochastiques (RdPS).....	70
III.6.6. Processus de Lévy.....	71
III.6.7. Processus Gamma.....	72
III.6.8. Processus de Wiener (mouvement brownien).....	73
III.7. La probabilité et les statistiques.....	75
III.8. Les tests statistiques.....	75
III.9. Principe d'un test d'hypothèses.....	76
III.10. Les principaux tests d'adéquation à une loi.....	77
III.10.1. Le test du Chi-deux.....	77
III.10.2. Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov.....	78
III.10.3. Test de Shapiro-Wilk.....	78
III.11. Conclusion.....	78

Chapitre IV : Simulation stochastique

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Description du système industriel étudié.....	79
IV.3. Action de maintenance préventive sur les paliers lisses.....	81
IV.4. Méthodologie du travail.....	81
IV.5. Analyse des données.....	82
IV.5.1. Test statistique d'ajustement des valeurs vibratoires collectées.....	83
IV.5.2. Test statistique d'ajustement de l'échantillon des températures.....	84
IV.6. Simulation MATLAB.....	86
IV.6.1. Simulation de l'évolution des valeurs vibratoires.....	86
IV.6.2. Simulation de la variation de la température du palier lisse.....	87
IV.7. Estimation de la fiabilité (fonction de survie).....	89
IV.8. Interprétation des résultats.....	90
IV.9. Conclusion.....	90
Bibliographie.....	94
Annexes.....	102

Nomenclature

$H_{\text{réel}}$	La hauteur réelle d'un compresseur (travail effectif ou réel)
H_a	La hauteur adiabatique
H_p	La hauteur polytropique
L_a	Le travail adiabatique
(P_1, P_2)	La pression du gaz à l'aspiration et au refoulement
(T_1, T_2)	La température du gaz à l'aspiration et au refoulement
V	Le volume du réservoir.
n	Coefficient de compressibilité moyen entre les états (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .
∂	Rapport des chaleurs spécifiques.
R	Constante spécifique gaz.
Z	L'exposant polytropique
Q	Le coefficient de débit
R_2	Rayon extérieur de l'impulseur
U_2	La vitesse périphérique.
τ	Le coefficient de la pression
η_p	Le rendement polytropique
η_a	Le rendement adiabatique
P	La puissance absorbée par le compresseur
P_f	La puissance perdue en raison des fuites,
P_m	La puissance perdue à cause des pertes mécaniques
$W_{1,2}$	Le travail réel spécifique
Q_m	Le débit massique
J	Le moment de l'inertie de l'unité d'entraînement
θ	Le coefficient de similitude
ρ	La viscosité dynamique du lubrifiant
u	La vitesse linéaire de l'arbre en rotation
C	La charge radiale exercée sur l'arbre.
f	Le coefficient de friction
f_m	Coefficient de friction en régime mixte
f_h	Coefficient de friction en régime hydrodynamique.

ϑ	Coefficient de répartition en fonction de la charge supportée par le film hydrodynamique
$x(t)$	Variable au cours du temps t
$\Pr(x)$	Probabilité de x
$F(x)$	La fonction de répartition de la variable aléatoire x
$f(x)$	La fonction de densité de probabilité
$R(t)$	La fonction de fiabilité
$\lambda(t)$	Le taux de défaillance
$W(\eta, \beta, \gamma)$	La loi Weibull
η	Paramètre d'échelle (la loi Weibull)
β	Paramètre de forme (la loi Weibull)
γ	Paramètre de position (la loi Weibull)
$N(\mu, \sigma)$	La loi normale
μ	La moyenne (loi normale)
σ	Ecart-type (loi normale)
$E(t)$	Espérance
Φ	Fonction de répartition de la loi normale réduite
h	Le pas de temps.
$Ga(\alpha, \beta)$	La loi gamma.
α	Paramètre de forme (la loi gamma).
β	Paramètre d'échelle (la loi gamma).
Γ	La fonction gamma.
H_0	L'Hypothèse nulle.
H_1	L'Hypothèse alternative.
$B(t)$	Le mouvement brownien.
$W(t)$	Le processus de Wiener standard.
$Y(t)$	Processus de dégradation
$N(t)$	La fonction aléatoire appelée fonction de comptage (Processus de Poisson)
$(T_n)_{n \geq 1}$	Le processus ponctuel
μ	La moyenne du processus Lévy
σ	L'écart-type du processus Lévy
α	Le degré de risque (intervalle de confiance).
H_0	Hypothèse testée par l'ajustement de Kolmogorov

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I. 1. Classification des compresseurs.....	7
Figure I. 2. Compresseur à membrane.....	9
Figure II.3. Compresseur bi vis.....	10
Figure I. 4. Compresseur à lobes.....	11
Figure I. 5. Compresseur spiro-orbital.....	12
Figure I. 6. Compresseur à palettes.....	13
Figure I. 7. Compresseur axial.....	14
Figure I. 8. Sens des écoulements dans un compresseur centrifuge.....	15
Figure I. 9. Compresseur centrifuge.....	16
Figure I.10. Chambre annulaire.....	17
Figure I.11. Phase d'aspiration du gaz d'un compresseur centrifuge (Chambre annulaire)...	17
Figure I.12. Vue latérale de la roue d'un compresseur centrifuge	18
Figure I.13. Vue d'un diffuseur dans un compresseur centrifuge.....	18
Figure I.14. Refoulement du gaz comprimé dans un compresseur centrifuge.....	19
Figure I.15. Champs de fonctionnement d'un compresseur centrifuge.....	23
Figure I.16. Limite du pompage du compresseur.....	24
Figure I.17. Formation et propagation d'une cellule de décrochage.....	25
Figure I.18. Ligne de pompage et ligne de contrôle.....	26
Figure I.19. Conséquence de pompage.....	27
Figure I.20. Type de compresseur en fonctionne de débit et de la pression.....	28

Chapitre II

Figure II.1. Coupe médiane d'un palier poreux.....	31
Figure II.2. Palier magnétique.....	32
Figure II.3. Palier hydrodynamique typique.....	33
Figure II.4. Palier à 3 patins.....	34
Figure II.5. Palier à plusieurs patins	34
Figure II.6. Caractéristiques géométriques d'un palier à trois patins.....	35
Figure II.7. Schématisation d'un palier à trois lobes.....	37
Figure II.8. Palier à film amortisseur.....	38

Figure II.9. Palier à arc partiel.....	39
Figure II.10. Coussinets.....	40
Figure II.11. Section droite d'un palier lisse.....	40
Figure II.12. Position d'arbre dans un palier lisse hydrodynamique.....	42
Figure II.13. Lubrification des paliers (Courbe de Stribeck).....	43
Figure II.14. Caractéristique d'un régime hydrodynamique.....	44
Figure II.15. Instabilités de paliers lisses hydrodynamiques.....	46
Figure II.16. Palier mésaligné.....	47
Figure II.17. Effet du jeu de palier.....	49
Figure II.18. Phénomène de Tourbillonnement.....	50
Figure II.19. Usure du palier lisse.....	50
Figure II.20. Défaut de frottement.....	50
Figure II.21. Jeu de fondation et le spectre correspond.....	51
Chapitre III	
Figure. III.1. Fiabilité décroissante avec le temps.....	54
Figure. III.2. Courbe en baignoire : taux de défaillance $\lambda(t)$	56
Figure. III.3. Fonction de répartition d'une loi discrète.....	57
Figure. III.4. Fonction de répartition d'une loi continue.....	58
Figure. III.5. Densité de probabilité de la loi exponentielle.....	59
Figure. III.6. Densité de probabilité de la loi de Weibull.....	60
Figure. III.7. Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.....	61
Figure. III.8. La fonction de répartition La loi log-normale $\mu=0$	62
Figure. III.9. Densité de probabilité La loi Gamma.....	63
Figure. III.10. La densité de probabilité de la loi Béta.....	64
Figure. III.11. Fonctions caractéristiques de la loi uniforme continue.....	65
Figure. III.12. Modèle Markovien	67
Figure. III.13. exemple d'un circuit dans un réseau Bayésien.....	70
Figure. III.14. Exemple d'un Réseau de Pétri	71
Figure. III.15. trajectoires simulées par le processus gamma.....	73
Figure. III.16. trajectoires simulées par le processus de Wiener.....	74
Chapitre IV	
Figure. IV.1. Installation du compresseur centrifuge.....	80

Figure. IV.2. Palier lisse étudié.....	80
Figure. IV.3. Schéma de la machine.....	80
Figure. IV.4. Fonction de densité de probabilité la loi gamma.....	83
Figure. IV.5. Fonction de répartition la loi gamma.....	83
Figure. IV.6. Fonction de densité de probabilité de la loi Lévy ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$) pour la température de palier.....	85
Figure. IV.7. Fonction de répartition de la loi Lévy ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$) pour la température de palier.....	85
Figure. IV.8. Tracé de 10 trajectoires selon le processus Gamma de paramètres ($\alpha = 3.6145$ et $\beta=0.46304$).....	86
Figure. IV.9. Tracé de 1500 trajectoires selon le processus Gamma de paramètres ($\alpha = 3.6145$ et $\beta=0.46304$).....	87
Figure. IV.10. Tracé de 10 trajectoires selon le processus Lévy de paramètres ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$	88
Figure. IV.11. Tracé de 1500 trajectoires selon le processus Lévy de paramètres ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$).....	88
Figure. IV.12. Fonction de fiabilité (fonction de survie) selon la loi Gamma pour les mesures de vibratoires.....	89

Liste des Tableaux

Chapitre IV

Tableau. IV.1. Mesures vibratoires.....	82
Tableau. IV.2. Mesures de températures.....	82
Tableau. IV.3. Résultat d'ajustement selon la loi gamma.....	84
Tableau. IV.4. Résultat d'ajustement selon la loi Lévy.....	85

Introduction générale

Introduction générale

Contexte

Le fonctionnement des systèmes industriels soumis à une dégradation continue. Chaque composant commence à se dégrader après une certaine période, avant d'arriver à la défaillance. Au cours de son utilisation, et lorsqu'il est soumis à des phénomènes mesurable comme l'usure, la vibration, l'échauffement (température anormale), la fissuration, etc. Ces problèmes donnent l'exigence pour évaluer la fiabilité des systèmes en question, et ce dont l'objectif de procéder à un diagnostic pour détecter l'origine du défaut probable, et d'en évaluer son gravité avant d'arriver à une défaillance sure, afin d'éviter des conséquences sur la qualité de service et la production.

La détection précoce des défauts dans les processus industriels, s'intéresse souvent à garantir un fonctionnement acceptable en assurant la qualité du produit et en évitant la détérioration de l'équipement, et ce par l'augmentation de la disponibilité des processus par le contournement des instabilités et des arrêts d'urgence.

Les modèles qui décrivent la dégradation des systèmes ont beaucoup de revenus, car ils permettent d'appréhender la dynamique de dégradation. De plus, ils jouent un rôle fondamental lorsqu'on parle de l'améliorer de la fiabilité. Parmi ces modèles, on trouve les processus stochastiques. Ces derniers constituent des outils puissants et bien adaptés, ils permettent de tenir compte de l'évolution dynamique, et des incertaines influences des phénomènes aléatoires.

Dans ce contexte, différents modèles, à espaces d'états et de temps continus ou discrets, sont présentés. Parmi ces modèles on trouve le processus de Lévy, il est souvent utilisé, du fait qu'il est caractérisé par ses accroissements indépendants et stationnaires.

Dans cette étude on va utiliser deux processus stochastiques afin de simuler la dégradation aléatoire d'un palier lisse dans un compresseur centrifuge, il s'agit des processus de Lévy et celui de Gamma, ces deux derniers processus font partie de la classe des processus de Lévy.

Objectif de la thèse

L'objectif de la présente thèse est de modéliser le processus de dégradation d'un palier lisse installé sur un compresseur centrifuge (type : TK31), au niveau du complexe de raffinage du

pétrole RAK1 en Skikda. En effet, deux processus stochastiques pour effectuer le diagnostic des défauts de ce palier vont être proposés. La présente étude est une contribution solide, permettant de prédire la probabilité de défaillance d'un équipement, en se basant sur la mesure et l'analyse des données disponibles des grandeurs physiques à surveiller, conduisant à la mise en place d'une maintenance préventive pour éviter une défaillance potentielle de machines qui peut survenir à des événements, et en conséquence l'évolution dans le temps du changement de l'état de fonctionnement. Les grandeurs physiques présentes dans cette étude sont l'amplitude vibratoire et la température de fonctionnement du palier lisse du compresseur. Notamment les modèles de dégradation continue utilisés sont le processus Gamma et le processus Lévy.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, on aborde les notions de bases servant comme des prérequis dans le domaine de turbomachine. En effet, on va donner une perçue sur les différents types des compresseurs, ses organes mécaniques, le domaine d'utilisation, le fonctionnement et la méthode d'installation de chaque type, ainsi que les différentes pannes et l'entretien appropriée. Et particulier la stabilité et la plage de fonctionnement, le phénomène de pompage et l'instabilité aérodynamique vont être discuté.

Dans le deuxième chapitre, nous allons proposer des généralités sur les paliers, la conception, les caractéristiques, en précisent en particulier le fonctionnement des paliers lisses. Nous allons présenter tous d'abord les avantages et l'inconvénient, ainsi que leurs domaines d'utilisations dans l'industrie, sans oublier la lubrification spécifique de ce genre de palier.

Le troisième chapitre est réservé pour présenter les principaux outils de probabilités utilisés pour la modélisation des phénomènes aléatoires, dans l'objectif de modéliser la dégradation des systèmes à travers les processus stochastiques. Nous commençons par les principales lois de probabilité utilisées pour le calcul de la fiabilité et de taux de défaillance. Ensuite, les processus stochastiques les plus utilisés pour modélisation de la dégradation des systèmes industriels vont aussi être discuté. A l'occasion, nous allons présenter les principaux tests d'adéquation pour l'ajustement d'une loi probabiliste.

Le quatrième chapitre est réservé pour discuter l'utilisation de deux processus stochastique de dégradation, permettant la simulation de l'évolution de la vibration d'un côté, et la température de fonctionnement prélevée au niveau du palier lisses d'autre coté, ce dernier est installé sur un compresseur centrifuge à trois étages TK31. La machine est exploitée au

niveau du complexe de raffinage du pétrole RAK1 Skikda, les dits processus sont respectivement le processus Gamma et celui de Lévy.

La présentation d'une méthodologie basée sur l'analyse statistique, utilisant le processus Gamma et celui de Lévy est donnée, dans un but de vérifier l'ajustement des données récoltées par rapport à des lois statistiques telles que, la loi Gamma et Lévy.

L'ajustement des échantillons des grandeurs physiques suivis, nous a permis de simuler avec succès l'évolution de la vibration ainsi que la température de service du palier lisse. Les résultats de simulation sont importants, et peuvent être utilisés pour la prédiction des pannes qui peuvent survenir sur l'équipement étudié.

Etat de l'art

Les modèles à dégradation continue conviennent pour représenter des phénomènes observables sur de nombreux systèmes industriels.

Le processus gamma est un processus de chocs approprié pour la modélisation des dommages s'accumulant d'une façon monotone au fil du temps. Ce processus de Levy est caractérisé par des accroissements indépendants et positifs étant un processus à espace d'état continu et à accroissements positifs, il permet de modéliser les mécanismes de vieillissement qui sont par nature lents.

Dans de nombreuses applications, les facteurs de stress environnementaux comme la température, l'humidité, les vibrations, le taux d'utilisation... peuvent influencer le choix de processus. La plupart des approches existantes permettent à certains paramètres des processus stochastiques de varier en fonctions du temps ou des covariables.

Abdel-Hameed (1975) fut le premier à implémenter le processus gamma comme un modèle approprié pour la modélisation des phénomènes de détériorations aléatoires. Un avantage capital de la modélisation de dégradation par les processus gamma est que les calculs mathématiques nécessaires pour l'analyse et la prise de décision de maintenance sont relativement simples et explicites **Van Noortwijk et al. (2007)**.

Les processus gamma sont utilisés pour la modélisation des processus de dégradation à accroissements indépendants et positifs aboutissant à un large domaine d'applications comme par exemple le calcul de la vie restante utile (RUL) des systèmes **Wei and Xu (2014)**, la planification de la maintenance préventive basée sur le temps ou l'état du système **Tan et al. (2010)** et l'évaluation de la fiabilité des équipements en temps réel **Wang et al. (2011)**. **Van Noortwijk (2009)** présente une étude détaillée sur l'historique, la définition, la calibration et les différentes applications des processus gamma. Dans son enquête l'auteur présente une liste détaillée sur des applications de processus gamma pour la maintenance préventive des systèmes suivant différentes politiques de maintenance.

Ali Salami (2011) est construit un modèle de dégradation basé sur le processus gamma et le mouvement brownien d'un système et l'effet de l'environnement stressant dans lequel il évolue. Il considère que la dégradation résulte de la somme d'un processus gamma et d'un mouvement brownien indépendants. Il propose ensuite deux méthodes pour estimer les paramètres de modèle: la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments.

Les processus de Levy présentent des outils mathématiques pour la modélisation de toute une variété des phénomènes aléatoires dans le monde réel. Cela peut aller de la modélisation des mouvements des particules, des animaux et des yeux humains, jusqu'à la modélisation des phénomènes de dégradation des systèmes industriels et de l'évolution des prix et des indices financiers. Les processus de Levy constituent une grande classe des processus caractérisés par des trajectoires continues à droite avec indépendance et stationnarité des incréments.

Ce processus présente de multiples avantages :

- estimation facile des paramètres à partir de la série des accroissements relatifs,
- calcul mathématique explicite du premier temps de passage,
- meilleure représentation de la distribution non-normale des incréments,
- processus à valeurs non-négatives.

Cont et Tankov (2004) donnent une étude détaillée des processus dérivés de Levy à combinaisons de processus continus et de sauts. Les auteurs présentent les outils mathématiques correspondant à ces processus ainsi que leurs applications dans le domaine de la modélisation financière.

Peter Tankov (2004) applique le processus de Levy pour la modélisation de prix boursiers. Il est développé une méthode non-paramétrique stable de calibration de modèles exponentielle-Lévy, c'est-à-dire de reconstruction de ces modèles à partir des prix d'options cotées sur un marché financier. Il étudie les propriétés de convergence et de stabilité de cette méthode de calibration, décrit sa réalisation numérique et donne des exemples de son utilisation.

S. Mercier, M. Roussignol, C. Meier-Hirmer (2010) utilisent le processus Gamma-Lévy pour optimiser la maintenance préventive d'une voie de chemin de fer, afin d'assurer que la voie de chemin de fer reste utilisable avec une grande probabilité. Le niveau de dégradation de la voie de chemin de fer est aléatoire.

Tran Minh Hao LA (2020) utilise le processus de Levy pour la modélisation stochastique de la dégradation, du pronostic de durée de vie et de l'optimisation de la maintenance prévisionnelle des systèmes dynamiques. Ces modèles permettent d'estimer en temps réel la durée de vie résiduelle du système c'est à dire le temps restant avant défaillance. Plusieurs politiques de maintenance prévisionnelle à structure multi-niveaux sont proposées, évaluées et optimisées.

Chapitre I

La théorie des compresseurs

Sommaire

I.1. Introduction.....	6
I.2. Rôle des compresseurs.....	6
I. 3. Classification des compresseurs.....	7
I.3. 1. Les compresseurs volumétriques.....	7
I.3. 1.1. Les compresseurs alternatif.....	8
a) Les compresseurs à pistons.....	8
b) Les compresseurs à membrane.....	8
I.3. 1.2. Les compresseurs rotatifs.....	10
a) Les compresseurs à vis.....	10
b) Les compresseurs à lobes.....	10
c) compresseur spiro-orbital.....	11
d) Compresseur à palettes.....	12
I.3. 2. Les compresseurs dynamiques.....	13
a) Les compresseurs axiaux.....	13
b) Les compresseurs centrifuges.....	14
b.1) Description générale d'un compresseur Centrifuge.....	15
b.2) Principe de fonctionnement d'un compresseur centrifuge	16
b.3) Paramètres et grandeurs physiques des compresseurs centrifuges.....	19
b.4) Les performances d'un compresseur centrifuge.....	22
b.5) Les instabilités aérodynamiques dans un compresseur centrifuge.....	23
➤ Le phénomène de pompage d'un compresseur centrifuge.....	23
➤ Le phénomène de décrochage tournant.....	25
➤ Limites de pompage et de contrôle.....	25
➤ Conséquences du phénomène de pompage sur compresseur.....	26
I.4. Domaine d'utilisation des compresseurs.....	28
I.5. Conclusion.....	28

I.1. Introduction

L'air est très utilisé dans l'industrie, sa fonction peut comprendre plusieurs opérations comme le nettoyage le séchage le transport, il est aussi très répandu dans les ateliers et les usines, ou il y a des modules de commande de machines ou des circuits de puissances pneumatique, son utilisation pénètre aussi dans le domaine d'énergie, (centrales électrique, installation gazier etc.).

Cette très grande variété d'utilisation, explique et répond parfaitement à la diversité qui existe sur les modèles de compresseurs. Le choix d'un compresseur répond mieux à un problème donné, ce choix est basé sur une étude approfondie selon le type du fluide, la pression, le débit la qualité de l'air et du gaz utilisé. Le rendement demandé pour un fonctionnement meilleur d'une installation de compression, ainsi que le type de l'installation à réaliser joue un rôle important dans la détermination des compresseurs afin de permettre de calculer le coût exact d'un mètre cube d'air consommé, qui est dans certaines industries, représente un facteur non négligeable du prix du revient.

I.2. Rôle des compresseurs

Les compresseurs sont des appareils qui transforment l'énergie mécanique en énergie de pression, en réalisant un accroissement de pression d'un fluide à l'état gazeux [1].

Le choix des compresseurs est basé sur les exigences technologiques, les paramètres principaux, et même les règles de l'entretien pour prévoir l'état de la machine dans les différentes conditions d'exploitation.

L'objectif principal d'un compresseur est d'élever la pression du fluide qui le traverse en lui transférant de l'énergie par l'intermédiaire du mouvement des éléments du compresseur (pistons, vis membranes,) [2].

En générale, la compression peut être imposée par la nécessité technique de déplacer une certaine quantité de gaz à une certaine pression d'un système vers un autre à une autre pression plus élevée.

Cette opération a pour but de :

- faire circuler un gaz dans un circuit fermé.
- produire des conditions favorables (de pression) pour des réactions chimiques.
- de transporter par canalisation un gaz dans un pipe-line.
- obtenir de l'air comprimé pour la combustion.

I. 3. Classification des compresseurs

Pour chaque service, le type du compresseur choisit doit répondre aux exigences des systèmes d'exploitation. Les compresseurs destinés à véhiculer des fluides compressibles ont pour objectif de transformer l'énergie mécanique installée en énergie pneumatique et ce par l'échange d'énergie avec le fluide qui les traversent, en vue d'augmenter la pression.

Plusieurs travaux de comparaison entre les différentes familles de compresseurs ont été présentés ces dernières années [4.5]. Ils ont montré que plusieurs types de compresseurs peuvent être utilisés. Parmi eux, on trouve les turbocompresseurs (compresseur dynamique), les compresseurs volumétriques (scroll, lobes, vis, etc.).

Les différents types de compresseurs sont résumés sur la (figure I.1).

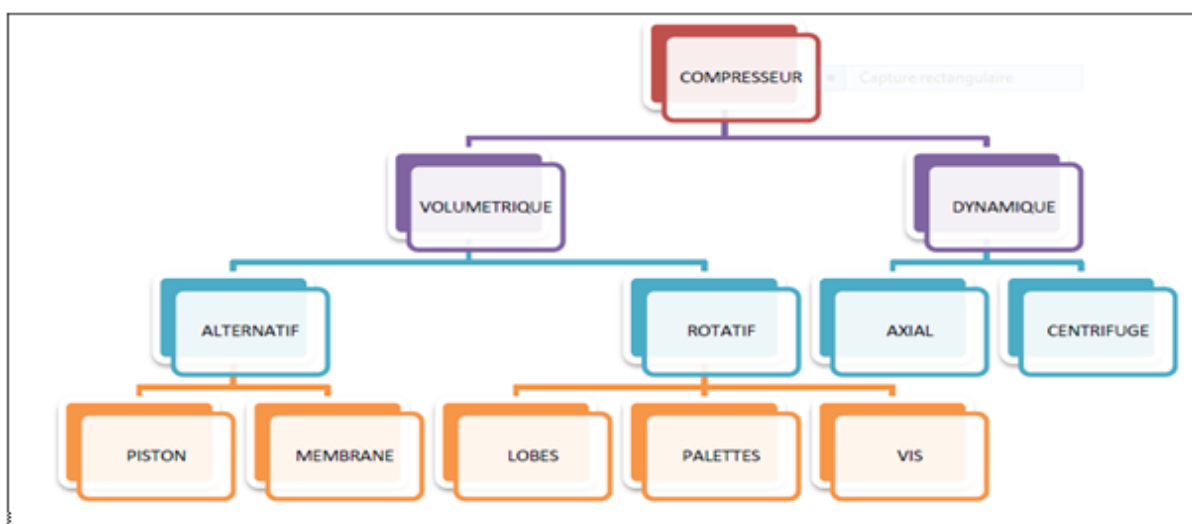


Figure I. 1. Classification des compresseurs [6].

I.3. 1. Les compresseurs volumétriques

Les Compresseurs volumétriques sont des machines réceptrices, ils peuvent être rotatifs (vis, palette etc.) ou alternatifs (à piston) [7]. La transformation du travail mécanique reçu en énergie de pression par la diminution du volume du fluide qui traverse la machine. Ces compresseurs permettent des taux de compression élevés mais avec des débits volumiques relativement faibles. Les plus utilisés sont les compresseurs à vis, à lobes, alternatifs à pistons ou spiro-orbitaux.

Le principe d'un compresseur volumétrique est le suivant :

A l'aspiration, une quantité de gaz est aspirée et isolée des orifices d'aspiration et de refoulement. Durant ce processus, le gaz peut être enfermé dans un volume, la diminution de

ce dernier assure la compression du gaz (compression interne), ou peut être refoulé sans compression (compression externe) [8].

I.3. 1.1. Les compresseurs alternatifs

Les compresseurs alternatifs tels que ; les compresseurs de types à pistons, à membranes,

Chacun ayant un ou plusieurs cylindres équipés d'un piston qui se déplace dans les deux sens, en déplaçant un volume à chaque mouvement.

Les compresseurs alternatifs sont largement utilisés dans l'industrie du pétrole et du gaz, où les débits volumétriques de gaz sont considérés relativement faibles, par contre, le taux de compression est élevé.

a) Les compresseurs à pistons

Le compresseur à piston accumule la pression souhaitée par un mouvement alternatif ou réciproque d'un piston dans un cylindre. C'est le genre de modèle que l'on retrouve dans différentes industries, notamment les secteurs industriels, de l'alimentation et des produits d'emballage.

Le compresseur alternatif à piston comporte un vilebrequin actionné par une machine motrice extérieure, le vilebrequin via la bielle engendre un mouvement alternatif au piston [7]. La variation de volume ainsi que la compression du gaz est obtenue par le mouvement alternatif du piston à l'intérieur du cylindre, imposé par le système bille-manivelle.

Historiquement, ce type de compresseur était le plus répandu. Son domaine de fonctionnement est assez large et peut atteindre un taux de compression très élevés (de l'ordre d'une dizaine). La pression maximale de service est élevée et la température maximale de refoulement est de l'ordre de 120 °C. Ce type de compresseur est très fiable, mais leur rendement est considéré moyen.

Aujourd'hui, les compresseurs à pistons sont remplacés progressivement par des compresseurs à vis, ou Scroll qui présentent un meilleur rendement [9].

b) Les compresseurs à membrane

Ils ont été inventés en 1916 par Henri Corblin, comme son nom l'indique un compresseur à membrane fonctionnent avec une membrane oscillante. L'oscillation de la membrane peut

être créée par un excentrique mû par un moteur, un piston, un moteur linéaire ou par une vibration électromagnétique [6].

La déformation élastique de la membrane assure l'aspiration et la compression du gaz. Un système hydraulique permet d'assurer la flexion de la membrane, généralement un piston se déplace dans le cylindre et agit sur le fluide hydraulique qui transmettra son mouvement oscillatoire à la membrane.

Le rôle du plateau à trous est d'assurer une bonne répartition du fluide sous la membrane. Celle-ci est souvent constituée de trois disques métalliques. Ce système a l'avantage de permettre la détection de la rupture de la membrane par une mesure de pression. En effet, la membrane assure une étanchéité statique du côté gaz procédé.

Notamment dans l'industrie chimique, les compresseurs à membranes sont employés pour la compression de gaz dangereux [10], corrosifs ou précieux dont il faut éviter la diminution. Certaines variantes de construction emploient une transmission hydraulique utilisant de l'eau, au lieu de l'huile, pour la compression de l'oxygène ou du protoxyde d'azote, afin d'éviter un contact accidentel entre le gaz et l'huile dans l'éventualité de la rupture des membranes. Dans le domaine de l'air comprimé, ils trouvent un emploi quand on désire de l'air rigoureusement exempt d'huile à des moyennes et hautes pressions.

Il existe deux types de compresseurs à membranes :

- Les compresseurs bielle-manivelle,
- Les compresseurs équipés d'un électro-aimant dont un électro-aimant remplace la fonction bielle-manivelle.

Les compresseurs à membrane permettent d'atteindre des taux de compression élevés (15 bar pour un étage) et des débits allant jusqu'à $2 \text{ m}^3/\text{min}$ [10].

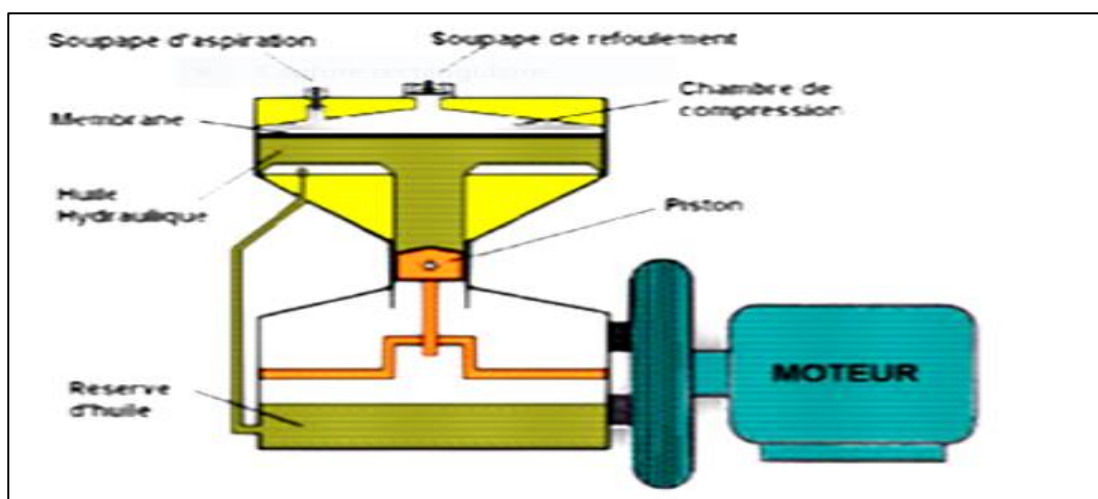


Figure I. 2. Compresseur à membrane

I.3. 1.2. Les compresseurs rotatifs

Les compresseurs rotatifs tels que les compresseurs, dans cette catégorie, on trouve les compresseurs à lobes, à vis, à ailettes et à anneau. Chacun ayant une enveloppe avec des éléments en rotation déplaçant un volume fixe à chaque cycle.

Ces machines ont des pressions de refoulement limitées, c'est pourquoi ils ne sont pas fréquemment utilisés dans l'industrie du pétrole et du gaz, bien qu'ils puissent être employés pour des applications spéciales. La fiabilité des compresseurs rotatifs est généralement plus élevée par rapport à celle des compresseurs alternatifs.

a) compresseur à vis

Depuis les années 1980, les compresseurs rotatifs à vis connaissent une certaine réputation, ils ont vaincu une part très intéressante du marché. Ils sont les compresseurs les plus répandus pour des puissances comprises allant de 5-900 HP.

Le compresseur à vis à deux rotors hélicoïdaux est le type le plus utilisé. Deux rotors accouplés sont engrainés ensemble, emprisonnant l'air en réduisant son volume le long des deux rotors. Selon les exigences de pureté de l'air, les compresseurs rotatifs à vis sont du type lubrifié ou sec (sans huile) [11].

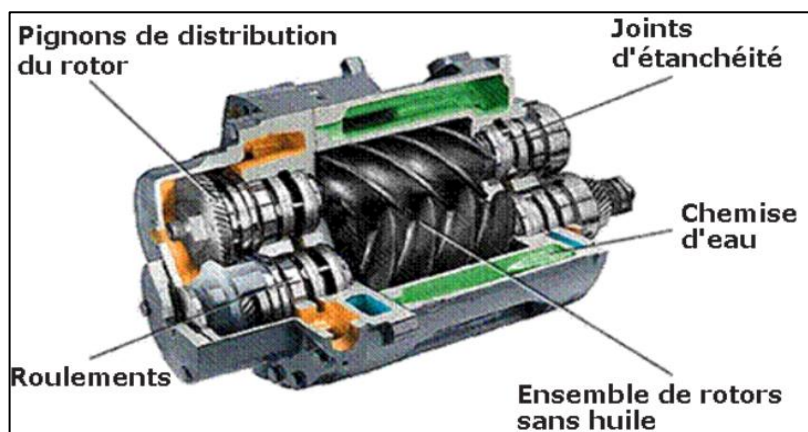


Figure II.3. Compresseur bi vis [12].

b) Compresseur à lobes

Les compresseurs à lobes sont moins répandus par rapport aux compresseurs à vis, Ils ont des performances modestes. Ces compresseurs couvrent une large gamme de puissance mais avec des taux de compression faible (2-2,5). La pression maximale de service est réduite et varie avec la température maximale de service qui est généralement de l'ordre de (140-150) °C.

Ils sont principalement utilisés dans les applications où il est impératif d'avoir une compression exempte d'huile (industrie du textile, chimique, alimentaire, installation médicales, etc.) [8].

Un compresseur à lobes est utilisé parfois pour équiper des moteurs thermiques en assurant leur suralimentations. La rotation des deux rotors est synchronisée au moyen d'un couple d'engrenages de façon qu'il n'y ait ni contact, ni frottement entre les profils. Un tel compresseur est une machine non compressive (pas de compression interne), c'est une soufflante qui procure un débit d'air directement lié à la vitesse de rotation. En sortie du compresseur, le débit est associé à une surpression (compression isochore).

Le compresseur à lobes le plus connu est le compresseur Roots, dont la pression de refoulement peut aller jusqu'à 2 bar pour des débits jusqu'à 15 m³/min.

Il peut fonctionner à des vitesses élevées (14 000 tr/min). Le rendement de ce type de compresseurs est relativement bon quand le taux de compression n'est pas élevé.

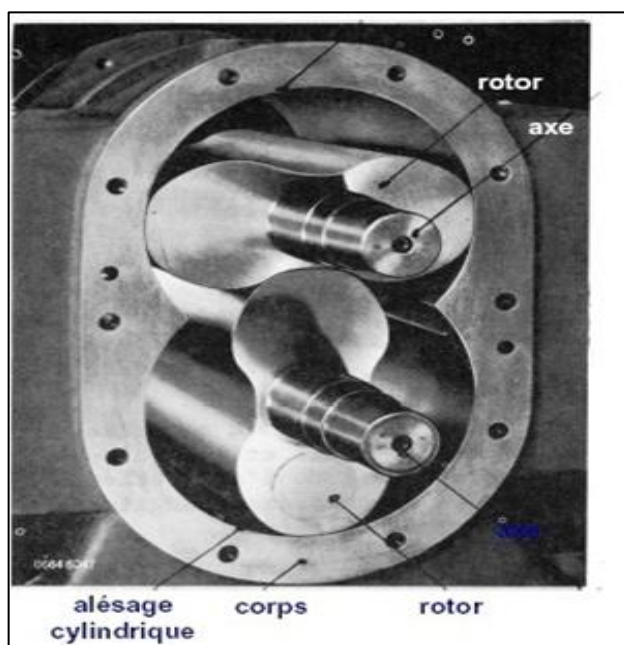


Figure I. 4. Compresseur à lobes [13].

c) Compresseur spiro-orbital

La technologie des compresseurs spiro-orbital (Figure I. 5) concurrence celle des compresseurs à vis sur le marché industriel des puissances moyennes. Les puissances électriques disponibles sont de l'ordre de quelques dizaines de kW mais ces compresseurs

peuvent être installés en parallèle. Ils sont caractérisés par leurs taux de compression élevés (7-8).

Lors d'un fonctionnement normal, le niveau sonore est faible [14] et les frottements entre les spirales sont aussi assez faibles [15]. Il y a très peu de pièces en mouvement ce qui augmente sa fiabilité et sa durée de vie. Les spirales doivent cependant être usinées avec précision dont l'objectif d'obtenir un mouvement du rotor par rapport au stator avec plus de précision et ce pour assurer une bonne étanchéité entre les spirales.

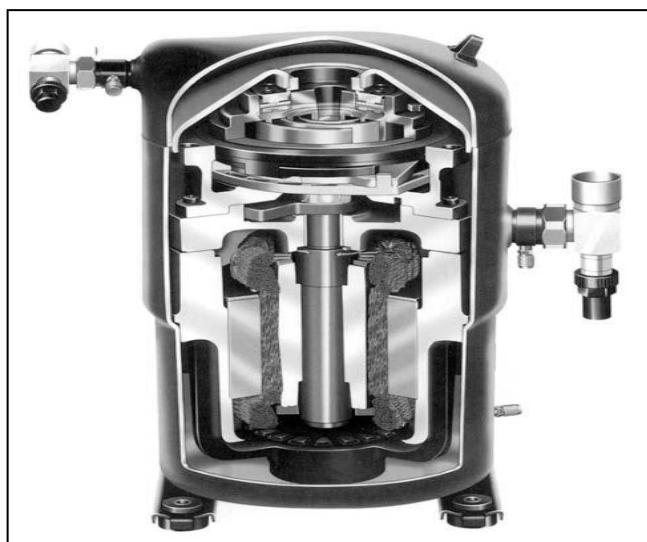


Figure I. 5. Compresseur spiro-orbital [16].

d) Compresseur à palettes

Un compresseur à palettes est constitué d'un stator dans lequel tourne un rotor excentré. Ce dernier est muni de rainures dans lesquelles coulisent des palettes qui sont plaquées contre la paroi intérieure du stator par la force centrifuge. Sous l'action de la force centrifuge, les palettes sont continuellement appliquées contre le cylindre. Le volume compris entre deux palettes est variable. Le gaz aspiré par augmentation progressive du volume est ensuite emprisonné entre deux palettes et transporté vers le refoulement. Dans cette zone de refoulement, le volume diminue et le gaz comprimé s'échappe dans la tuyauterie de refoulement.

Il permet d'obtenir des taux de compression inférieurs à 2 et des débits allant jusqu'à 610 m³/min si le compresseur n'est pas lubrifié [10].

Les compresseurs à palettes sont utilisés dans le cas d'une pression légèrement plus élevée. Celui-ci, est caractérisé par une très grande étanchéité. Par contre, les forts frottements des

palettes entraînent des pertes mécaniques élevées et réduisent le rendement par échauffement interne [17].

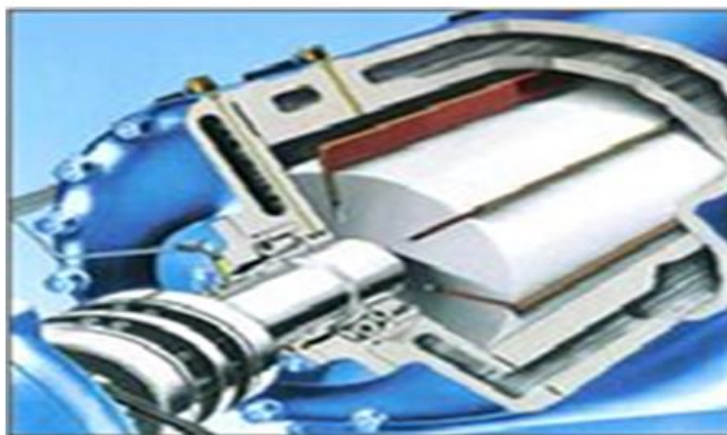


Figure I. 6. Compresseur à palettes

I.3. 2. Les compresseurs dynamiques

A la différence des machines volumétriques où le fluide est enfermé dans un volume fermé, les compresseurs dynamiques imposent un écoulement continu du fluide qui échange de l'énergie avec un rotor muni d'aubages tournant autour d'un axe [18]. Ces turbocompresseurs permettent des rendements élevés pour des zones restreintes de débit et de taux de compression. On distingue les compresseurs centrifuges et axiaux.

Les compresseurs centrifuges et axiaux, également connus sous le nom de turbocompresseurs et compresseurs à flux continu, fonctionnent par le principe de l'accélération du fluide à une vitesse élevée, puis à convertir cette énergie cinétique en énergie potentielle, qui se manifeste par une augmentation de la pression, en ralentissant le gaz dans diverges canaux. Dans les compresseurs axiaux la décélération a lieu dans les passages de lame du redresseur, tandis que dans un compresseur centrifuge, elle a lieu dans le diffuseur. Une différence évidente entre ces deux types de compresseurs, est que dans les compresseurs axiaux, le flux de sortie du compresseur est dans le sens axial, par contre pour les compresseurs centrifuges, le flux de sortie du compresseur est dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'arbre rotatif [19].

a) Les compresseurs axiaux

C'est le type des compresseurs dynamique dans lequel la compression est parallèle à l'axe de rotation de fluide. Ils sont caractérisés par un nombre d'étage important et le taux de

compression n'est pas élevé, ils sont généralement utilisés dans l'aviation « le turboréacteur » et dans les turbines à grande puissance.

Un compresseur axial a un débit axial, grâce auquel l'air ou le gaz passe le long de l'arbre de la machine à travers des rangées de pales rotatives et stationnaires. De cette manière, la vitesse de l'air augmente progressivement à mesure que les pales stationnaires convertissent l'énergie cinétique en pression [20].

Dans ce genre de compresseur, un tambour d'équilibrage est généralement intégré pour équilibrer la poussée axiale. Les compresseurs axiaux sont généralement plus petits et plus légers que leurs homologues centrifuges. Ils fonctionnent normalement à des vitesses plus élevées pour un débit d'air constant, ce dernier devient élevé à une pression relativement modérée.



Figure II. 7. Compresseur axial [21].

b) Les compresseurs centrifuges

Les compresseurs centrifuges dans l'industrie pétrolière et gazière constituent une partie essentielle du processus de production. Ils sont des équipements coûteux et consommateurs d'énergie.

Les compresseurs centrifuges sont très sensibles aux variations des conditions de fonctionnement, ils ont une gamme opérationnelle limitée, et en cas de dépassement le compresseur peut être endommagé.

Dans ces compresseurs, une bonne partie de l'élévation de pression est liée directement à la variation de vitesse d'entraînement dans la roue. En outre, le rôle du diffuseur est de ralentir le gaz à la sortie de la roue afin de récupérer la pression supplémentaire nécessaire pour le transport de gaz [22, 23]. Ils sont caractérisés par une grande vitesse de rotation et un rendement plus faible par rapport aux compresseurs axiaux (écoulement radial puis axial).

La construction générale d'un compresseur centrifuge est semblable à celle d'un ventilateur centrifuge ou d'une pompe centrifuge. Il se compose d'une roue, d'un diffuseur et d'une volute. La vitesse de rotation est élevée (>15000 tr/mn) [24]. Ils sont particulièrement appréciés pour leurs fiabilités et conception, ces machines ne génèrent aucun frottement métal sur métal. En effet, la périodicité d'entretien préventif est généralement de trois à cinq ans.

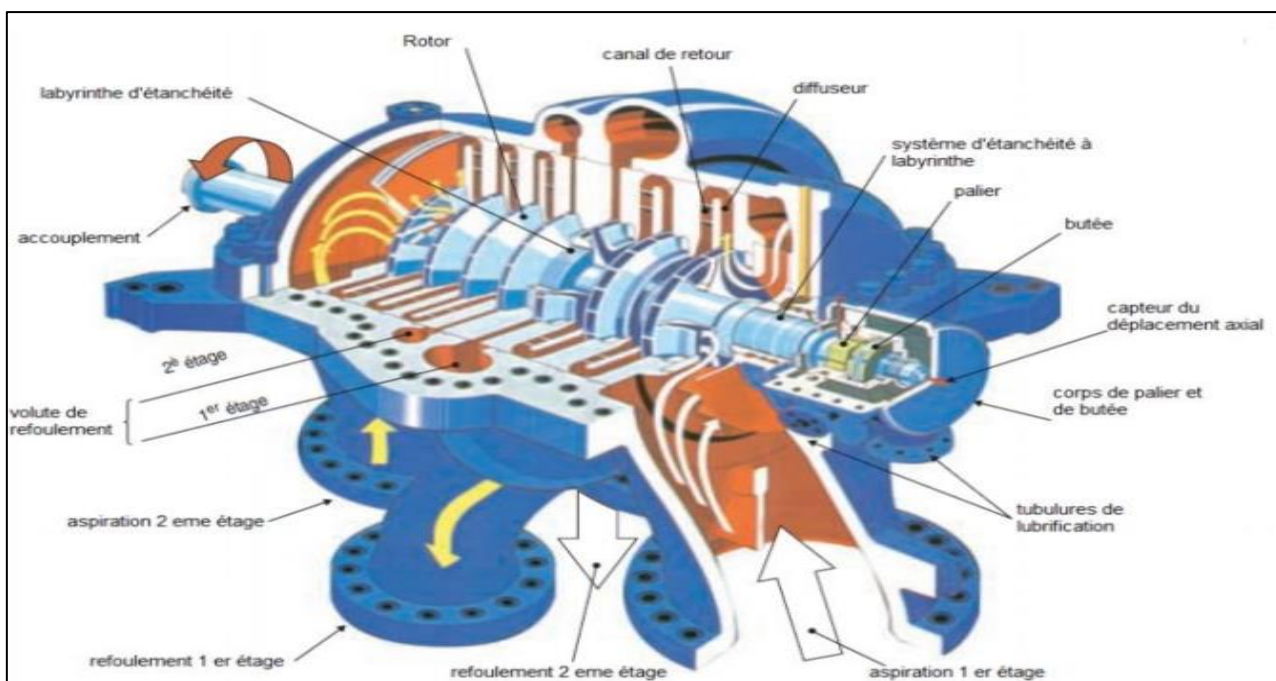


Figure I. 8. Sens des écoulements dans un compresseur centrifuge [25].

b.1) Description générale d'un compresseur centrifuge

Un compresseur centrifuge est une machine dynamique à écoulement de fluide continu, ayant des roues solidaires à l'arbre qui fournissent de l'énergie à ce dernier. Ainsi une partie de cette énergie est transformée en augmentation de pression dans les roues, et l'autre partie reste dans le stator (dans le diffuseur). [26]. (figure I.10)

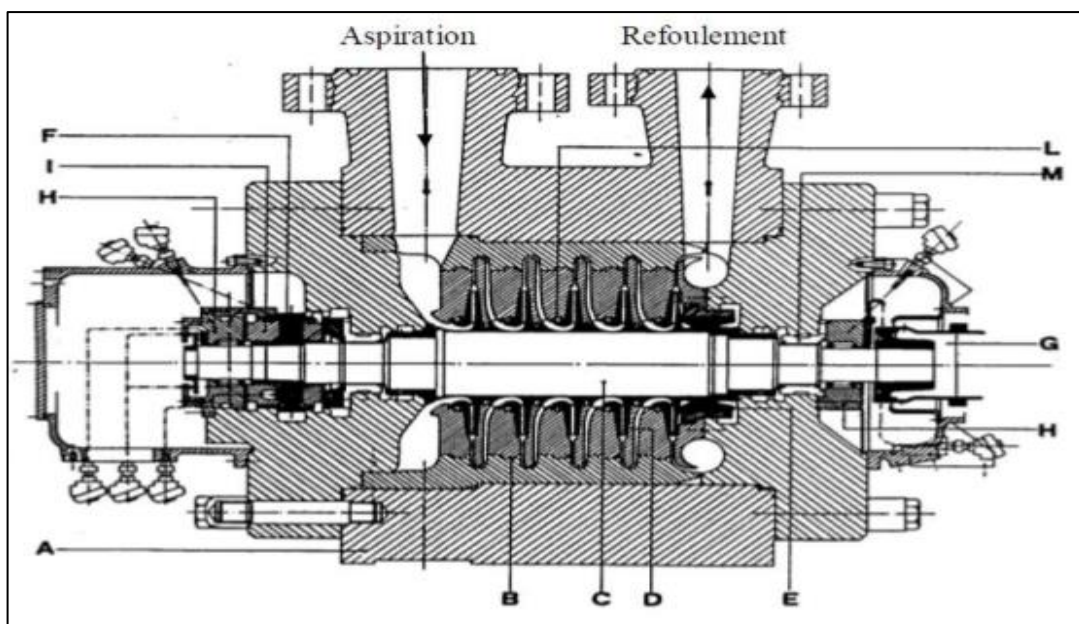


Figure I. 9. Compresseur centrifuge.

La construction d'un compresseur centrifuge comprend généralement les éléments suivants :

C'est un équipement doté d'un corps extérieur (A), contenant la partie du stator, dite ensemble de diaphragmes (B), où un rotor formé d'une ou plusieurs roues (D) est monté sur un arbre (C). Le tambour ou le piston d'équilibrage (E), le collet du palier de butée (F). Le rotor est entraîné par la machine motrice. Il repose sur des paliers porteurs (H) est ajusté dans sa position axiale par le palier de la butée (I), ainsi que des dispositifs d'étanchéité d'huile à labyrinthe (L) agissent sur le rotor.

b.2) Principe de fonctionnement d'un compresseur centrifuge

Le gaz est aspiré par le compresseur à travers la bride d'aspiration, il entre dans une chambre annulaire appelé volute d'aspiration, et converge ensuite uniformément vers le centre de toutes les directions radiales (figure I.11). Dans la chambre annulaire du côté opposée par rapport à la bride d'aspiration, il existe une ailette, dont le rôle est d'éviter la formation des tourbillons du gaz [27.28].



Figure I.10. Chambre annulaire

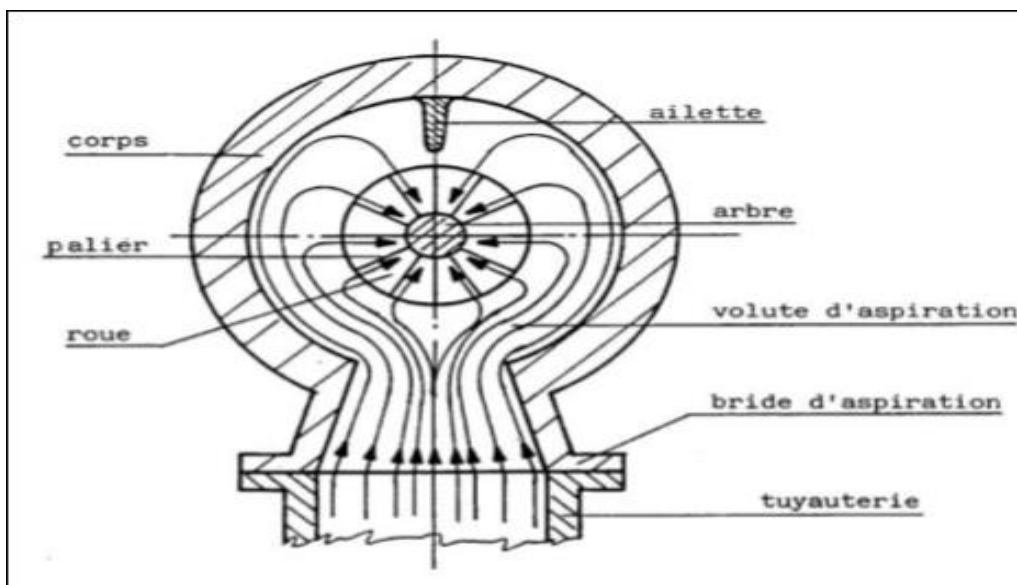


Figure I.11. Phase d'aspiration du gaz d'un compresseur centrifuge (Chambre annulaire).

Le gaz entre dans le diaphragme d'aspiration et donc aspiré par la première roue (figure I.12). La roue pousse le gaz vers la périphérie en augmentant sa vitesse et sa pression. La vitesse à la sortie de la roue aura une composante radiale et une autre composante tangentielle. A cause d'un mouvement en spirale, le gaz parcourt une chambre circulaire formée du diffuseur, où la vitesse diminue avec une augmentation de la pression [29].

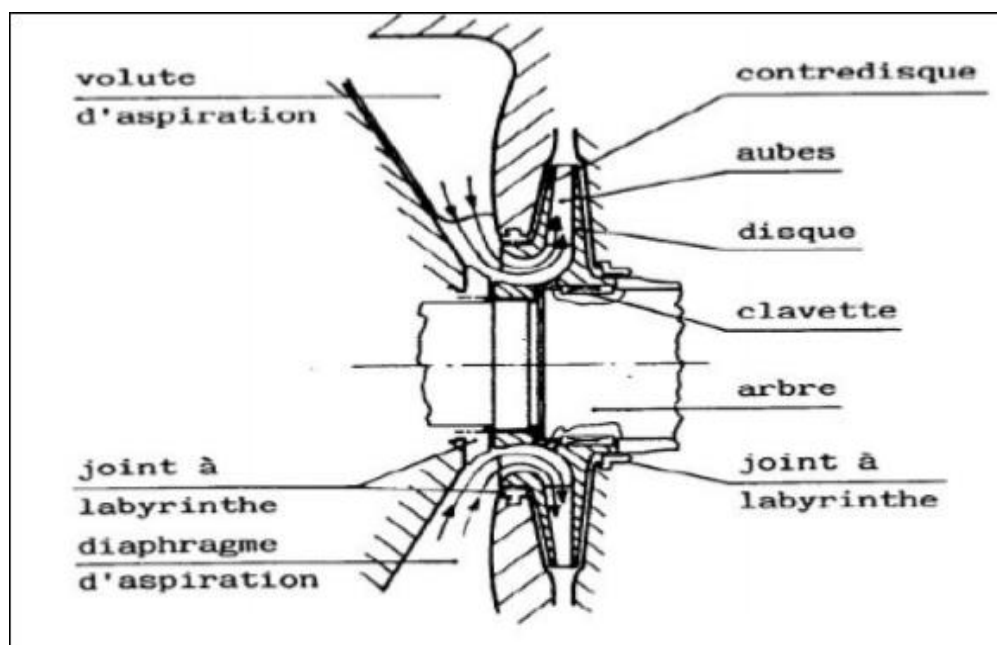


Figure I.12. Vue latérale de la roue d'un compresseur centrifuge.

Ensuite, le gaz parcourt le canal de retour, celui-ci est une chambre circulaire délimitée par deux anneaux formant le diaphragme intermédiaire où se trouvent les aubes (figure I.13) qui ont pour rôle d'orienter le gaz vers l'aspiration de la roue suivante.

La disposition des aubes est telle qu'elle permet de redresser le mouvement en spirale du gaz, de manière à obtenir une sortie radiale et une entrée axiale vers la roue suivante. Ensuite, le gaz est aspiré par la deuxième roue et ainsi de suite.

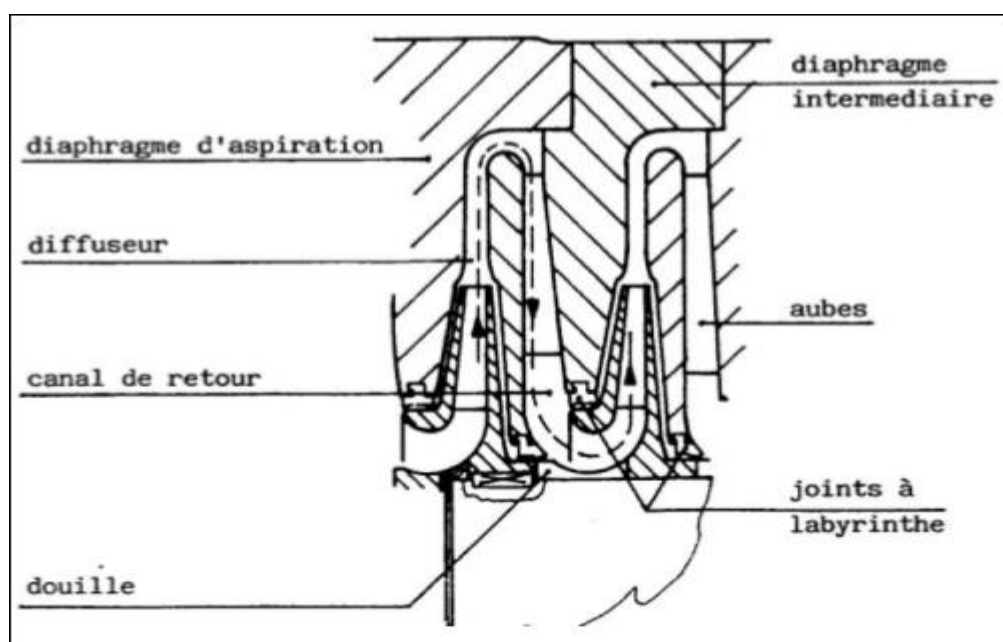


Figure I.13. Vue d'un diffuseur dans un compresseur centrifuge.

La dernière roue de l'étage envoie le gaz dans un diffuseur, qui mène à une chambre annulaire appelée volute de refoulement. Celle-ci collecte le gaz de la périphérie des diffuseurs en le dirigeant vers la bride de refoulement. Enfin près de cette dernière, on trouve une ailette (elle sert comme clapet) qui empêche le gaz de continuer à retourner dans la volute et de l'envoyer à la bride de refoulement [29] (figure I.14).

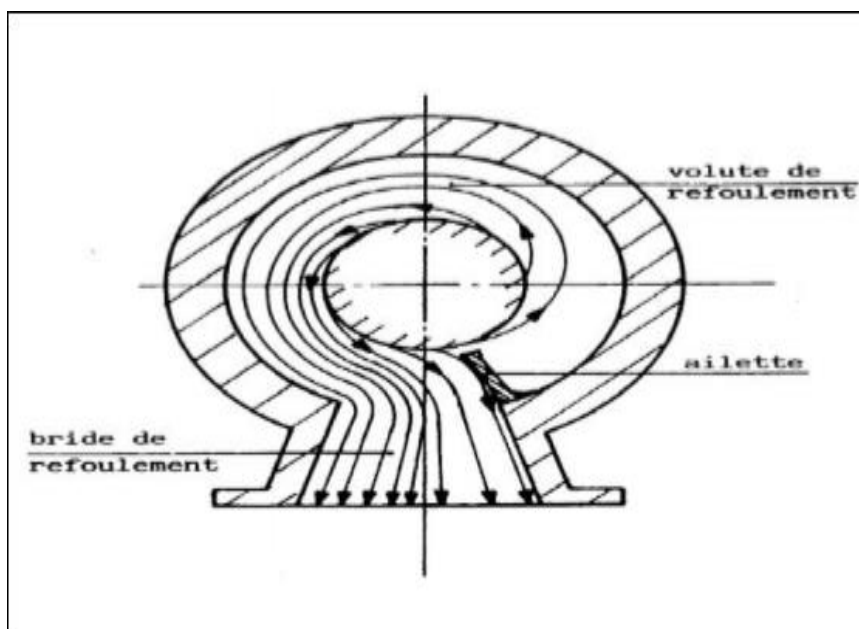


Figure I.14. Refoulement du gaz comprimé dans un compresseur centrifuge [30]

b.3) Paramètres et grandeurs physiques des compresseurs centrifuges

Comme pour les pompes centrifuges, les compresseurs centrifuges sont destinés à comprimer un fluide, mais néanmoins celui-ci est compressible. Ils développent une hauteur de fluide, exprimée généralement en mètre [31.32].

Dans les différentes transformations adiabatiques, poly tropiques, on peut distinguer :

➤ Hauteur réelle

La hauteur réelle d'un compresseur est le travail effectif ou réel d'échange entre le fluide et le milieu extérieur par unité de poids du gaz. $H_{réel}$, elle est définie par la relation suivante :

$$H_{réel} = \int_{p_1}^{p_2} V_p + L_a \quad (I.1)$$

Dans le cas où la transformation est adiabatique, la relation (I.1) exprime l'hypothèse de fonctionnement qui est très près des conditions réelles.

Seulement une partie de ce travail fourni. $H_{\text{réel}}$, est retrouvée sous forme d'accroissement d'énergie potentielle thermodynamique du fluide, elle est généralement exprimée par $\int_{p_1}^{p_2} V dp$, autrement dit par la hauteur polytropique.

L'autre partie de ce travail est dépensée pour vaincre les résistances passives, tels que : pertes de charge dues au frottement, choc, ...etc.

La connaissance de la variation de la grandeur enthalpie (h), qu'on peut déduire à partir des relevés de pression et de température du gaz à l'aspiration et au refoulement, permet d'évaluer la hauteur réelle $H_{\text{réel}}$ (travail spécifique).

➤ Hauteur adiabatique

La hauteur adiabatique H_a est donnée par la relation suivante :

$$H_a = \int_{p_1}^{p_2} V dp \quad (\text{I.2})$$

Avec : $PV = RT$ l'état de gaz

$PV^\gamma = Cte$ est l'équation de la compression.

Pour les gaz parfaits :

$$H_a = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \quad (\text{I.3})$$

Si le gaz n'est pas parfait (réel) l'équation d'état devient $PV = nRT$:

$$H_a = \frac{\gamma}{\gamma-1} nRT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \quad (\text{I.4})$$

Avec :

n : Coefficient de compressibilité moyen entre les états (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .

γ : Rapport des chaleurs spécifiques.

R : Constante spécifique gaz.

➤ **Hauteur polytropique :**

La hauteur polytropique H_p est exprimée par la relation suivante :

- Pour un gaz parfait :

$$H_p = \frac{Z}{Z-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{Z}{Z-1}} - 1 \right] \quad (I.5)$$

- Pour un gaz réel :

$$H_p = \frac{Z}{Z-1} nRT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{Z}{Z-1}} - 1 \right] \quad (I.6)$$

Avec ;

Z : est l'exposant polytropique

➤ **Le coefficient de débit :**

Le coefficient de débit est donné par la relation suivante :

$$Q = \frac{Q_v}{R_2^2 U_2} \quad (I.7)$$

Avec :

Q_v (m³/s) : Le débit volumique aspiré,
 R_2 (m) : Rayon extérieur de l'impulseur
 U_2 (m/s) : La vitesse périphérique.

➤ **Le taux de la pression :**

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} \quad (I.8)$$

➤ **Le rendement polytropique :**

Les courbes caractéristiques de performance utilisant ces coefficients deviennent plus faciles à manipuler.

$$\eta_p = \frac{\frac{RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{Z-1}{Z}} - 1 \right]}{\frac{Z-1}{Z}}}{J(h_2 - h_1)} \quad (I.9)$$

➤ **Le rendement adiabatique :**

$$\eta_a = \frac{RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{J(h_2 - h_1)} \quad (\text{I.10})$$

Dans le domaine des compresseurs, on utilise le rendement polytropique qui est une grandeur propre à la machine, et ceci à l'instar du rendement isentropique qui est fonction du rapport de pression.

➤ **La puissance absorbée par un compresseur centrifuge**

La puissance absorbée par le compresseur est donnée par la relation suivante :

$$P = Q_m W_{1,2} + P_f + P_m \quad (\text{I.11})$$

Dont ;

P_f : représente la puissance perdue en raison des fuites,

P_m : représente la puissance perdue à cause des pertes mécaniques,

$W_{1,2}$: le travail réel spécifique.

b.4) Les performances d'un compresseur centrifuge

Les courbes de performances sont fréquemment appelées également courbes (Pression/Volume) ou (Hauteur/Débit). Quelle qu'en soit leur dénomination, leur but est le même, à savoir représenter graphiquement comment la pression et la puissance varient avec le débit.

L'évaluation de la performance d'un compresseur ne se limitant généralement pas à un seul point de fonctionnement, on la caractérise au travers du champ donné par la Figure I.15. D'après cette figure, on remarque que le taux de compression est une fonction du débit corrigé pour une vitesse de rotation corrigée constante, auxquelles on superpose souvent les contours d'isorendement.

La limite aux faibles débits est le pompage, ce phénomène se caractérise par une instabilité d'écoulement (parfois jusqu'à inversion du débit), accompagnée des pulsations (oscillations) de pression de grande amplitude, pouvant à terme détériorer la machine.

Aux forts débits, la limite est le blocage, qui correspond à l'apparition d'une section sonique dans l'étage [33].

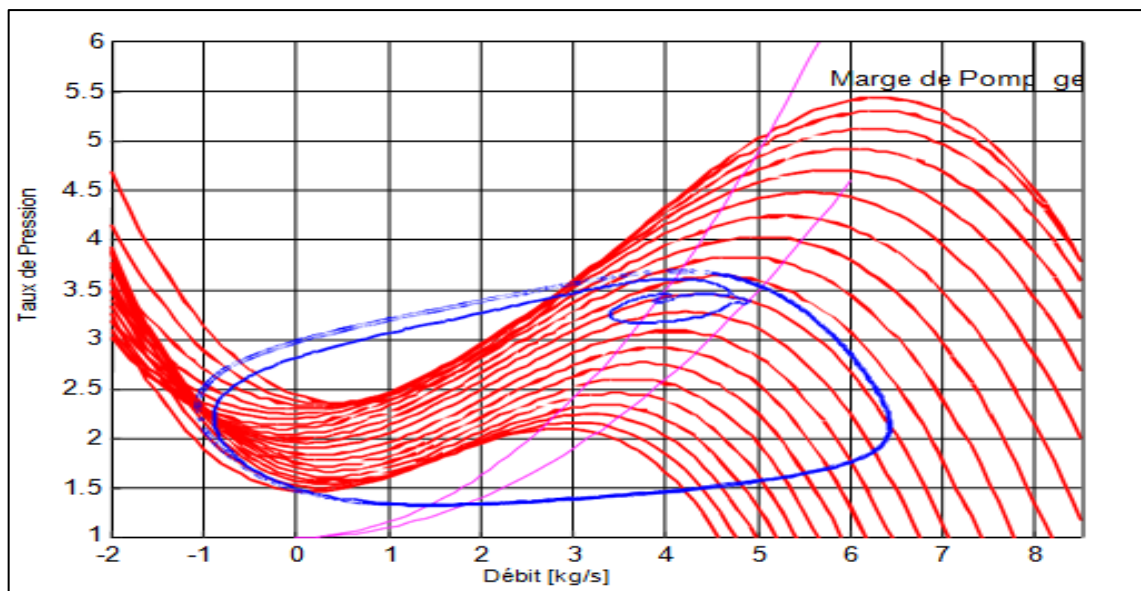


Figure I.15. Champs de fonctionnement d'un compresseur centrifuge [34].

Ces deux limites permettent d'introduire une autre mesure importante de la performance d'un compresseur centrifuge, il s'agit de la plage de fonctionnement. Elle se définit comme suite :

$$Plage = \frac{Q_{blocage} - Q_{pompage}}{Q_{nominale}} \tag{I.12}$$

Le débit de blocage est parfois utilisé au dénominateur de cette expression. On notera que la plage d'un compresseur diminue quand le taux de compression augmente.

b.5) Les instabilités aérodynamiques dans un compresseur centrifuge

Dans les systèmes de compression d'air, à savoir les compresseur centrifuges, les instabilités se produisent lors du fonctionnement près de la pression maximale. Cependant, l'efficacité maximale d'un tel système de compression se trouve près de cette région d'instabilité aérodynamique peut apparaître : le décrochage tournant (*rotating stall*) ainsi que le pompage (*surge*).

➤ **Le phénomène de pompage d'un compresseur centrifuge**

Le pompage est un phénomène d'instabilité qui se produit quand le débit est bas et un taux de compression est très élevé, pour une vitesse de compression donnée. Quand un compresseur centrifuge atteint sa limite de pompage, l'écoulement du gaz change soudainement sa direction vers l'arrière donc du refoulement vers l'aspiration à travers les

roues à aubes de rotation. Ce mode violent d'instabilité cause une panne totale du système de compression et une perte énergétique de pression en conséquence.

Le phénomène de pompage est donc une instabilité mono dimensionnelle, caractérisée par des pulsations et oscillations de pression (Figure I.16), et de débit affectant le système de compression de manière globale. Il s'établit de manière périodique, avec une fréquence généralement basse (<50Hz) [35]. Les variations de pression induites par le fonctionnement dans ce régime génèrent des contraintes mécaniques importantes pouvant endommager les composants du compresseur (rupture des pales par fatigue, dommages aux roulements, joints et autres pièces du compresseur). Le fonctionnement en régime de pompage peut également générer des déplacements axiaux de l'arbre tournant. Pour ces raisons, le pompage doit être évité pendant le fonctionnement du compresseur centrifuge.

Dans un système de compression l'énergie mécanique entrante est transformée en énergie de pression du fluide par un dispositif mécanique rotatoire et fixe complexe. Le fluide pressurisé, fourni par le système de compression est par la suite stocké dans une chambre à grand volume. Le mécanisme de pressurisation doit toujours développer la pression suffisante, qui alternativement doit maintenir la pression du fluide dans le réseau de refoulement à la valeur désirée. Une perte soudaine dans les capacités du système de compression pour stocker le fluide dans la chambre de refoulement cause une instabilité du débit appelée aussi pompage [36].

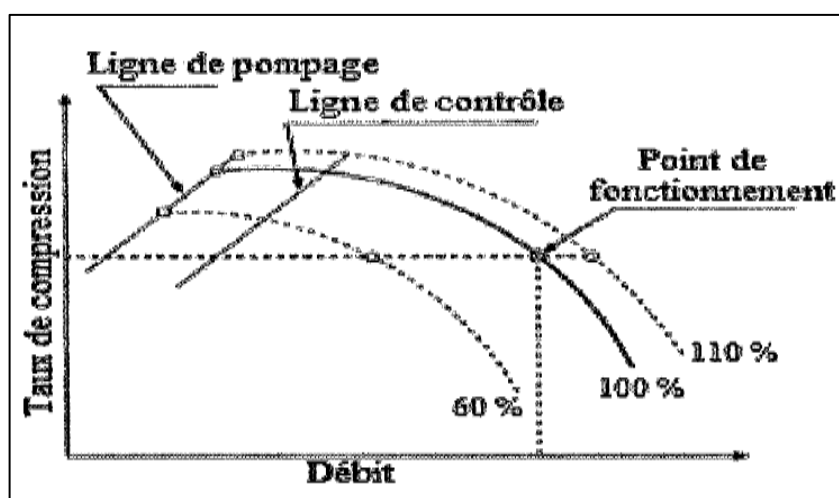


Figure I.17. Limite du pompage du compresseur

➤ Le phénomène de décrochage tournant

Le décrochage tournant, est un phénomène généralement bidimensionnel caractérisé par l'apparition d'une cellule de décrochage bloquant l'écoulement dans un ou plusieurs passages d'aube.

Ce blocage résulte en une chute du débit massique en sortie du compresseur, et donc du rapport de pression, expliquant qu'il est souvent à l'origine du pompage. Le blocage engendre également la propagation de la cellule dans le rotor à une fraction, généralement (40-70)%, de la vitesse de rotation du compresseur [37].

La cellule bloque un passage d'aube, déviant ainsi les lignes de courant vers une grande incidence d'un côté (celles à gauche), d'une moins grande de l'autre. Les lignes de courant ayant une plus grande incidence vont alors créer une nouvelle cellule déviant de la même manière l'écoulement, en supprimant ainsi la première cellule de décrochage.

La cellule va se propager de cette manière dans la direction opposée à la direction de rotation du compresseur, soit donc à une fraction de sa vitesse dans le repère stationnaire.

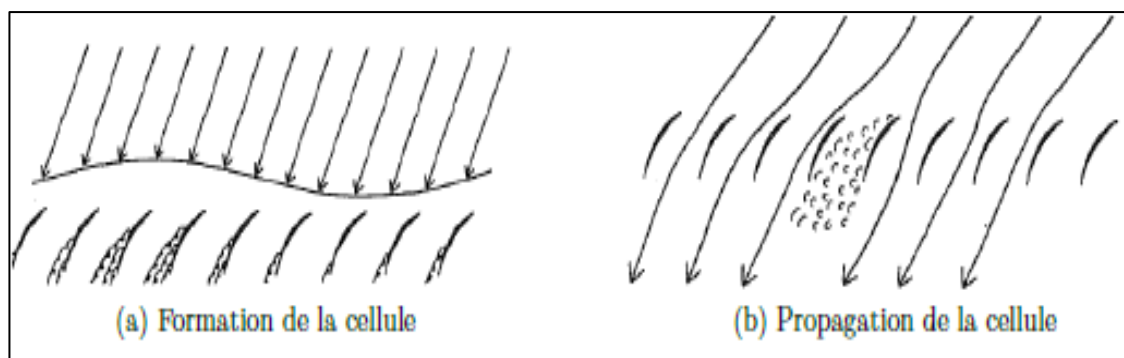


Figure I.17. Formation et propagation d'une cellule de décrochage

Donc, le décrochage tournant est un phénomène d'instabilité aérodynamique, caractérisée par la présence d'une ou plusieurs zones de fluide décollées (appelées cellules) présentes dans l'écoulement, et tournant circonférentiellement à une fraction de la vitesse de rotation du rotor.

L'entrée dans le décrochage tournant se caractérise par une forte diminution du débit (blocage de certains canaux), et du taux de compression [37].

➤ Limites de pompage et de contrôle

La majorité des techniques de contrôle de pompage limitent le fonctionnement du compresseur aux débits au-dessus d'une ligne de contrôle définie par la marge de pompage pour un compresseur particulier [38].

Par mesure de sécurité, une ligne de contrôle de pompage est choisie, normalement environ 10% à la droite de la ligne de pompage définie par la caractéristique du compresseur (Figure I.18).

Une certaine marge de sécurité est nécessaire en raison des changements soudains dans les paramètres du système qui peuvent provoquer le phénomène de pompage du compresseur [39].

Aujourd'hui, la surveillance du phénomène de pompage est le principe le plus utilisé dans l'industrie du gaz. Ceci permet au compresseur d'avoir un débit massique suffisant pour éviter le pompage, et de fonctionner à une valeur de consigne désirée.

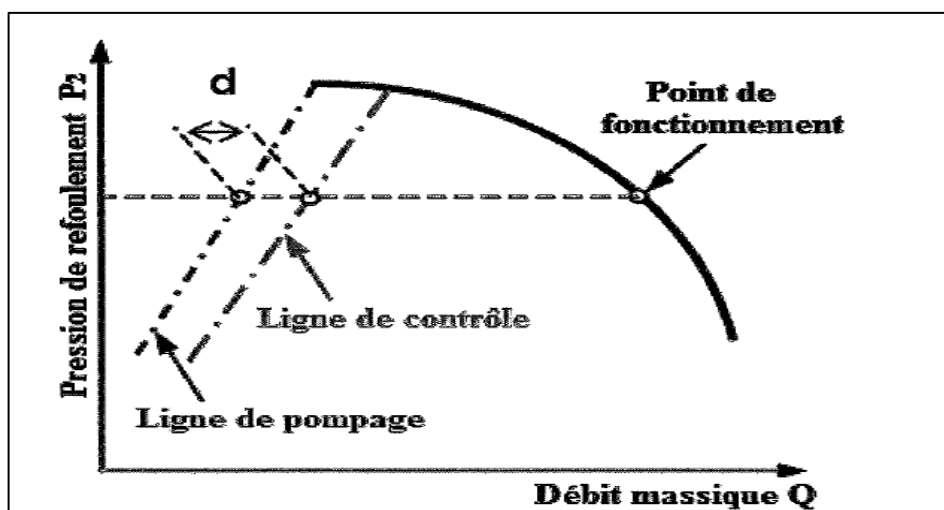


Figure I.18. Ligne de pompage et ligne de contrôle [40]

La ligne de pompage se situe dans la zone proche à la plus haute performance du compresseur, il est donc souhaitable de faire fonctionner le système très proche de cette dernière.

Cependant, de grands problèmes peuvent se poser si le système rentre dans le pompage, l'évitement du pompage est mis en application pour s'assurer que ceci ne se produit pas. Si toutes les caractéristiques du compresseur sont connues et s'il n'y a pas d'erreurs (par exemple bruit) dans les mesures, la ligne de pompage pourrait être utilisée comme une référence de contrôle.

➤ Conséquences du phénomène de pompage sur compresseur

Pompage provoque une surchauffe et des dommages, il peut être assez violent pour endommager un compresseur en quelques cycles. Le pompage est un flux cyclique, de fortes vibrations, des chocs de pression et l'augmentation rapide de la température [41].

Le décollement tournant et le pompage sont les conditions de fonctionnement critiques qui limitent la zone de stabilité à des débits massiques faibles dans une caractéristique du compresseur. Nous observons plusieurs implications physiques en tant qu'un chauffage rapide des ailettes, l'augmentation de la température de sortie du compresseur, d'autres charges périodiques, les vibrations et la fatigue des ailettes qui peuvent conduire à la réduction de longévité matérielle et aux dommages graves à la machine [42].

Les dommages mécaniques résultant du pompage peuvent être étendues. Juste avant le pompage lui-même, il y aura un décrochage tournant, ce qui entraînera le rotor à vibrer à des amplitudes de trois à quatre fois plus que les niveaux normaux. Ces vibrations peuvent endommager les joints à labyrinthe autour de l'axe de la roue et endommager le joint sec du gaz. L'inversion soudaine de l'écoulement provoque une forte poussée d'inertie sur le rotor, ce qui risque d'endommager les paliers de butée. Il y aura des pulsations de débit et des vibrations à haute fréquence (également en raison de la poussée inversée du débit) qui pourraient endommager davantage les joints secs et le labyrinthe. Un bruit très fort et désagréable résulte de ce phénomène de pompage.

Donc les conséquences du pompage peuvent être alors récapitulées comme suit :

- La création des jeux internes sur la roue à aubes.
- Les dommages aux joints de compression en bout d'arbre.
- Les dommages sur la butée du compresseur.
- Les dommages au palier radial du compresseur.
- Les frottements contre le diaphragme stationnaire.
- L'échec d'accouplement d'arbre.

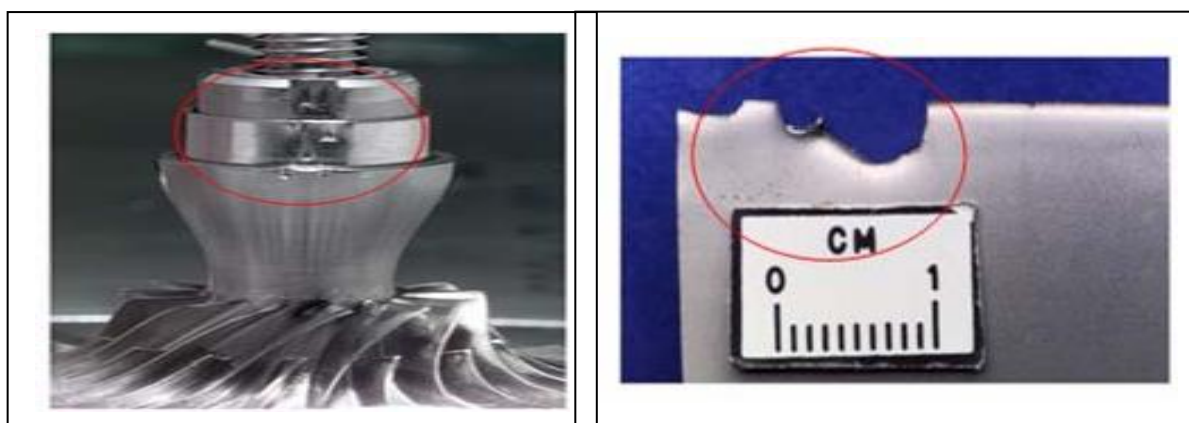


Figure I.19. Conséquence de pompage [34].

I.4. Domaine d'utilisation des compresseurs

Le choix d'un compresseur alternatif ou centrifuge sera tributaire des débits et pressions que l'on souhaite obtenir. D'autres paramètres seront à prendre en compte pour le choix final (taille, poids, prix,... etc.).

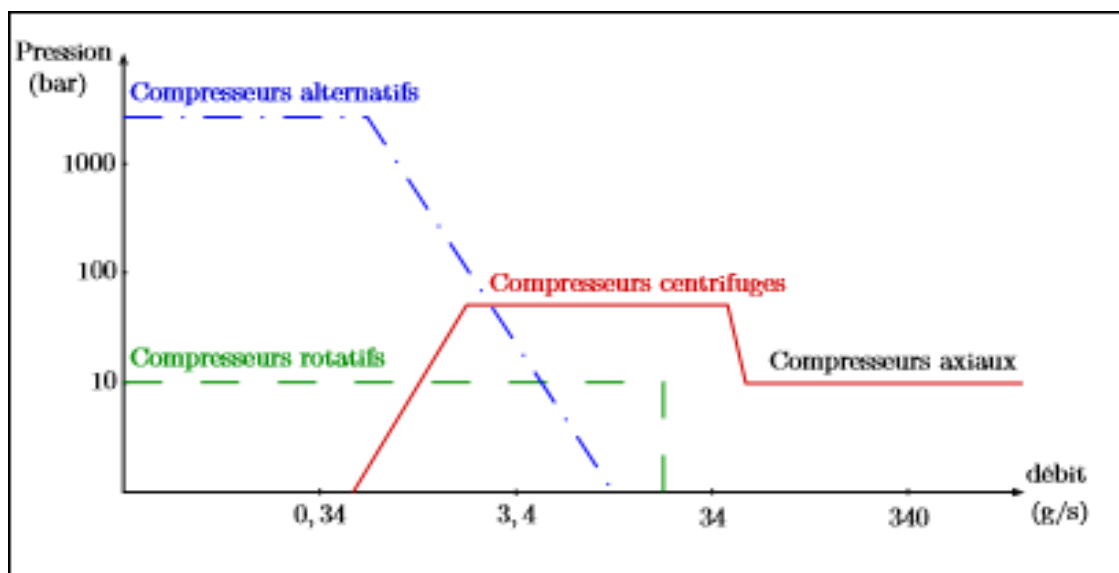


Figure I.20. Type de compresseur en fonction de débit et de la pression [6].

I.5. Conclusion

La compression en général, peut être imposée par la nécessité technique d'un système de déplacer une certaine quantité de gaz sous pression, vers un autre système à une autre pression plus élevée. Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents types d'appareils qui permettent d'effectuer cette opération.

Les organes mécaniques et leur domaine d'utilisation. Suivant les fonctionnements et la méthode d'installation de chaque type, en particulier, la construction, les paramètres de fonctionnement, ainsi que les phénomènes d'instabilités des compresseurs centrifuges, ont été présentés dans cette partie.

Chapitre II

Les paliers et leur lubrification

Sommaire

II.1. Introduction.....	29
II.2 Classification des paliers.....	29
II.2.1. Paliers de roulements.....	29
II.2.2. Paliers secs.....	30
II.2.3. Paliers poreux.....	30
II.2.4. Paliers magnétiques.....	31
II.2.5. Les paliers fluides.....	33
II.2.5.1. Paliers hydrodynamiques.....	33
A. Paliers à géométrie variable.....	34
B. Paliers à géométrie fixe.....	36
a. Les Paliers multilobés.....	36
b. Les Paliers à films amortisseurs.....	37
c. Les paliers à arc partiel.....	38
d. Les paliers lisses cylindriques.....	39
d.1. Caractéristiques géométriques d'un palier lisse.....	40
d.2. les types des paliers lisses cylindriques.....	41
d.3. Principe de fonctionnement d'un palier lisse.....	41
d.4. Les avantages et les inconvénients des paliers lisses.....	42
d.5. Les différents régimes de lubrification des paliers.....	42
A. le régime de lubrification avec contact.....	43
B. Le régime de lubrification hydrodynamique.....	44
C. le régime de lubrification mixte.....	44
II.2.5.2. Paliers hydrostatiques.....	45
II.2.5.3. Paliers hybrides.....	45
II.3. Défauts spécifiques aux paliers lisses.....	45
II.3.1. Défaut d'Instabilité de palier lisse.....	46
II.3.2. Défaut de mésalignement dans les paliers lisses.....	47
II.3. 3. Défauts de lubrification-Instabilité.....	47
II.3.4. Défaut de jeu du palier lisse.....	48
II.3. 5. Phénomène de tourbillonnement d'huile.....	49
II.3.6. Frottement et usure de contact.....	50
II. 3.7. Mauvais serrage mécanique (jeu de fondation).....	51
II.4. Conclusion.....	51

II.1. Introduction

Le problème du comportement des paliers est une préoccupation majeure pour les fabricants des machines tournantes. Dans le cas des transmissions « haute puissance », les industriels font souvent recours aux paliers pour le support des lignes d'arbres.

Le choix d'un type de support est une décision qui doit être prise dans la première phase du processus de conception.

Deux grandes familles de paliers existent : les paliers lisses et les paliers à roulements. Dans les premiers, l'arbre prend appui sur un coussinet et est séparé de celui-ci par un film lubrifiant ; dans les seconds, des corps roulants (billes ou rouleaux) séparent la bague en rotation de l'alésage extérieur. Selon la direction de la charge par rapport à l'arbre en rotation, on distingue les paliers porteurs pour lesquels la charge est radiale, généralement appelés paliers, des paliers de butée pour lesquels la charge est axiale.

L'objet essentiel de ce chapitre est de présenter les différents types de supports utilisés pour le guidage des lignes d'arbres de machines tournantes, et de présenter une description des différents régimes de lubrification rencontrés dans les systèmes lubrifiés.

II.2 Classification des paliers [43].

Dans la pratique, les principaux supports sont :

- Les paliers de roulements,
- Les paliers secs,
- Les paliers poreux,
- Les paliers magnétiques,
- Les paliers fluides (hydrodynamique, hydrostatique et hybride).

II.2.1. Paliers de roulements

Dans un palier à roulements le glissement de l'arbre sur le coussinet est remplacé par le roulement de corps intermédiaires (billes, rouleaux). Ils supportent de plus fortes charges tout en réduisant l'usure et le frottement à cause de leur coefficient de frottement très faible au démarrage. Les avantages et inconvénients des paliers à roulements sont:

a. Avantages

- ✓ Installation simple et facile à remplacer,
- ✓ Durée de vie plus grande,

- ✓ Possibilité de graissage à vie,
- ✓ Faible coût,
- ✓ Possibilité de supporter des charges combinées,
- ✓ Supportent mieux les interruptions temporaires de lubrification,
- ✓ Assurent un meilleur alignement radial et axial,
- ✓ Présentent un faible couple au démarrage même à basse température.

b. Inconvénients

- ✓ Problèmes de fatigue plus importants,
- ✓ Faible capacité d'amortissement,
- ✓ Encombrement radial important,
- ✓ Générateur de bruits,
- ✓ Fréquence de rotation limitée,
- ✓ Diamètre nominal limité.

II.2.2. Paliers secs

Ces paliers sont généralement constitués d'une matrice (résine, métal, carbone) imprégnée de graphite. Ils sont utilisés sans apport extérieur de lubrifiant. Le frottement à sec est particulièrement dangereux pour les organes qui y sont soumis.

Le dégagement de chaleur peut provoquer une amorce de fusion entre les surfaces en contact et aboutir au grippage. Ils ne sont utilisés que pour des systèmes fonctionnant rarement ou à vitesse réduite et faible charge, et doivent être envisagés dans toute application où la présence et le maintien du film lubrifiant est impossible (vide spatial, par exemple) [44].

II.2.3. Paliers poreux

Les paliers à coussinets poreux sont dits autolubrifiants car c'est le coussinet imbibé d'huile qui joue le rôle de réservoir de lubrifiant [45]. La couche auto-lubrifiée est constituée par une poudre frittée à haute température (bronze, fer, cuivre). Ces paliers comportent des pores remplis d'huile avec un volume qui représente de 16 à 36% du volume total. Dans un palier poreux, l'huile circule d'une part dans le jeu, circonférentiellement et axialement, et d'autre part dans le coussinet, de la zone de pression élevée vers la zone de basse pression (figure II.1). L'utilisation de ces paliers est limitée par la température de fonctionnement.

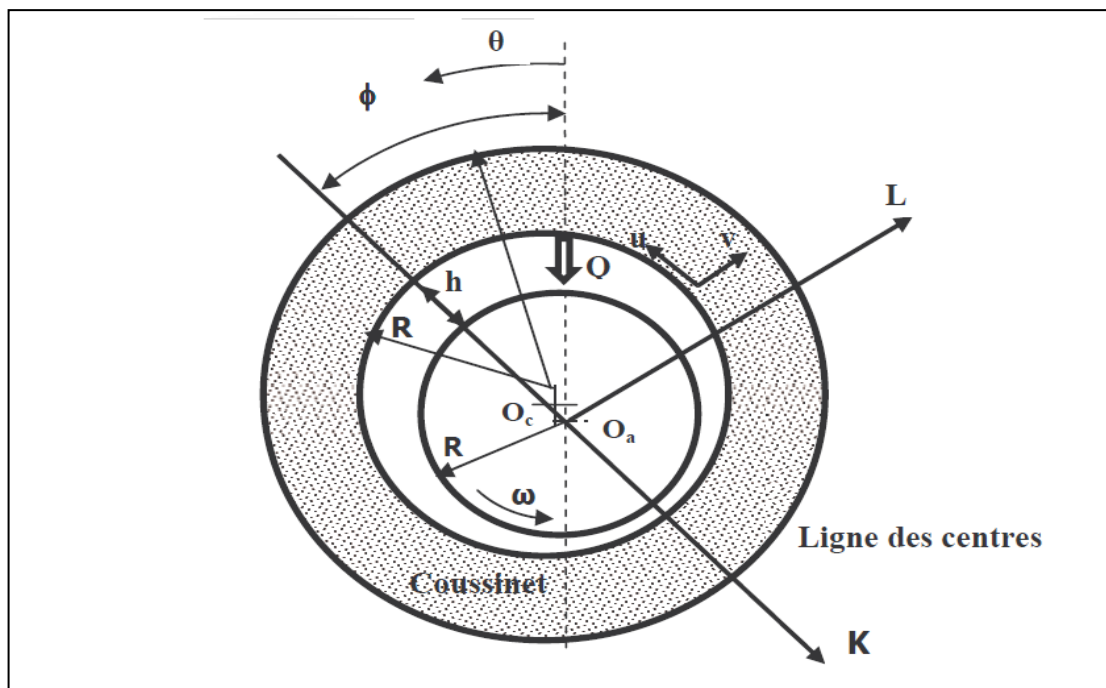


Figure II.1. Coupe médiane d'un palier poreux [45].

Les avantages et les inconvénients de ce type de palier sont [44] :

a. Avantages

- ✓ L'absence de l'alimentation du lubrifiant permet d'avoir un montage simple,
- ✓ Faible coût de fabrication du coussinet.

b. Inconvénients

- ✓ Ils ne supportent pas les grandes vitesses et les grandes charges,
- ✓ Un couple de démarrage faible,
- ✓ Ils nécessitent un grand couple au démarrage à des basses températures.

II.2.4 Paliers magnétiques

Les paliers magnétiques sont utilisés lorsque les autres paliers ont atteint leurs limites. Ils permettent à une partie mobile de faire un mouvement sans frottement ni contact, Ils fonctionnent grâce aux interactions magnétiques engendrées entre la pièce mobile et la pièce statique. D'une manière générale les paliers magnétiques peuvent être actifs ou la lévitation magnétique est produite par des électro-aimants contrôlés par des systèmes à *feed-back* électronique, ou passifs où la lévitation magnétique est obtenue par des aimants permanents, cette dernière ne nécessite pas des systèmes de contrôle. Leur domaine de prédilection concerne les applications à très haute vitesse de rotation, celles pour lesquelles il faut

minimiser les pertes, éviter l'usure, ne pas polluer un environnement sensible par des poussières ou un lubrifiant, supprimer les vibrations, fonctionner à très basse ou très haute température ou limiter la maintenance [46].

Plusieurs types de paliers magnétiques sont utilisés. Actuellement, l'industrie utilise essentiellement des paliers magnétiques "actifs". Les paliers magnétiques actifs permettent la sustentation sans contact d'un rotor tournant à très haute vitesse, cette technologie de pointe est déjà utilisée dans des produits du commerce, surtout pour des applications où toute lubrification est interdite (turbocompresseurs, applications dans le vide). Ces paliers acceptent des charges importantes et font actuellement concurrence aux paliers hydrodynamiques. Cependant, cette technologie est lourde à mettre en œuvre et son prix de revient est très élevé [47].

a. Avantages des paliers magnétiques [48].

- ✓ Système sans lubrification
- ✓ Applications de grandes vitesses
- ✓ Atténuation des vibrations
- ✓ Fiabilité élevée, très longue durée de vie
- ✓ Haute précision

b. Inconvénients des paliers magnétiques [48].

- ✓ surcharge inadmissible
- ✓ Marge de mouvement
- ✓ Coût de conception
- ✓ Taille et poids
- ✓ Grande complexité



Figure II.2. Palier magnétique.

II.2.5 Les paliers fluides

Il existe deux grandes classes de paliers fluides :

- ✓ les paliers hydrodynamiques où la portance résulte de la géométrie du film lubrifiant et de la cinématique des surfaces
- ✓ paliers hydrostatiques où la portance est principalement due à l'existence d'une source extérieure de fluide sous pression.

II.2.5.1 Paliers hydrodynamiques

Les Paliers hydrodynamiques (HD) (Figure II.3), travaillent dans un régime hydrodynamique où le film fluide sépare totalement les surfaces sous un contact supposé surfacique (arbre/coussinet de forme cylindrique sans déformation). Ils sont fréquemment utilisés pour supporter des charges radiales, ainsi que pour le guidage des lignes d'arbre de machines tournantes [49] telles que : les moteurs thermiques, compresseurs, turbomachines, alternateurs, réducteurs, etc...

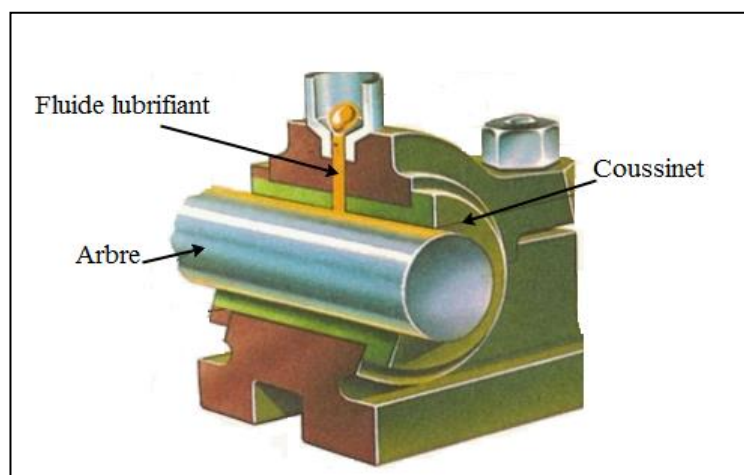


Figure II.3. Palier hydrodynamique typique.

Ces paliers sont conçus pour fonctionner dans des conditions sévères (charges et fréquences de rotations élevées).

Par conséquent, pour remplir leur fonction dans de parfaites conditions, les paliers hydrodynamiques doivent être soigneusement conçus [44].

Il existe deux types de configuration de paliers hydrodynamiques

- ✓ Paliers à géométrie variable.
- ✓ Paliers à géométrie fixe.

A. Paliers à géométrie variable

Communément appelées « paliers à patins oscillants », se sont des paliers réglables par leur mode de fonctionnement (Figures II.4, II.5). Ils sont composés de photographie d'un palier à trois patins oscillants et plusieurs patins identiques ou non, individuellement, articulés autour de pivots situés généralement sur un cercle appelé cercle des pivots [50].

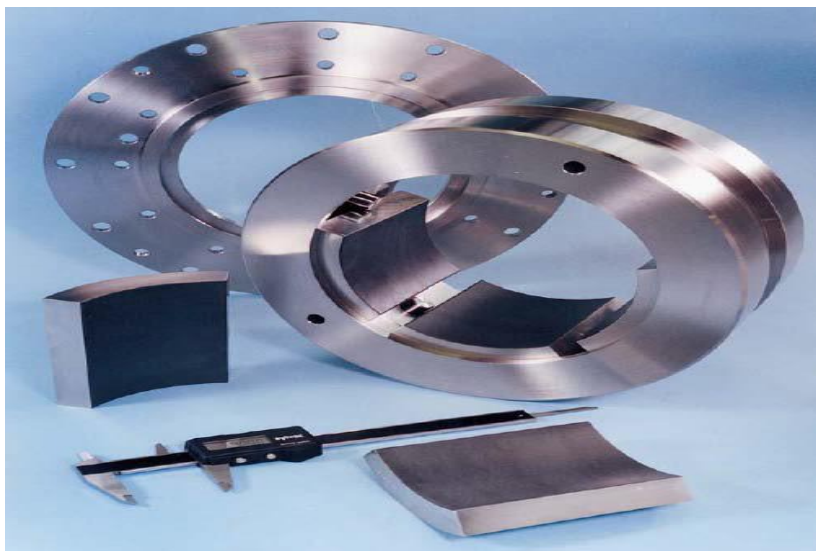


Figure II.4. Palier à 3 patins.

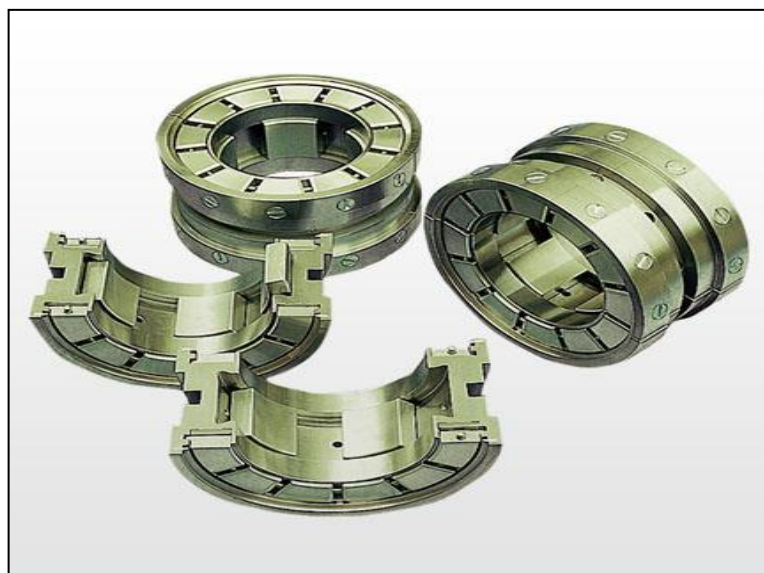


Figure II.5. Palier à plusieurs patins [51].

Les caractéristiques géométriques d'un palier à trois patins (Figure II.6) ainsi que les principaux paramètres sont les suivant :

- ✓ Le nombre de patins N .

- ✓ Le rayon de l'arbre R_a .
- ✓ Le rayon de cercle des pivots R_b .
- ✓ L'amplitude angulaire β , la largeur L , le rayon de courbure R_p , la masse équivalente de chaque patin

$$M = I/R_p$$

où I est le moment d'inertie du patin par rapport à son pivot.

- ✓ La position des pivots φ_i .
- ✓ Le jeu d'usinage du patin

$$C_p R_p - R_a$$

- ✓ Le rapport α / β qui définit la position angulaire du pivot,
- ✓ La distance a qui sépare le centre géométrique du palier du centre de courbure du patin,
- ✓ Le coefficient de pré-charge géométrique

$$m = a/C_p$$

Sous une charge nulle, le centre de l'arbre O_a et celui du palier O sont confondus. Si le coefficient de précharge géométrique m est nul, il n'y a pas de génération de pression hydrodynamique. Les patins sont alors en position d'équilibre. Il y a alors un risque de contact entre l'extrémité du patin et l'arbre. Par contre, lorsque le coefficient de pré-charge géométrique est différent de zéro, tous les patins sont hydro-dynamiquement chargés.

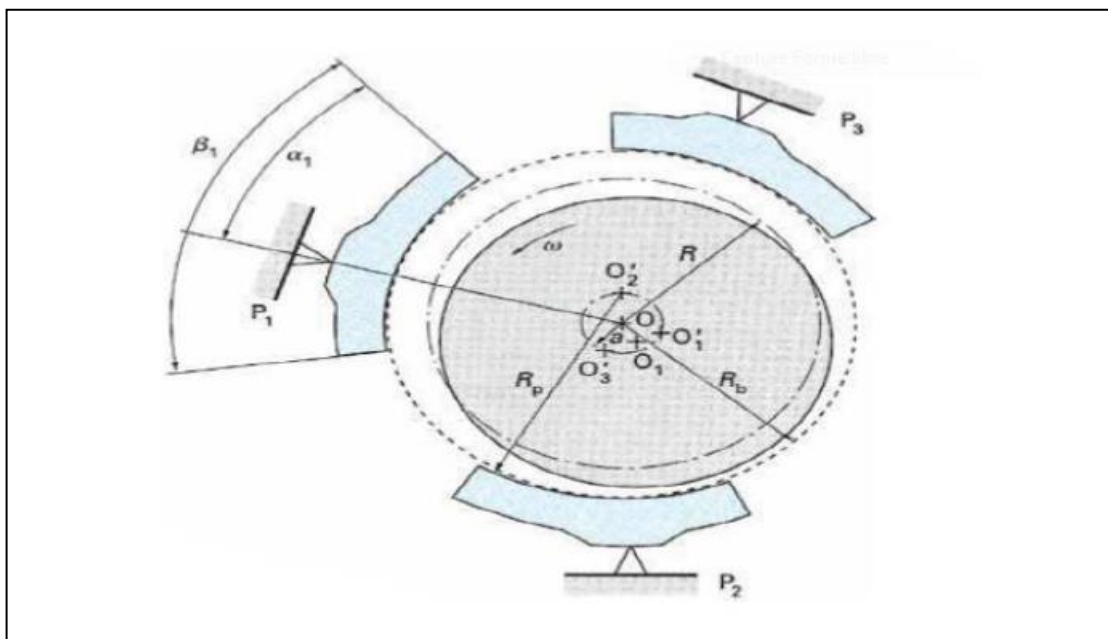


Figure II.6. Caractéristiques géométriques d'un palier à trois patins [52].

Le paramètre de précharge géométrique est donc très important puisqu'il assure, comme dans le cas des paliers à géométrie fixe, une bonne rigidité du système sous charge nulle. Lorsque le palier est chargé, l'arbre est excentré.

Les patins quant à eux tournent autour de leurs pivots.

Ils occupent alors une position d'équilibre statique telle que l'action hydrodynamique exercée sur chaque patin par son pivot et que la résultante de toutes les forces \vec{F}_1 soit égale et opposée à la charge statique extérieure \vec{W}_0 supportée par le palier. En régime dynamique, les patins peuvent suivre le mouvement de l'arbre, ce qui est à l'origine du palier.

B. Paliers à géométrie fixe

a. Les Paliers multilobés

Le palier multilobé est parfois utilisé pour obtenir un débit accru de lubrifiant. Les discontinuités dans le film d'huile semblent donner à ce palier l'avantage d'une grande stabilité.

Un palier à trois lobes tel que représenté par la figure II.7, on peut distinguer deux conditions de fonctionnement : position centrée (figure II.7.a) et excentrée (figure II.7.b).

Le coussinet est constitué de trois lobes d'amplitude circonférentielle β_i de longueur axiale L , de rayon de courbure RL et de centre de courbure O_i . Les centres de courbure O_i des lobes sont situés sur un cercle de rayon a et de centre O .

Le rôle de précharge géométrique apparaît clairement sur les figures (II.7.a) et (II.7.b) en position centrée. Il existe toujours une suite d'espaces convergents divergents répartis autour de l'arbre, ce qui entraîne une succession de coins d'huile qui vont opposer une certaine résistance à tout déplacement du centre de l'arbre étant en position centrée, on définit deux types de paliers à lobe selon le lieu de la ligne des centres $O_i O$ vis-à-vis des lobes. Si cette ligne des centres est l'axe de symétrie du lobe. Le palier est dit à lobes symétriques (figure II.7.A), dans le cas contraire il est dit à lobes asymétriques (figure II.7.B) [53].

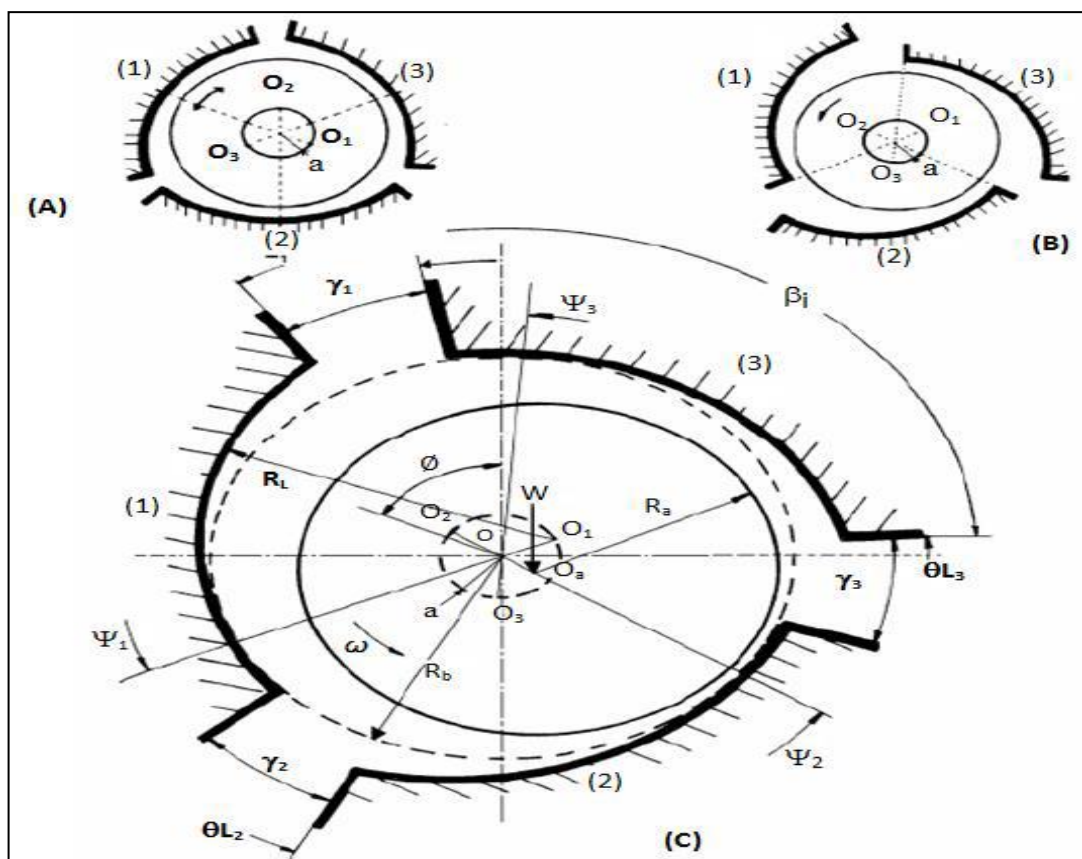


Figure II.7. Schématisation d'un palier à trois lobes [50]

- A) Lobes symétriques (palier centré).
 B) Lobes asymétriques (palier centré).
 C) Cas général : Palier excentré.

b. Les Paliers à films amortisseurs

L'idée de base de ce type de palier est de monter l'ensemble rotor-roulement à billes dans un palier fluide. Sur la figure (II.8), le guidage en rotation de l'arbre est assuré par le roulement, alors que le palier fluide joue le rôle d'un amortisseur visqueux. La bague intermédiaire (fixe en rotation) permet de réduire le mouvement de la bague extérieure du roulement dans le palier à une translation, deux technologies des paliers à film amortisseur peuvent être envisagées :

- ✓ Montage d'un ressort en parallèle avec le film amortisseur permettant de donner une certaine raideur au palier.
- ✓ Film amortisseur libre (sans ressort).

Ce type de palier est surtout utilisé pour le guidage des rotors de turbines tournantes à grande vitesses, tels que les turbo-réacteurs d'avion qui utilisent fréquemment des paliers de roulement ne permettent pas d'atténuer les amplitudes de vibration surtout lors du passage des

vitesse critiques. En effet, il a été montré expérimentalement [54] que pour un rotor monté dans deux paliers de roulement rigides, le passage de la vitesse critique est très délicat car les amplitudes de vibration sont trop importantes. Celles-ci peuvent être atténuées si le rotor est monté sur des paliers à film amortisseur.

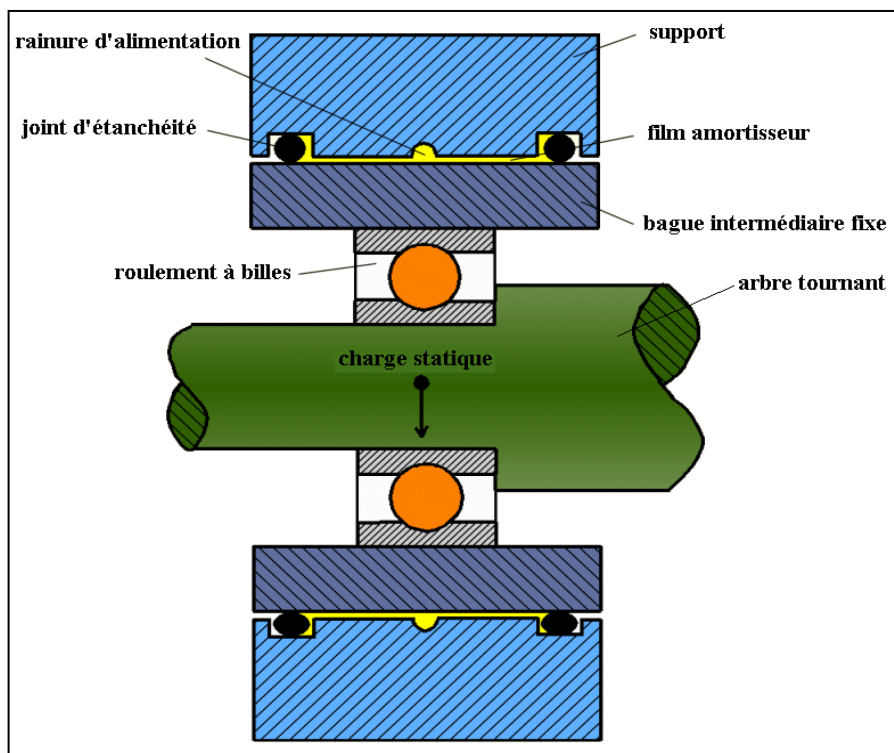


Figure II.8. Palier à film amortisseur [55]

c. Les paliers à arc partiel

Les paliers lisses cylindriques ou à arc partiel (figure II.9) faiblement chargés à vitesse élevée présentent de grands risques d'instabilités. L'idée d'améliorer la stabilité du palier en modifiant son profil de manière à augmenter l'excentricité de fonctionnement, c'est-à-dire de la précharge. En effet, de vérifier expérimentalement que l'existence d'une discontinuité dans la géométrie à la surface du coussinet pouvait améliorer la stabilité du palier... [56]

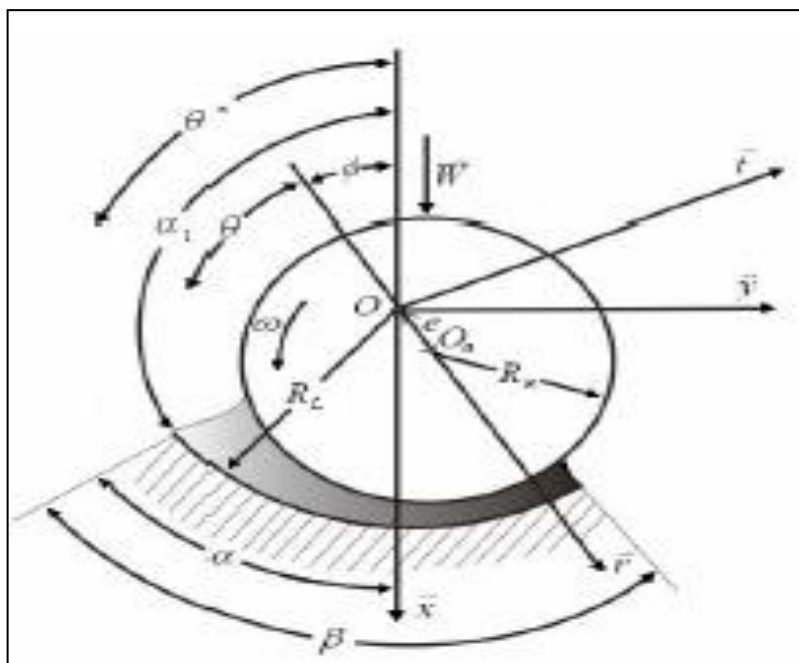


Figure II.9. Palier à arc partiel [57].

d. Les paliers lisses cylindriques

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés, les plus simples sont constitués d'un arbre qui tourne à l'intérieur d'un coussinet complet (amplitude angulaire 360°).

Sous l'application d'une charge, les centres du coussinet et de l'arbre ne coïncident plus et il existe un coin convergent-divergent dans le film. La rotation de l'arbre entraîne du fluide dans le coin convergent et crée un champ de pression qui s'oppose à la charge en lui assurant l'équilibre.

Ces deux éléments sont alors totalement séparés par le film lubrifiant (figure II.10).

Dans certains mécanismes, ils correspondent à la meilleure solution technologique existant actuellement.

On les rencontre dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, les alternateurs, les réducteurs,etc .



Figure II.10. Coussinets [50]

d.1. Caractéristiques géométriques d'un palier lisse

Un palier lisse est constitué de deux éléments, l'arbre de rayon R_a et le coussinet de rayon R_c et de longueur L (figure II.11).

Un palier lisse est donc caractérisé par trois grandeurs.

- ✓ Le jeu radial

$$C = R_c - R_a$$

- ✓ Le jeu relatif (C/R) qui est de l'ordre de 0,001.
- ✓ Le rapport (L/D) de la longueur au diamètre du palier.

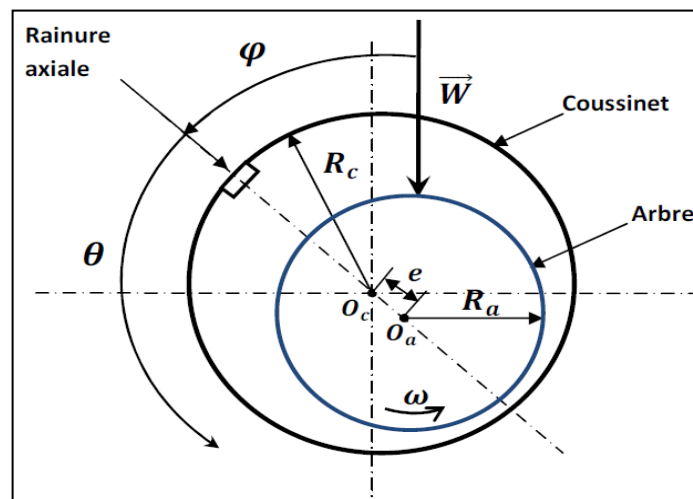


Figure II.11. Section droite d'un palier lisse [58].

d.2. les types des paliers lisses cylindriques

Selon leurs diamètres les paliers lisses cylindriques sont divisés en trois types, les paliers infiniment courts, infiniment longs et les paliers de longueur finie [43].

A. Palier court

Un palier est dit court lorsque le rapport de la longueur au diamètre (L/D) du palier est faible, $L/D < 0,125$.

Dans ce type de palier, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression circonférentiel négligeable, ce qui simplifie considérablement les calculs.

B. Palier infiniment long

Lorsque le rapport de la longueur au diamètre L/D du palier est grand, on peut négliger le débit axial. L'écoulement est donc purement circonférentiel. En pratique, ce calcul s'applique aux paliers dont $L/D > 4$.

Dans ce type de paliers, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression axial négligeable devant le gradient de pression circonférentiel.

c. Palier de longueur finie

Dans le cas où le rapport L/D est compris entre 0.125 et 4, le palier est considéré de longueur finie. Les deux types de paliers précédents (l'infiniment long et l'infiniment court) constituent les configurations extrêmes, le palier de longueur finie donne une configuration réelle du palier, dans ce type de palier on ne tient pas compte des hypothèses simplificatrices précédentes.

d.3. Principe de fonctionnement d'un palier lisse

Le fonctionnement du palier est directement lié au débit du film du lubrifiant. L'apparition de ce débit est provoquée par l'adhérence du fluide lubrifiant en film mince aux parois en mouvement. [50]

La mise en route du palier, nous permet d'observer trois phases distinctes et qui sont représentées par la figure (II.12) [49]. Les points O_a et O_c correspondent respectivement aux centres de l'arbre et du coussinet, quant à la charge extérieure appliquée à l'arbre, elle est notée par W .

A l'arrêt, l'arbre est en contact avec le coussinet. Lors de la phase de démarrage, l'arbre roule à l'intérieur du coussinet selon un régime de frottement limite ou mixte. Lorsque la

vitesse de rotation augmente, le régime devient hydrodynamique. L'huile qui adhère aux parois est entraînée dans un convergent formé par l'espace entre le coussinet et l'arbre excentré. C'est cet écoulement d'huile qui crée la pression hydrodynamique supportant la charge appliquée sur le rotor et assurant ainsi le fonctionnement sans contact du palier.

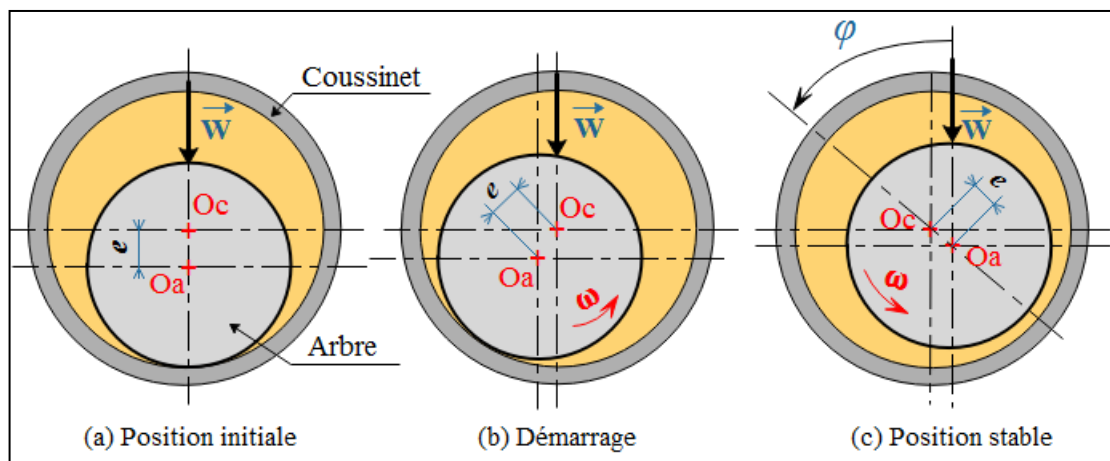


Figure II.12. Position d'arbre dans un palier lisse hydrodynamique [49]

d.4. Les avantages et les inconvénients des paliers lisses [50]

A. Avantages des paliers lisses

- Insensibles aux poussières (ne nécessitent pas d'étanchéité)
- Grande vitesse de rotation.
- Augmentation de la durée de vie des pièces.
- Silencieux (séparation des deux pièces par le film d'huile).
- Insensibles aux chocs et aux vibrations à cause de leurs grandes surfaces.
- Amortissant lubrifiées (absorptions des chocs et des vibrations).

B. Inconvénients des paliers lisses

- Grand moment résistant au démarrage (contact métal-métal).
- Rendement faible (perte par frottement).
- Surveillance plus poussée et un contrôle efficace de la lubrification.
- Consommation élevée d'huile pour la lubrification.

d.5. Les différents régimes de lubrification des paliers

La lubrification concerne tous les contacts pour lesquels un film mince visqueux est intercalé entre deux corps solides en mouvement relatif. Les différents régimes de lubrification ont été présentés pour la première fois par Richard Stribeck [59,60] dans le cas d'un palier lisse. La courbe de Stribeck représente la variation du coefficient de frottement

d'un palier lubrifié en fonction de sa vitesse. Cette courbe montre plusieurs régimes de fonctionnement successifs (figure II.13).

Stribeck définit par la suite, un coefficient de similitude pour permettre la généralisation de son modèle à tous types de contact lubrifiés.

$$\theta = \frac{\rho u}{c} \quad (\text{II.1})$$

Où θ : le coefficient de similitude,
 ρ : la viscosité dynamique du lubrifiant,
 u : la vitesse linéaire de l'arbre en rotation,
 C : la charge radiale exercée sur l'arbre.

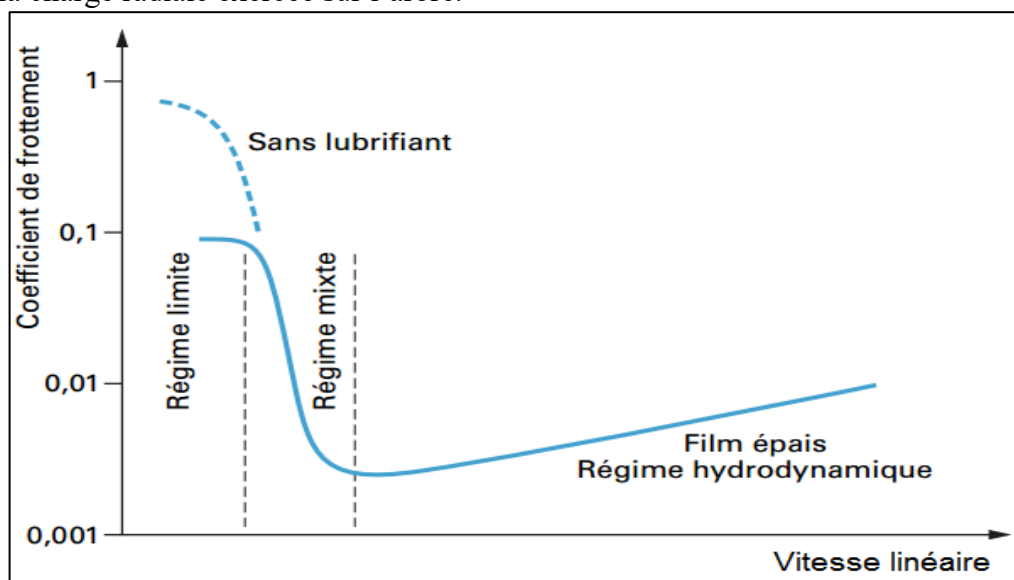


Figure II.13. Lubrification des paliers (Courbe de Stribeck).

A. le régime de lubrification avec contact

Les surfaces glissent l'une sur l'autre et ne sont séparées que par un film d'huile très mince. Ce régime n'est acceptable que pour les mouvements rotatifs ou oscillatoires lents. Les coefficients de frottement obtenus par ce régime varient entre 0,08 et 0,14. Les paliers de ce type sont habituellement graissés ou huilés périodiquement.

B. Le régime de lubrification hydrodynamique

Il permet la séparation complète des surfaces. Le frottement étant réduit au minimum, il en résulte une longue vie utile. Pour que le régime hydrodynamique assure une séparation complète des surfaces, les conditions suivantes doivent être remplies [61]:

- ✓ le lubrifiant choisi doit avoir une viscosité correspondant aux exigences du fonctionnement ;
- ✓ le débit de lubrifiant doit être maintenu au niveau requis ;
- ✓ la conception doit être appuyée sur les méthodes et les considérations appropriées. Un régime hydrodynamique efficace permet d'obtenir un coefficient de frottement de $0,001$ à $0,005$. La figure III.14 représente les Caractéristique de Régime hydrodynamique:

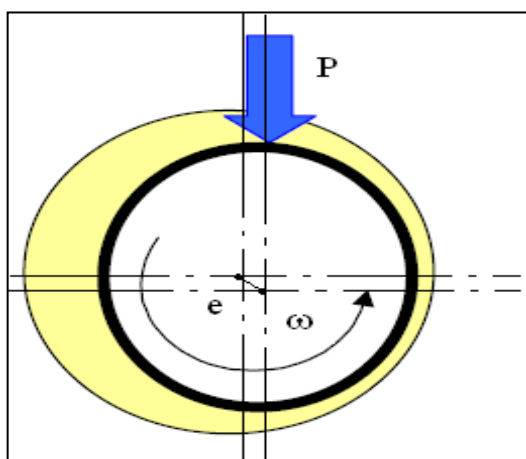


Figure II.14. Caractéristique d'un régime hydrodynamique [50].

C. le régime de lubrification mixte

Ce mode de lubrification est un régime intermédiaire entre le régime avec contact et le régime hydrodynamique. Il se caractérise par une séparation partielle des surfaces au moyen d'un film d'huile. Cependant, tout comme le régime avec contact, le régime mixte est limité en rapport avec la vitesse circonférentielle et le degré d'usure. Les coefficients de frottement variant entre $0,02$ et $0,08$. Au moment du démarrage, tous les paliers radiaux à coussinets passent successivement par les trois régimes. Au repos, l'arbre est en contact avec la surface du coussinet et il en résulte que le démarrage doit se faire sous un régime avec contact.

A titre indicatif, le coefficient de friction varie de $0,20$ à $0,001$. La construction de cette partie de la courbe de Stribeck peut être effectuée en considérant que le coefficient de friction f est égal à [62]:

$$f = \vartheta f_m + (1 - \vartheta) f_h \quad (\text{II.2})$$

Avec :

f_m : Coefficient de friction en régime mixte.

f_h : Coefficient de friction en régime hydrodynamique.

ϑ : Coefficient de répartition en fonction de la charge supportée par le film hydrodynamique vis-à-vis de celle supportée par les aspérités.

II.2.5.2. Paliers hydrostatiques

Les paliers hydrostatiques sont utilisés lorsque les paliers à régime hydrodynamique ne permettent pas d'obtenir une lubrification suffisante pour séparer complètement les deux éléments en rotation relative. Dans un palier à régime hydrostatique, qu'il soit radial ou axial, le lubrifiant sous pression vient d'une source externe. Les paliers à régime hydrostatique ont l'avantage de réduire la friction, d'accepter de fortes charges et d'être fiables, ils sont durables et bien ajustés.

II.2.5.3 Paliers hybrides

Un palier hybride est un palier où ils interviennent simultanément des effets hydrostatique et hydrodynamique. Le palier est alimenté sous pression constante au moyen de résistances hydrauliques (capillaires ou orifices en paroi mince). Un palier hybride est généralement constitué de plusieurs alvéoles réparties régulièrement sur la périphérie du coussinet.

II.3. Défauts spécifiques aux paliers lisses

Il s'agit des machines sur coussinets en bronze qui tournent généralement doucement et qui présentent peu de particularités en analyse des vibrations, mais surtout des turbomachines (turbines à vapeur ou à gaz, compresseurs centrifuges ou axiaux) qui, elles, tournent très vite, à des vitesses supérieures à leur première vitesse critique (premier mode de résonance) sur des paliers à film d'huile dits paliers lisse [63].

Dans le cas d'un palier lisse, l'arbre est porté par l'huile sous pression. Sous l'effet de la rotation, l'axe de l'arbre prend une position d'équilibre et son axe de rotation est décentré par rapport à l'axe du palier. Cette position est définie, d'une part, par la distance entre les axes (de l'arbre et du palier) et d'autre part, par l'angle d'attitude (angle formé par la droite qui relie les centres et la direction de la charge). Cette position d'équilibre, donnée par le poids du rotor, la force liée à la pression de l'huile et la rotation de l'arbre, elle est fonction de la charge, de la vitesse de rotation, des caractéristiques du fluide ainsi que de sa température.

II.3.1 Défaut d'Instabilité de palier lisse

Des instabilités de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que :

- ✓ Charge appliquée au rotor,
- ✓ Vitesse de rotation,
- ✓ Viscosité de l'huile.

L'instabilité se manifeste par une vibration auto-entretenue qui entraîne une précession du rotor, avec une période différente de la période de rotation, dont la fréquence est :

Selon la technologie du palier.

$$0.23F_0 < F_{instabilité} < 0.63F_0$$

La répartition de la pression de l'huile est différente en amont et en aval du point de jeu minimal existant entre l'arbre et le palier. En raison de la perte de charge subie en traversant cet espace rétréci, la pression en amont est plus élevée que la pression en aval. Cette répartition dissymétrique de la pression génère une force tangentielle qui tend à faire l'arbre, et à rendre sa position instable.

Il est à noter que cette instabilité de palier, liée aux conditions de charge et la pression de l'huile ainsi qu'aux éventuels efforts supplémentaires apportés par un balourd ou un désalignement est souvent rencontré sur les turbomachines à coussinets lisses, notamment sur les machines à axe vertical, et beaucoup moins fréquente sur les machines à coussinets à patins oscillants.

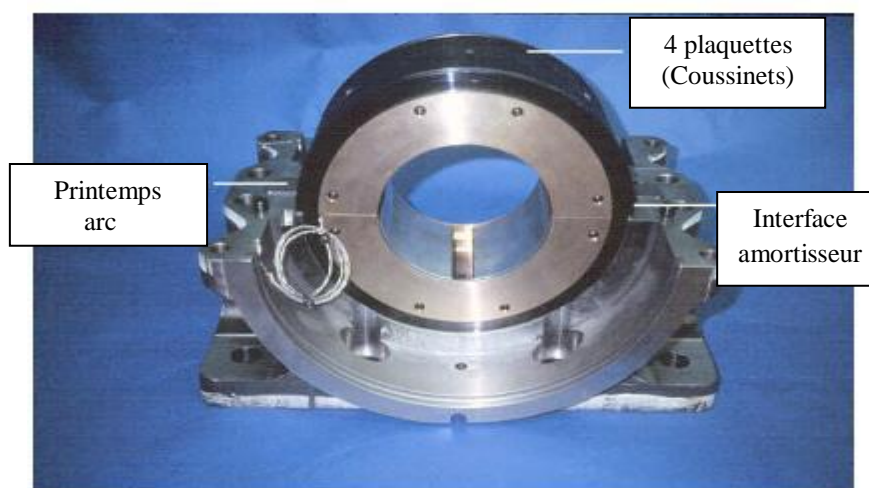


Figure II.15. Instabilités de paliers lisses hydrodynamiques [50].

II.3.2 Défaut de mésalignement dans les paliers lisses

Le défaut de mésalignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements.

Les vibrations excessives des machines tournantes à grande vitesse équipées des paliers à fluides telles que (les turbines à vapeurs, les turbocompresseurs, moteur d'avions...etc.), peuvent causer une perte appréciable de la production et en conséquence la qualité du bien. Les paliers sont le siège de différents effets physiques et problèmes rencontrés tel que le défaut de mésalignement.

Le mésalignement dans les paliers fluides provient généralement de la déformation de l'arbre sous charge, déviation de l'arbre, défaut d'assemblage et de fabrication. Le mésalignement peut provoquer des effets considérables sur les performances statiques et dynamiques du palier. Il peut provoquer l'usure, vibration et dysfonctionnement de l'installation [64]. Les axes du coussinet et de l'arbre ne sont pas toujours parallèles. En pratique, il existe toujours un désalignement dont les causes peuvent être d'origines diverses telles que : la déformation thermique ou élastique de l'arbre, couples extérieurs ou un mauvais alignement des paliers (montage).

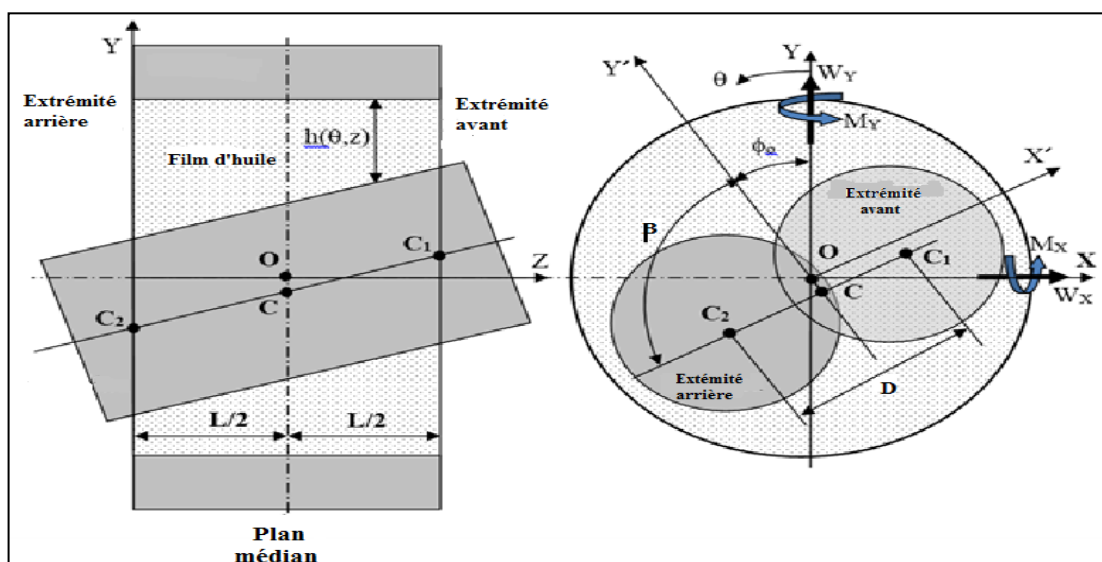


Figure II.16. Palier mésaligné [65].

II.3.3. Défauts de lubrification-Instabilité

Les défauts rencontrés sur les paliers fluides sont dus avant tout à une altération des coussinets, des butées ou des soies.

Un mauvais lignage (mésalignement), des vibrations élevées, et surtout une interruption du graissage ou un manque de soulèvement sont quelques causes possibles de destruction du

régule (alliage antifriction à base de plomb ou d'étain). Une différence de potentiel entre le rotor et le palier peut induire du piquage (surtout sur les alternateurs).

La présence de particules dans l'huile lubrifiante peut aussi entraîner des coupures du régule.

Un autre problème de lubrification est celui des vibrations auto-excitées qui apparaissent dans un palier quand certaines conditions sont remplies. A savoir ; un palier trop chargé, un jeu radial est trop fort, pourra devenir instable.

En effet, il est intéressant de noter que le comportement d'un palier est fortement non linéaire. Les résultats de calcul des coefficients de raideur et d'amortissement d'un palier, en fonction de la position de l'arbre dans le palier montrent que, si l'arbre est insuffisamment chargé, c'est-à-dire si le point de fonctionnement du palier impose une excentricité trop faible, la raideur peut même devenir négative. Dans ce cas, le palier est instable et engendre des vibrations auto-excitées [66].

La fréquence dominante de la vibration est à la demi-fréquence de rotation $Fr/2$, Elle peut être proche de $1/3$ ou $1/4$ de la fréquence de rotation.

II.3.4. Défaut de jeu du palier lisse

Sous l'effet de la température de fonctionnement et de la vitesse de rotation, l'arbre et le palier peuvent subir des dilatations différentielles. Ainsi, la valeur du jeu peut varier en fonction des conditions d'utilisation du palier.

Le jeu est un paramètre important dans le fonctionnement du palier. Il intervient par plusieurs aspects qui sont :

- ✓ le débit d'huile et la consommation de puissance, d'où découle la température du film d'huile et donc la viscosité du fluide : un fort jeu est souhaitable pour diminuer le frottement et en conséquence l'échauffement.
- ✓ la convergence du palier et la portance hydrodynamique du palier : un jeu faible favorise la portance.

Dans des conditions normales, les machines qui sont boulonnées fermement sur un socle rigide montrent habituellement un niveau d'amplitude de vibration légèrement plus élevé dans la direction horizontale que dans la direction verticale.

Lorsque l'amplitude de vibration dans la direction verticale apparaît excessive en comparaison avec la direction horizontale, on peut alors soupçonner un problème de palier lisse subissant du frottement [50].

Le jeu des paliers des turbomachines données par les constructeurs par exemple : Jeu de coussinets de turbocompresseur lisses (0,21 : 0,28) mm, si le jeu dépasse cette marge de tolérance, il est nécessaire de changer le coussinet lisse (défaut de jeu de palier).

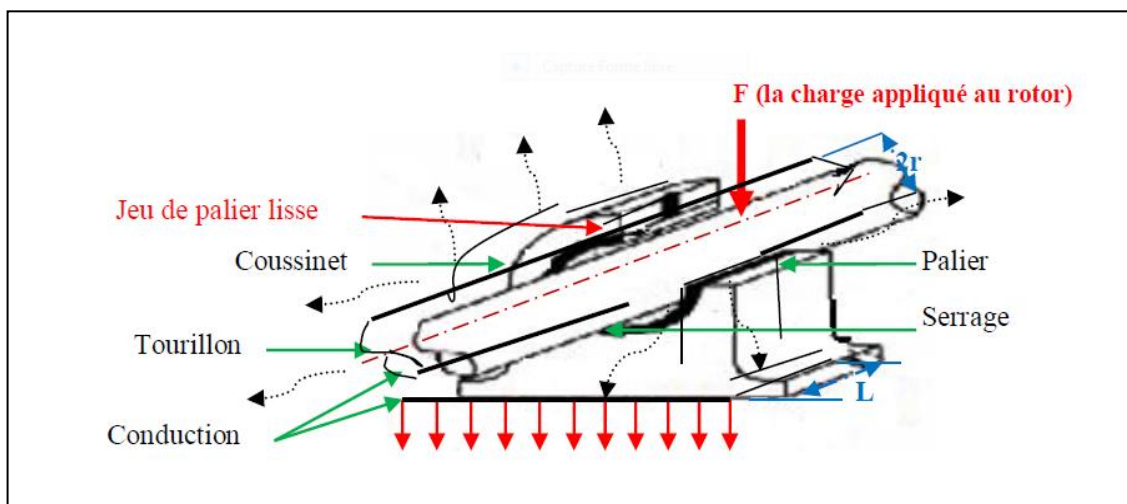


Figure II.17. Effet du jeu de palier.

II.3. 5. Phénomène de tourbillonnement d'huile

Le phénomène de tourbillonnement d'huile arrive lorsque le rotor qui tourne sur lui-même autour de son axe O à la vitesse de rotation f_O , se met à tourner dans le palier à une vitesse f_{tb} (vitesse de tourbillonnement) autour de l'axe du palier O , voire (figure II.18). Si une perturbation survient pour modifier la position d'équilibre du rotor, l'huile remplit la place rendue libre en augmentant la pression du film initiale. La variation de la force de pression du film peut alors provoquer la rotation de l'arbre dans le palier à la vitesse f_{tb} (vitesse de tourbillonnement).

Ce phénomène apparaît sur les paliers lisses faiblement chargés et lubrifiés en régime hydrodynamique [67].

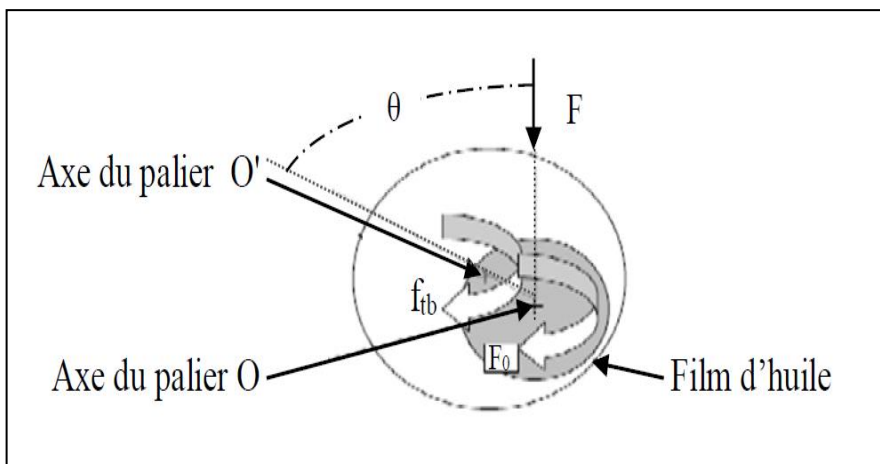


Figure II.18. Phénomène de Tourbillonnement.

II.3.6. Frottement et usure de contact

Le frottement se produit parfois dans les machines tournantes, notamment dans les joints d'étanchéité, les paliers lisses, les lames des turbines et des compresseurs et les aubes des pompes et les ailettes des ventilateurs.

Dans les échangeurs de chaleur, l'usure de contact se produit généralement lorsque les tubes en vibration frottent contre les plaques supports (voire figure II.19).

Le symptôme est similaire au jeu mécanique. Sous-harmoniques 1/2 ,1/3, etc.

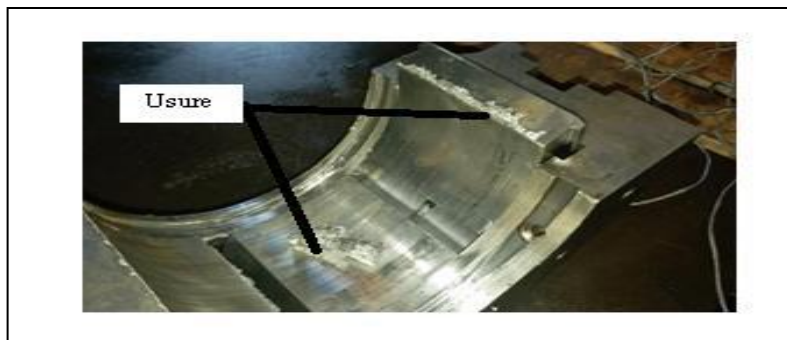


Figure II.19. Usure du palier lisse [50].



Figure II.20. Défaut de frottement.

II. 3.7. Mauvais serrage mécanique (jeu de fondation)

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence égale à une ou deux fois la vitesse de rotation.

Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier, voir la figure II.20 [68].

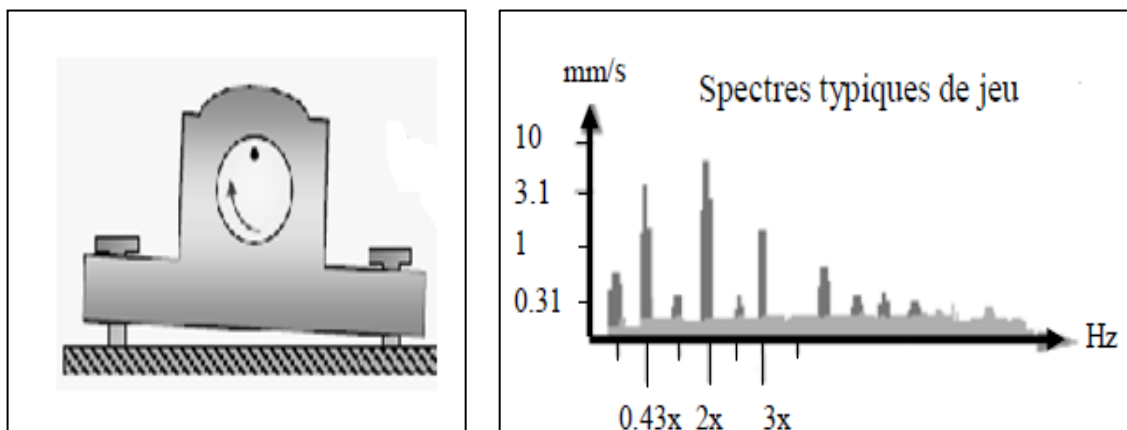


Figure II.21. Jeu de fondation et le spectre correspond.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les paliers et en particulier les paliers lisses, à savoir ; la conception ainsi que les caractéristiques de fonctionnement des paliers lisses. Les avantages et les inconvénients des paliers lisses, ainsi que leurs domaines d'utilisations dans l'industrie, et leur lubrification ont été aussi présentés.

Les différents types des paliers lisses, les principaux défauts rencontrés sur ces pièces et leurs effets sur les machines ont été discutés.

Chapitre III

Introduction aux processus stochastiques

Sommaire

III.1. Introduction.....	52
III.2. Les paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité.....	53
III.2.1. Variable aléatoire.....	53
III.2.2. Types de variables aléatoire.....	53
III.2.3. La densité de probabilité.....	53
III.2.4. La fonction de répartition.....	54
III.2.5. La fonction de fiabilité.....	54
III.2.6. Le taux de défaillance ou taux d'avarie.....	55
III.2.7. Le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) « <i>Mean Time between Failure</i> ».....	56
III.3. Les lois de probabilités.....	56
III.3. 1. Les lois discrètes.....	57
III.3. 2. Les lois continues.....	57
III.4. Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilités.....	58
III.4.1. La loi exponentielle.....	58
III.4.2. La loi de Wei bull.....	59
III.4.3. La loi normale.....	61
III.4. 4. La loi log-normale.....	62
III.4. 5. La loi Gamma.....	63
III.4.6. La loi Bêta.....	64
III.4.7. La loi uniforme.....	65
III.5. Les processus stochastiques.....	65
III.5. 1. Définitions.....	66
III.5. 2. Propriétés d'un processus.....	66
III.6. Les processus de dégradation.....	67
III.6.1. Processus de Markov.....	67
III.6.2. Processus de Poisson.....	68
III.6. 3. Martingale.....	69
III.6.4. Réseaux bayésiens(RB).....	70
III.6.5. Réseaux de Pétri Stochastiques (RdPS).....	70

III.6.6. Processus de Lévy.....	71
III.6.7. Processus Gamma.....	72
III.6.8. Processus de Wiener (mouvement brownien).....	73
III.7. La probabilité et les statistiques.....	75
III.8. Les tests statistiques.....	75
III.9. Principe d'un test d'hypothèses.....	76
III.10. Les principaux tests d'adéquation à une loi.....	77
III.10.1. Le test du Chi-deux.....	77
III.10.2. Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov.....	78
III.10.3. Test de Shapiro-Wilk.....	78
III.11. Conclusion.....	78

III.1. Introduction

De nombreux matériels ou systèmes se dégradent dans le temps avant de tomber en panne. Pour modéliser ces dégradations et pour mieux comprendre les causes de pannes de ces systèmes, nous avons besoin de développer des modèles permettant de prendre en compte les données de dégradation et de les faire lier à des éventuelles pannes.

Les modèles de dégradation unidimensionnels ont fait l'objet de nombreuses publications dans les dernières décennies. Ces modèles sont à l'origine des processus qui déterminent les échecs dans ces systèmes. De plus, ils jouent un rôle central dans les efforts visant à améliorer la fiabilité et en conséquence la maintenance de ces systèmes.

La maintenance a été longtemps jugée par les entreprises comme un poste de dépense inévitable. C'est que récemment elle se libère de cette réputation faussement acquise pour réapparaître comme étant un facteur de compétitivité qui joue un rôle fondamental dans la maîtrise des risques, qu'ils soient sécuritaires, financiers ou environnementaux.

Pour cela, on choisit les processus stochastiques (ou aléatoires) qui permettent de modéliser des systèmes dont le comportement n'est que partiellement prévisible. La théorie est fondée sur le calcul des probabilités et les statistiques. Dans ce contexte, on peut citer le processus Lévy et le processus Gamma.

La théorie des probabilités permet de modéliser efficacement certains phénomènes aléatoires et d'en faire l'étude théorique. Le modèle probabiliste permet alors de représenter comme des variables aléatoires les déviations entre les valeurs vraie et celles observées.

Tout processus dont l'évolution temporelle peut être analysée en termes de probabilité est dit processus stochastique [69].

La notion de processus stochastique est donc très générale, il se manifeste par l'observation d'une grandeur $x(t)$ variable au cours du temps t .

Donc ce chapitre fait une démonstration sur la statistique et les processus stochastiques utilisés pour la simulation des phénomènes aléatoires, notamment la simulation des indices de dégradation des systèmes industriels.

Suite à la présentation des processus stochastiques et de leurs applications dans le domaine de la simulation des phénomènes physiques et économiques, différentes méthodes pour les analyses proactives de risques et pour l'identification et prévention des problèmes potentiels sont présentées.

III.2. Les paramètres nécessaires à la mesure de la fiabilité

III.2.1. Variable aléatoire

On appelle variable aléatoire X une variable telle qu'à chaque valeur x de X on puisse associer une probabilité. La correspondance entre une variable aléatoire et la probabilité qui lui est associée établit une loi de probabilité.

Une expérience est qualifiée d'aléatoire si son résultat ne peut être prévu à l'avance et si, répétée dans des conditions identiques, elle peut donner lieu à des résultats différents [70], par exemple :

- Succession d'appels à un standard téléphonique non surchargé.
- Observation de la durée de vie d'un individu anonyme dans une population.
- Observation de la durée de fonctionnement sans panne d'appareil.
- Jeu de pile ou face.

Une variable dont la valeur est déterminée en fonction du résultat d'une expérience aléatoire est appelée variable aléatoire.

Une variable aléatoire est dite discrète si l'ensemble des valeurs qu'elle peut prendre est fini (dénombrable), elle est dite continue si cet ensemble est un intervalle ou une union d'intervalles (non dénombrable).

III.2.2 Types de variables aléatoire

Il existe deux types de variables aléatoires :

- Variable aléatoire continue : comme l'intervalle de temps entre défaillances consécutives d'un matériel.
- Variable aléatoire discrète : comme le nombre de défaillances d'un matériel sur une période donnée ou pour une quantité fabriquée.

III.2.3 La densité de probabilité

En fiabilité, elle est généralement notée $f(t)$, elle représente la probabilité de défaillance juste au temps (t) .

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{III.1})$$

III.2.4. La fonction de répartition

Généralement, elle est notée $F(t)$, elle représente la probabilité de défaillance dans l'intervalle de temps $[0, t]$.

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (\text{III.2})$$

III.2.5. La fonction de fiabilité

En terme de statistique, la fiabilité est une fonction de temps $R(t)$, elle représente la probabilité de bon fonctionnement d'une entité dans l'intervalle de temps de $[0, t]$, c'est-à-dire la probabilité de défaillance au-delà du temps (t) . C'est la fonction complémentaire de la fonction de répartition.

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (\text{III.3})$$

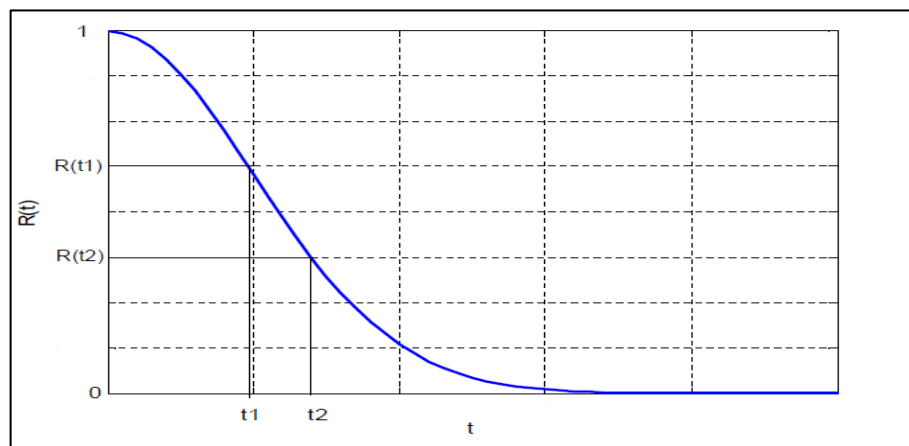


Figure. III.1. Fiabilité décroissante avec le temps

En termes de qualité, on définit la fiabilité d'un matériel comme l'aptitude à maintenir la conformité à sa spécification d'origine.

On peut distinguer d'autres formes de la fiabilité [71] :

- *La fiabilité intrinsèque* : elle est propre à un matériel, selon un environnement donné, et ne dépend que de la qualité de ce matériel.
- *La fiabilité extrinsèque* : elle résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de maintenance. Elle est relative à l'intervention humaine.

III.2.6. Le taux de défaillance ou taux d'avarié

Le taux de défaillance noté par $\lambda(t)$ ou $Z(t)$ est un estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure), il représente la probabilité de défaillance $a(t + \Delta t)$, donc encore au bon fonctionnement à (t) (figure. III.2). Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est une densité de probabilité conditionnelle, car elle ne considère que la probabilité de défaillance du matériel encore en fonctionnement.

Ce taux de défaillance est également appelé taux de mortalité instantanée. Il est représenté par le rapport :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{Durée d'usage}} \quad (\text{III.4})$$

Liée au problème de défaillance, la vie des équipements se présente en trois phases [72] :

- *Phase de jeunesse* : Dans cette phase, $\lambda(t)$ décroît rapidement. C'est la période de la mise en service et de rodage de système. Les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfections de montage.
- *Phases de maturité* : Le taux de défaillance $\lambda(t)$ est pratiquement constant, c'est la période de vie utile ou la défaillance est aléatoire. Un taux de défaillance constant ou légèrement croissant, correspondant au rendement optimal de l'équipement.
- *Phase de vieillesse* : C'est la période d'obsolescence ou $\lambda(t)$ croît rapidement, la dégradation du système est accélérée. Souvent, on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion. A un certain point de $\lambda(t)$, le matériel n'est plus capable de fonctionner.

Pour la première phase, on ne pratique que de la maintenance corrective. C'est seulement dans la seconde phase que la maintenance préventive est justifiée.

Le graphe représentant la variation de taux de défaillance, appelé « courbe en baignoire ». Selon le type du matériel (mécanique, électrique et électronique), la courbe en baignoire peut prendre plusieurs formes (Figure III.2).

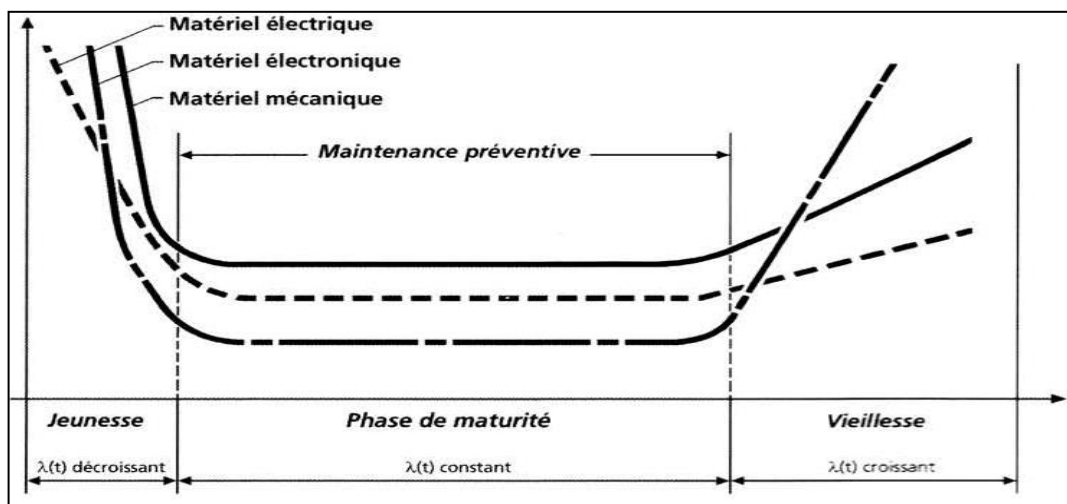


Figure. III.2. Courbe en baignoire : taux de défaillance $\lambda(t)$.

L'axe des abscisses peut représenter une période, un cycle, une quantité de produit fabriqué, une distance parcourue, etc.

III.2.7. Le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) « *Mean Time between Failure* »

Le MTBF est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement, il représente la moyenne des temps entre deux défaillances consécutives pour une période donnée de la vie d'un matériel, il est exprimé par :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{III.5})$$

Ou

$$MTBF = \frac{\sum_0^n TBF_i}{n} \quad (\text{III.6})$$

Ces valeurs sont calculées à partir des observations, d'une exploitation statistique de l'historique des essais de durée de vie.

III.3. Les lois de probabilités

Les lois de probabilités sont des objets mathématiques qui permettent aux statisticiens de développer des modèles pour décrire des phénomènes où le hasard intervient, on distingue de deux variétés de probabilités l'une qui est continue et l'autre discrètes [73].

III.3.1. Les lois discrètes

Une variable aléatoire discrète prend ses valeurs sur un ensemble fini ou dénombrable de points. La loi de probabilité d'une telle variable est appelée loi discrète.

Une loi de probabilité discrète est caractérisée par l'énumération des valeurs x_i , appartenant à \mathbb{R} ou à un intervalle de \mathbb{R} , prises par la variable aléatoire X et par les probabilités associées, c'est-à-dire les nombres réels positifs p_i tels que :

$$\Pr(X = x_i) = p_i \quad 0 \leq p_i \leq 1 \quad \sum_i p_i = 1 \quad (\text{III.7})$$

La fonction de répartition est une fonction en escalier, constante sur tout intervalle $[x_i, x_{i+1}[$, et admettant en chaque point x_i un saut égal à $p_{i+1} = \Pr(X = x_{i+1})$.

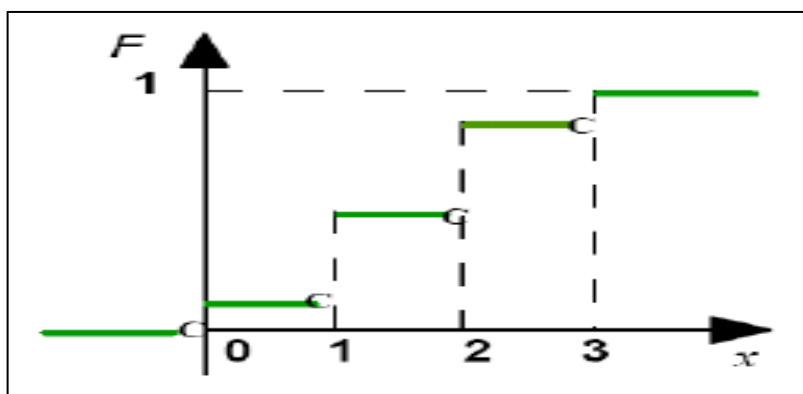


Figure. III. 3. Fonction de répartition d'une loi discrète

III.3. 2. Les lois continues

Une variable aléatoire continue prend ses valeurs sur un ensemble infini, non dénombrable de points, elle décrit par exemple la durée de vie d'une batterie de voiture, l'heure d'arrivée des voitures à un péage donné d'autoroute. Il existe une fonction f non négative, définie pour toute valeur x appartenant à \mathbb{R} et vérifiant, pour toute partie A de \mathbb{R} , la propriété :

$$\Pr(X \in A) = \int_A f(x) dx \quad (\text{III.8})$$

Tel que :

$$\int_{\mathbb{R}} f(x) dx = 1 \quad (\text{III.9})$$

La fonction de répartition de la variable aléatoire X est définie par :

$$F(a) = pr(X < a) = \int_{-\infty}^a f(x)dx \quad (\text{III.10})$$

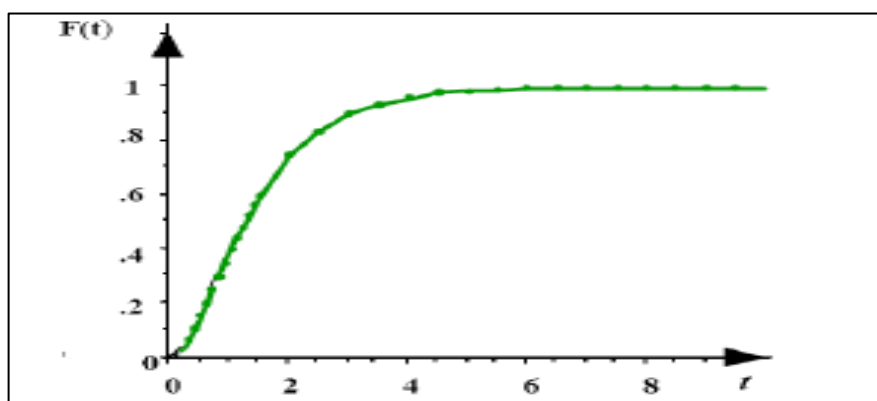


Figure. III. 4. Fonction de répartition d'une loi continue

III.4. Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité

La fiabilité est de plus en plus fréquemment, une grandeur quantitative qui nécessite la connaissance des distributions de durée de vie afin de l'estimer. Dans le cadre du système mécatronique par exemple, ces distributions doivent absolument tenir compte de tous les mécanismes de défaillance associés aux différentes technologies.

Nous présentons dans cette section les lois ainsi que les modèles de fiabilité susceptibles, selon l'expérience, de représenter des distributions de durée de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité mécatronique.

Nous rappelons les principales propriétés de ces lois, les fonctions de fiabilité associées, les densités de probabilité ainsi que les taux de défaillance [74,75].

III.4. 1. La loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales. La loi exponentielle est la plus couramment utilisée en fiabilité électronique pour décrire la période durant laquelle le taux de défaillance est considéré comme constant (défaillance aléatoire).

La loi exponentielle décrit le temps écoulé jusqu'à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. Elle est définie par un seul paramètre qui est le taux de défaillance λ [76,77].

Elle est caractérisée par :

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{III.11})$$

➤ Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{III.12})$$

➤ La fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{III.13})$$

➤ Le taux de défaillance ;

$$\lambda(t) = \lambda \quad (\text{III.14})$$

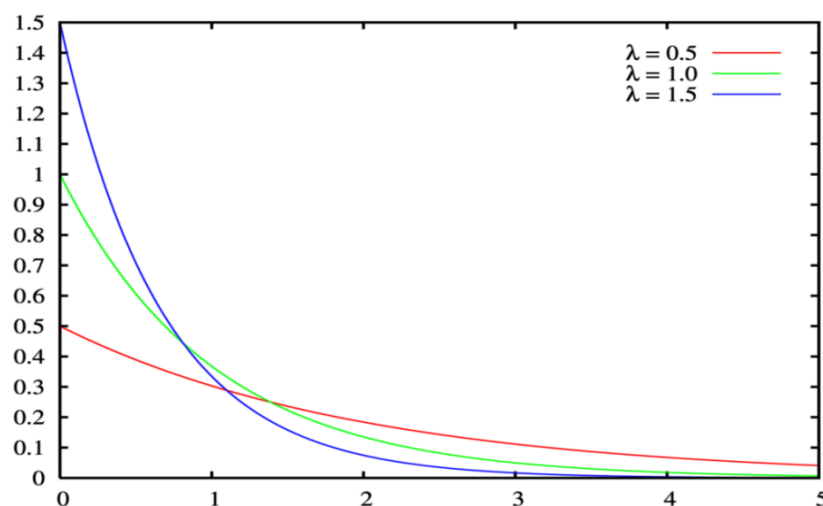


Figure. III. 5. Densité de probabilité de la loi exponentielle

III.4.2. La loi de Weibull

La loi de Weibull, est souvent utilisée en mécanique, elle caractérise bien le comportement du produit dans les trois phases de vie selon la valeur du paramètre de forme β .

Pour la période de jeunesse ($\beta < 1$), période de vie utile ($\beta = 1$) et pour la période d'usure ou vieillissement ($\beta > 1$).

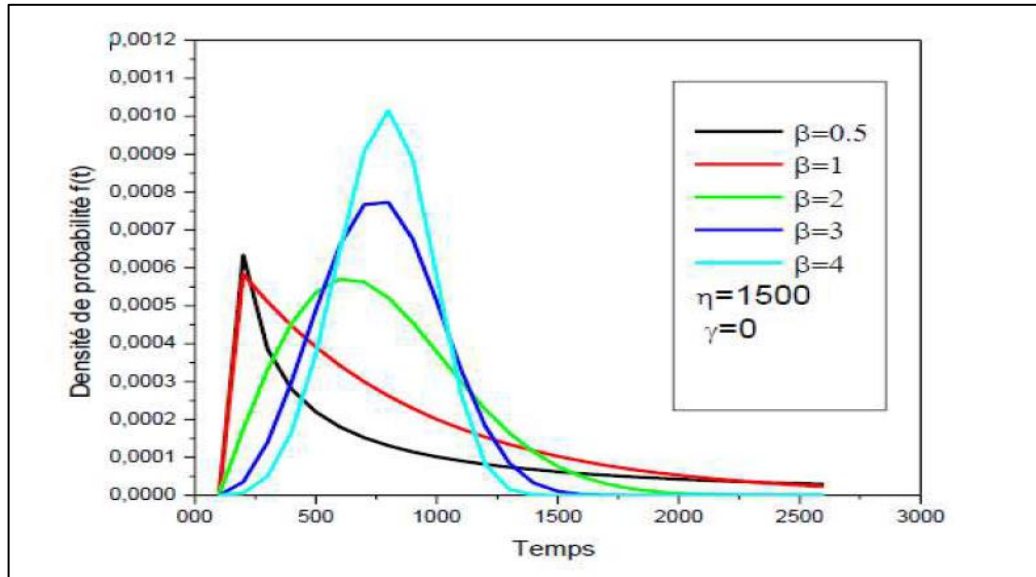


Figure. III. 6. Densité de probabilité de la loi de Weibull.

Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend de trois paramètres suivants [78,79]:

Paramètre de forme ($\beta > 0$).

Paramètre d'échelle ($\eta > 0$).

Paramètre de position $\gamma > 0$.

La loi de Weibull est caractérisée par :

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (\text{III.15})$$

- La fiabilité :

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

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (\text{III.17})$$

On entend aussi par la loi de Weibull à deux paramètres est ce lorsque le paramètre de position $\gamma = 0$.

III.4. 3. La loi normale

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 dans cette phase de vie est toujours croissant.

La loi normale est définie par les deux paramètres, la moyenne μ et l'écart type σ .

En effet, elle est caractérisée par [80] :

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.18})$$

- La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (\text{III.19})$$

- La fiabilité :

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (\text{III.20})$$

- Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\mu} \left(\frac{t-\sigma}{\mu}\right)^{\beta-1} \quad (\text{III.21})$$

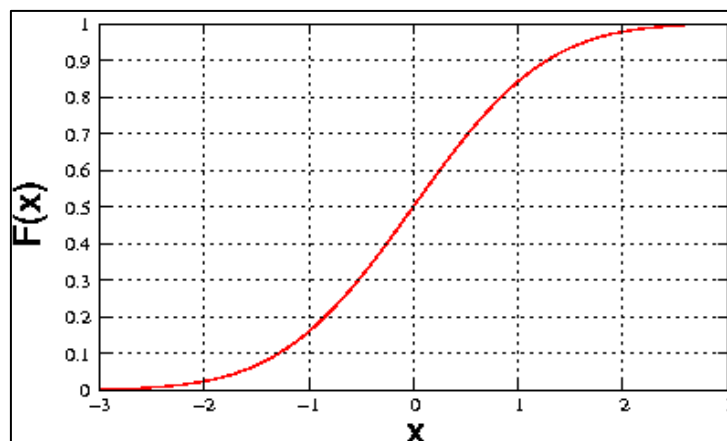


Figure. III.7. Fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

III.4. 4. La loi log-normale

Une variable aléatoire continue et positive t est distribuée selon une loi log-normale, si son logarithme est distribué suivant une loi normale. Cette distribution est utilisée en fiabilité pour modéliser les défaillances par fatigue [81]. La loi log-normale est généralement définie par deux paramètres μ et σ : Elle est caractérisée par :

- La fiabilité :

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (\text{III.22})$$

Avec : Φ c'est la fonction de répartition de la loi normale réduite.

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.23})$$

- La fonction de répartition :

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right) \quad (\text{III.24})$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(t)-\mu}{\sigma}\right)^2}}{t \int_0^{\infty} \sigma\sqrt{2\pi}f(t)dt} \quad (\text{III.25})$$

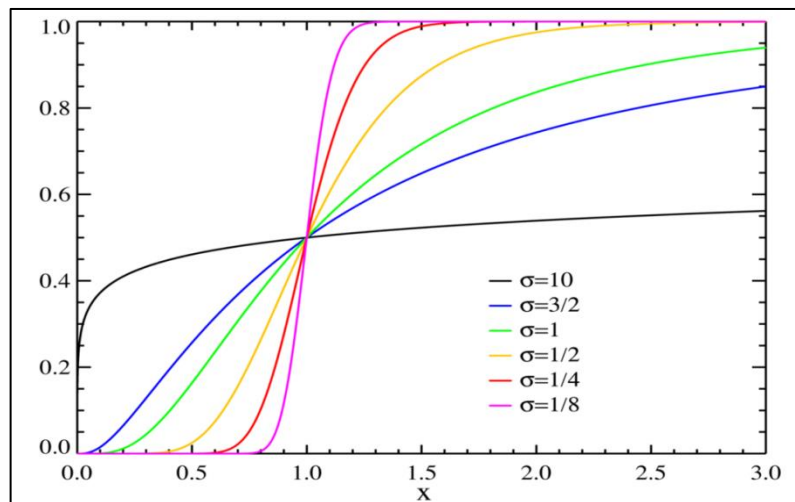


Figure. III.8. La fonction de répartition La loi log-normale $\mu=0$ [82].

III.4. 5. La loi Gamma

La loi Gamma est souvent utilisée pour modéliser les temps de défaillance d'un matériel et par conséquent peut être employée comme une distribution a priori dans l'analyse de la fiabilité bayésiens. Elle est conjuguée avec la loi Exponentielle [80], ce qui facilite singulièrement leur intégration.

Comme la loi de Weibull, la loi Gamma peut représenter toutes les phases de la vie d'un matériel. Elle peut représenter une grande variété de distributions, c'est un modèle naturel d'échantillonnage exponentiel.

La loi Gamma représente la loi de probabilité d'occurrence d'un événement dans un processus poissonnier. Par exemple si t_i est le temps entre les défaillances successives d'un système, et que t_i suit une distribution exponentielle, le temps cumulé d'apparition de la défaillance suit une loi Gamma avec deux paramètres positifs $a > 0$ et $b > 0$, dont a représente le paramètre de forme et b le paramètre d'échelle.

La loi de Gamma est caractérisée par :

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}}}{b^a \Gamma(a)} \quad (\text{III.26})$$

- Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{t^{a-1} e^{-\frac{t}{b}}}{b^a \int_t^\infty \Gamma(a) f(u) du} \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty e^{-X} X^{a-1} dX \quad (\text{III.28})$$

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

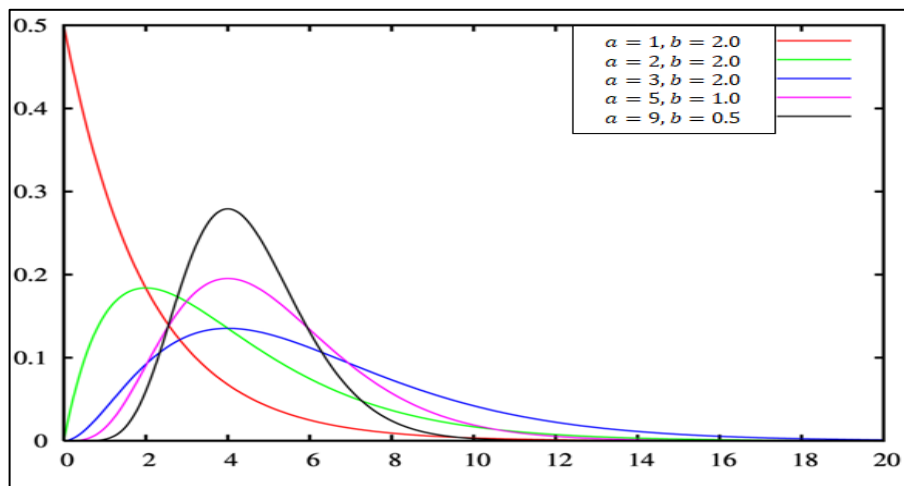


Figure. III. 9. Densité de probabilité La loi Gamma [83].

III.4.6. La 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 possède généralement deux paramètres a et b [69] :

➤ La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a).\Gamma(b)} t^{a-1} . (1 - t)^{b-1} \tag{III.29}$$

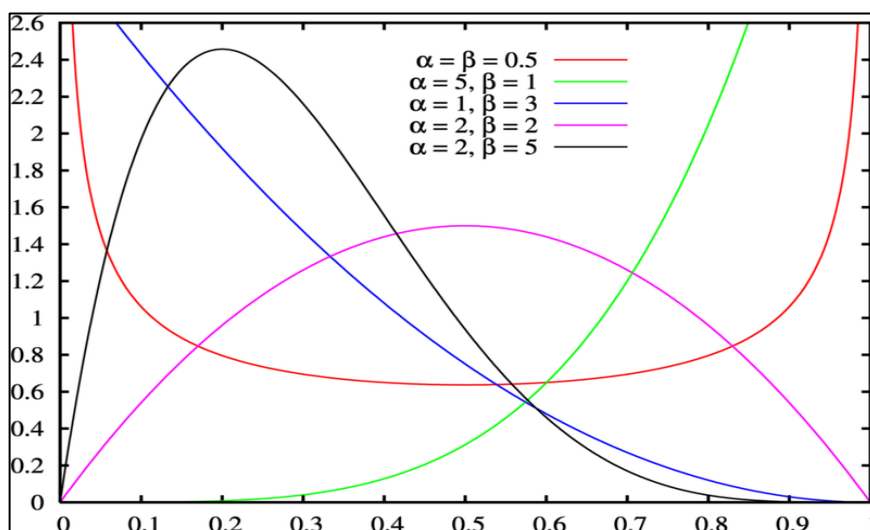


Figure. III. 10. La densité de probabilité de la loi Bêta

III.4.7. La loi uniforme

La loi uniforme est souvent utilisée en fiabilité, pour les essais bayésiens en l'absence de connaissances pour construire l'information a priori. Cette loi peut prendre toute valeur dans un intervalle (a, b) avec une densité de probabilité constante. La densité de probabilité et la fonction de répartition d'une loi uniforme sur $[a, b]$ s'écrit [84]:

- La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{1}{b-a} \quad (\text{III.30})$$

- La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{t-a}{b-a} \quad (\text{III.31})$$

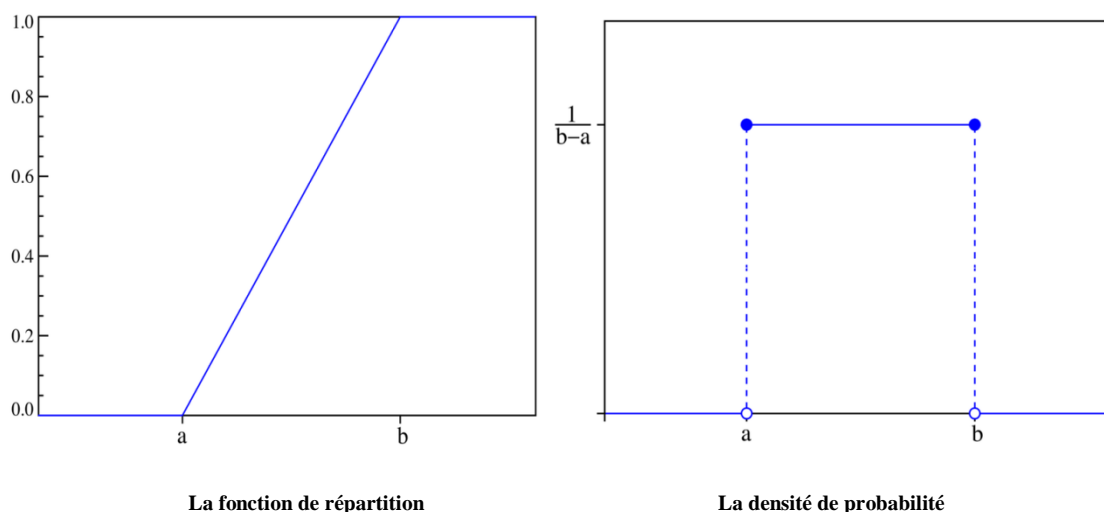


Figure. III.11. Fonctions caractéristiques de la loi uniforme continue.

III.5. Les processus stochastiques

Un système est à évolution aléatoire s'il peut prendre au cours du temps une série d'états successifs, sans qu'il soit possible d'en prévoir sa configuration exacte à un instant futur, son évolution au cours du temps dépend donc du hasard. En d'autres termes, ces situations ne peuvent pas être étudiées en utilisant simplement le calcul des probabilités qui décrit des événements où le résultat possible de chaque épreuve est un nombre.

L'étude de ces systèmes évoluant d'une manière aléatoire avec le temps et présentant parfois un caractère périodique est un vaste sujet. Ces systèmes ont été étudiés par Markov

(1906), qui a fait l'hypothèse que le passé et le futur étaient indépendants étant donné le présent [73].

Ensuite, les bases théoriques et mathématiques ont été formulées par Paul Lévy (1931), Doob (1933) après que Kolmogorov a élaboré la théorie mathématique du calcul des probabilités résultants elles-mêmes de la théorie de l'intégration. Ils ont des applications dans de nombreux domaines à savoir, en économie, en recherche opérationnelle, et peuvent intervenir dans l'étude de problèmes plus spécifiquement physiques.

Pour cela, nous faisons appel à des modèles qui sont des abstractions des phénomènes, ou au moins d'une partie des phénomènes, construites en se basant sur les expérimentations ou les observations.

Les processus stochastiques sont utilisés pour représenter des phénomènes qui varient d'une façon irrégulière en temps et en espace [85]. En d'autres termes, tout processus dont l'évolution peut être analysée en termes de probabilité est un processus stochastique.

III.5. 1. Définitions

Un processus stochastique $\{X_t, t \geq 0\}$ est une fonction du temps, dont la valeur à chaque instant dépend de l'issue d'une expérience aléatoire. Un tel processus est donc une famille de variables aléatoires (non indépendantes).

On appelle espace des états l'ensemble S ou les variables $\{X_t\}$ prennent leurs valeurs. Cet espace peut être discret ou continu. De même, le temps peut être discret ou continu.

Une trajectoire d'un processus est décrit par un couple (espace, temps). Par conséquent, on distingue quatre types de processus :

- Suite stochastique à espace d'états discret ;
- Suite stochastique à espace d'états continu ;
- Processus continu à espace d'états discret ;
- Processus continu à espace d'états continu.

En particulier, si l'ensemble S est fini ou dénombrable le processus est appelé une chaîne [86].

III.5. 2. Propriétés d'un processus

- Un processus X_t est strictement stationnaire si pour tout entier n et pour tous réels t_1, t_2, \dots, t_n et pour tout h , les variables aléatoires $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$ et $X_{t_1+h}, X_{t_2+h}, \dots, X_{t_n}$ ont la même loi.

- Un processus X_t est stationnaire (ou faiblement stationnaire) si son espérance $E(X_t)$ est une constante indépendante du temps t et sa fonction de corrélation $R(s, t)$ ne dépend que de la différence $\tau = t - s$, ainsi que $R(\tau)$ est continu.
- Un processus X_t est un processus à accroissements indépendants si pour tous réels $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, les variables aléatoires $X_{t_0}, X_{t_1} - X_{t_0}, \dots, X_{t_n} - X_{t_{n-1}}$ sont indépendantes. Si X_t est un processus à accroissements indépendants, alors pour tout s et t tels que: $0 \leq s \leq t$, $X_t - X_s$ est indépendant de $\mathfrak{F}_{-s} = (X_u, U \leq s)$. La loi de X_t est entièrement déterminée par la loi de $X_t - X_s$.
- Un processus X_t est un processus à accroissements indépendants stationnaires si X_t est un processus à accroissements indépendants, et si $X_t - X_s$ à même loi que X_{t-s} .
- Un processus X_t est gaussien si pour tout entier n et pour tous réels t_1, t_2, \dots, t_n les variables aléatoires $X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}$ ont une distribution gaussienne. Si on note $m(t)$ l'espérance de X_t et $R(s, t)$ la fonction de corrélation du processus.

III.6. Les processus de dégradation

Les processus de dégradation sont issus de trajectoires de processus stochastiques à accroissements indépendants. Afin de modéliser la dégradation croissante dans le temps d'un sujet soumis au vieillissement.

III.6.1. Processus de Markov

Un processus de Markov ou processus markovien, peut se décrire de la façon simple suivante :

L'état d'un système est connu à l'instant t , on suppose que les informations sur le comportement du système avant l'instant t sont sans influence sur les prédictions relatives à l'évolution de ce système après l'instant t .

Pour un « présent » donné, le « passé » et le « futur » sont indépendants. Le temps d'arrêt du système peut lui-même être aléatoire. En termes mathématiques, cette propriété se traduit de la façon suivante :

Soit un système, observé en une suite discrète d'instant $T = (t_1, \dots, t_n)$, et ne pouvant prendre qu'une suite d'états en nombre fini ou dénombrable. On note X_n l'état du système à l'instant t_n . Un processus markovien est tel que [87] :

$$Pr(X_n = j_n / X_0 = j_0, \dots, X_{n-1} = j_{n-1}) = Pr(X_n = j_n / X_{n-1} = j_{n-1}) \quad (\text{III.32})$$

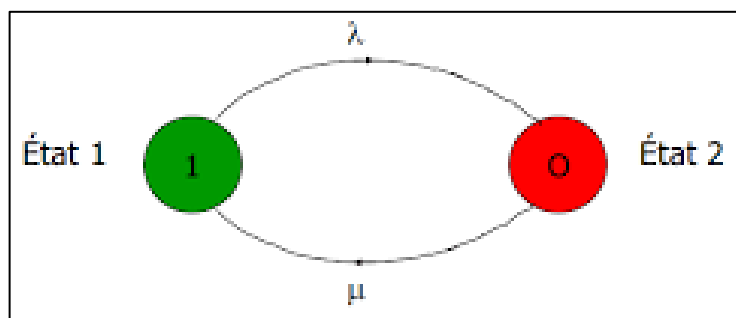


Figure. III.12. Modèle Markovien [88].

L'ensemble T étant une suite discrète, on dit soit processus soit chaîne de Markov.

III.6.2. Processus de Poisson

Un processus de Poisson (PP) nommé d'après le mathématicien français Siméon Denis Poisson et la loi du même nom, est un processus de Lévy défini sur un espace de temps continu. Ce processus est largement utilisé dans la modélisation des phénomènes aléatoires pour décrire les instants d'occurrence d'un événement récurrent. Le processus de Poisson est un cas particulier des processus ponctuels [89].

On appelle processus ponctuel sur R la trace de la suite croissante $(T_n)_{n \geq 1}$ des variables aléatoires positives signalant les instants où se produit un événement [90]. Associé à ce processus, on définit :

- La fonction aléatoire appelée fonction de comptage $N(t)$ et définie sur l'espace des naturels pour $t \geq 0$ par :

$$N(t) = \sum_{n \geq 1} 1_{\{T_n \leq t\}} \quad (\text{III.33})$$

Cette fonction décrit le nombre d'événements se produisant jusqu'à l'instant t .

- La loi du processus $(T_n)_{n \geq 1}$ et celle du processus $(N(t))_{t \geq 0}$ sont liées par la relation suivante :

$$P(T_1 \leq t_1, T_2 \leq t_2, \dots, T_n \leq t_n) = P(N(t_1) \geq 1, N(t_2) \geq 2, \dots, N(t_n) \geq n) \quad (\text{III.34})$$

- La variable aléatoire de temps d'attente, également nommée temps d'inter occurrence $\Delta T_i = (T_{i+1} - T_i)$ décrit le délai entre deux événements successifs.

Le processus ponctuel $(T_n)_{n \geq 1}$ est dit un processus de Poisson homogène de taux λ si les variables de temps inter-occurrence $(T_i)_{i \geq 1}$ sont indépendantes et identiquement distribuées suivent la même loi exponentielle de paramètre λ . Dans ce cas, la variable

aléatoire $N(t)$ pour tout $t \geq 0$ suit une loi de Poisson de paramètre λt d'où le nom du "Processus de Poisson".

Un processus de Poisson homogène de taux λ et de fonction de comptage $N(t)$ vérifie les propriétés suivantes [91] :

- $N(0) = 0$ presque sûrement.
- le processus $N(t)$ est un processus markovien, continu à droite, et à accroissements indépendants.
- pour $0 \leq s \leq t$ la variable aléatoire $N(t) - N(s)$ suit la loi de Poisson de paramètre $(t - s)$, qui est donnée par la formule suivante :

$$P(N(t) - N(s) = n) = \frac{(\lambda(t-s))^n}{n!} e^{-\lambda(t-s)} \quad (\text{III.35})$$

Une forme plus compliquée du processus de Poisson est le processus de Poisson *non homogène*. Le taux d'un processus de Poisson non-homogène est défini comme une fonction de temps. On dit que le processus de Poisson est non-homogène d'intensité dA s'il existe une mesure positive dA sur R^+ tel que :

$$A(t) = \int_{[0,t]} dA(s) \quad (\text{III.36})$$

Ainsi, la variable aléatoire $N(t)$ suit une loi de Poisson de paramètre $A(t)$ pour tout $t \geq 0$. Généralement pour ce processus, les variables de temps inter-occurrence $(\Delta T_i)_{i \geq 1}$ ne sont plus indépendantes ni identiquement distribuées.

III.6. 3. Martingale

Une martingale désigne un type de processus stochastique tel que sa valeur espérée, \mathbb{F} connaissant l'information disponible à une certaine date n , dénoté $\mathbb{F}(n)$, est sa valeur à cette même date, dont la définition mathématique d'une martingale est la suivante :

Une suite (X_n) de variables aléatoires définies sur un espace probabilisé $(\Omega, \mathcal{C}, Pr)$ est une martingale si [69]. :

- l'espérance $E(X_n | \mathbb{F}(n))$ est finie pour toute valeur de t .
- $E(X_{n+1} | \mathbb{F}(n)) = X_n \forall n \geq 1$ (presque sûrement).

III.6.4. Réseaux bayésiens (RB)

Les réseaux bayésiens sont devenus un outil de modélisation probabiliste essentiel dans différents domaines, notamment dans le domaine de l'analyse des risques, la sûreté de fonctionnement et la maintenance des systèmes. Initialement apparu dans le domaine de l'intelligence artificielle, ils combinent des représentations de la connaissance sous forme graphique (des relations de dépendance directe) et probabiliste (une incertitude sur la connaissance) [92]. Les réseaux bayésiens constituent une généralisation des arbres de défaillance, du moment qu'il existe toujours une possibilité de transformer un arbre de défaillance en un réseau bayésien. La transformation réciproque n'est pas toujours unique.

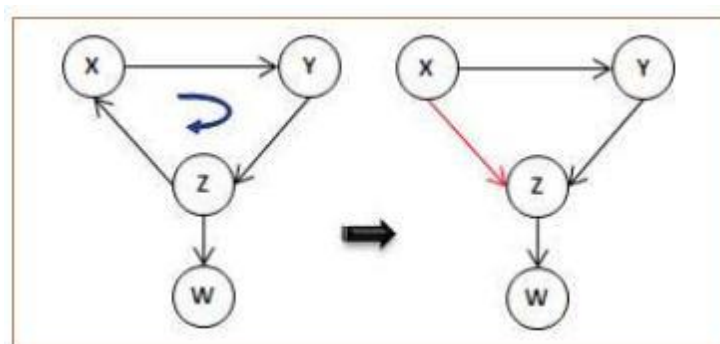


Figure. III.13. exemple d'un circuit dans un réseau Bayésien

Ce formalisme de modélisation permet d'établir une prévision du futur à partir du passé [93] et il est formé des éléments suivants :

- Un graphe orienté sans circuit dans lequel les nœuds représentent les variables d'un système et les arcs représentent les dépendances et les liens entre les variables.
- Un ensemble de distributions locales de probabilités qui constituent les paramètres du réseau ; chaque nœud comporte une table de probabilité représentant la distribution locale de probabilité, qui ne dépend que de l'état des parents du nœud (les tables sont une représentation quantitative de la connaissance).

III.6.5. Réseaux de Pétri Stochastiques (RdPS)

La dynamique d'un système fait que le comportement futur dépend du comportement passé. L'approche Markovienne ne permet pas de prendre en compte cet aspect à cause de l'absence de mémoire (modèles sans mémoire). Certaines extensions comme la méthode des états fictifs permettent de pallier ces difficultés, mais au prix de multiplication du nombre des états qui peuvent devenir rapidement très important.

Donc le problème majeur de la construction d'un graphe de Markov est l'explosion du nombre d'états, et le manque de représentativité de certains phénomènes ou mécanismes physiques.

Les RdPS sont des outils d'analyse de la structure et du comportement des systèmes dynamiques à événements discrets. Basés sur la description des relations existant entre les conditions et les événements intervenant sur le système, ils s'appuient sur une représentation mathématique qui s'ouvre à différentes formes d'analyse. De nombreux travaux et ouvrages exposent les caractéristiques des RdPS et les principales extensions auxquelles ils ont donné lieu.

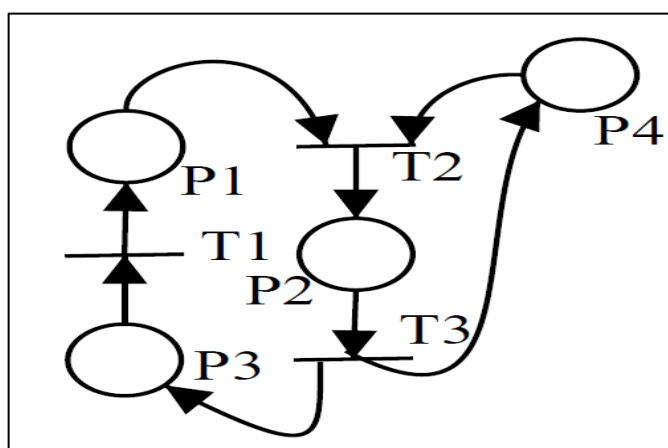


Figure. III.14. Exemple d'un Réseau de Pétri [94].

Les RdPS Stochastiques sont une extension des Réseaux de Pétri pour lesquels sont associées à chaque transition une variable aléatoire temporelle avec sa fonction de densité de probabilité. Les RdPS sont souvent couplés à la méthode de simulation de Monte-Carlo évoquée plus loin. Les RdPS permettent deux formes d'exploitation :

- L'analyse directe du graphe des marquages conséquents qui permet de caractériser les propriétés générales et spécifiques (analyse de points de vue) du modèle (le traitement du graphe de marquage est une analyse qualitative).

III.6.6. 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.

Le processus Levy est un processus stochastique à temps continu associe une variable aléatoire à tout instant $t \geq 0$. Donc, c'est une fonction aléatoire de t . Les accroissements d'un tel processus sont les différences $Y_s - Y_t$ entre ses valeurs à différents instants $t < s$ [95].

Un processus $(Y_t)_{t \geq 0}$ est un processus de Levy stationnaire s'il satisfait les propriétés suivantes [96] :

- $Y(0) = 0$.
- $Y(t)$ est un processus stochastique à accroissements indépendants à trajectoires continues $Y(t+s) - Y(s) \stackrel{d}{=} Y(t)$, c'est-à-dire $Y(t+s) - Y(s)$ est indépendant de $(X(u) : u \leq s)$ où μ est le coefficient de dérive.
- $t \rightarrow Y(t)$ est presque sûrement continue à droite et limitée à gauche.
- Pour tout $t > 0$, la loi d'accroissement $Y(t+s) - Y(s) \stackrel{d}{=} Y(t)$ est une loi de Lévy de densité :

$$f(x) = \sqrt{\frac{\sigma}{2\pi}} \frac{e^{(-0.5\sigma/x - \gamma)}}{(x-\gamma)^{3/2}} \quad (\text{III.37})$$

γ : paramètre de localisation, σ : paramètre d'échelle,

III.6.7. Processus Gamma

Le processus Gamma est un processus de Lévy dont les incréments de dégradation suivent une loi Gamma [97]. 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.

Un processus Gamma décrit une trajectoire des dégradations à accroissements indépendants positifs qui peut être stationnaire ou non-stationnaire [98]. Il a été utilisé avec succès dans de nombreuses applications avec des données réelles [99,100].

Le processus $X(t)$ est un processus Gamma stationnaire $Ga(\alpha, \beta)$ [101] si :

- $X(0)=0$
- $X(t)$ est un processus à accroissements indépendants et positifs.
- Pour tout $t > 0$ et $\Delta t > 0$, la loi d'accroissement $X(t+\Delta t) - X(t)$ est une loi gamma $Ga(\alpha\Delta t, \beta)$ de densité :

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha\Delta t}}{\Gamma(\alpha\Delta t)} x^{\alpha h\Delta t - 1} e^{-x/\beta} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

α : paramètre de forme, β : paramètre d'échelle, x : la variable aléatoire qui traduit les valeurs vibratoires, h : Le pas de temps, $\Gamma(x)$ est la fonction Gamma d'Euler définie par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (\text{III.39})$$

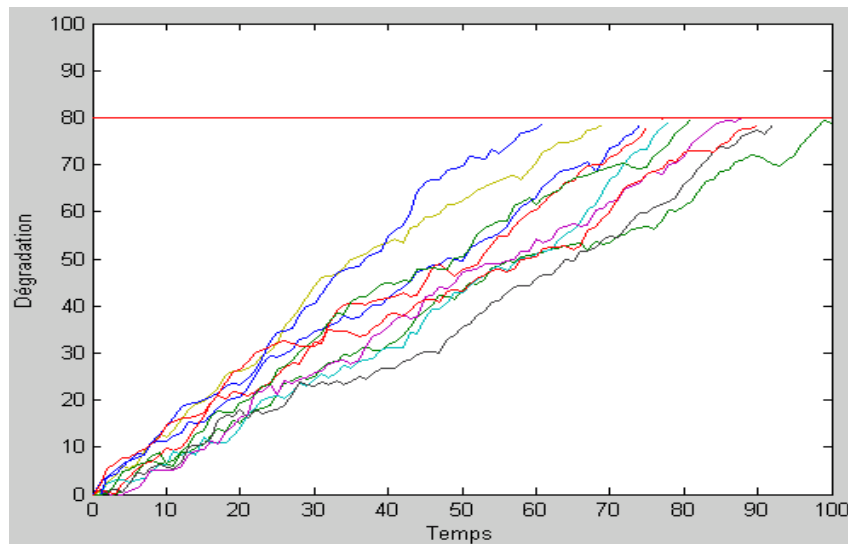


Figure. III.15. trajectoires simulées par le processus gamma

III.6.8. 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 [102], 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.

Le processus Wiener est un processus à accroissements indépendants avec une tendance croissante [103]. Celui-ci 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 σ^2 si [104] :

- $Y(0) = 0$ presque sûrement.

- Y est un processus à accroissements indépendants.
- Quel que soit $t > 0$ et $h > 0$, la loi de l'accroissement $Y(t + h) - Y(t)$ est une loi normale $N(\mu h, \sigma^2 h)$ de densité :

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi h}} \exp\left(-\frac{(x-\mu h)^2}{2h\sigma^2}\right) \quad (\text{III.40})$$

Pour tout $t > 0$, $E(Y(t)) = \mu t$ $\text{Var}(Y(t)) = \sigma^2 t$ et $Cv(Y(t)) = \sigma/\mu\sqrt{t}$,

Avec $E(\cdot)$ l'espérance, $\text{Var}(\cdot)$ la variance et $Cv(\cdot)$ 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 [69] :

Dans ce cas $N(0, 1)$ une loi normale de moyenne $\mu = 0$ et d'écart-type $\sigma = 1$:

$$W(t + h) - W(t) = \beta \times N(0,1) + \alpha \times h \quad (\text{III.41})$$

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 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 donnée par la formule suivante :

$$B(t) = \mu_d t + \sigma_d W(t) \quad (\text{III.42})$$

Avec: μ_d, σ_d sont respectivement les deux paramètres de dérive et de volatilité du modèle.

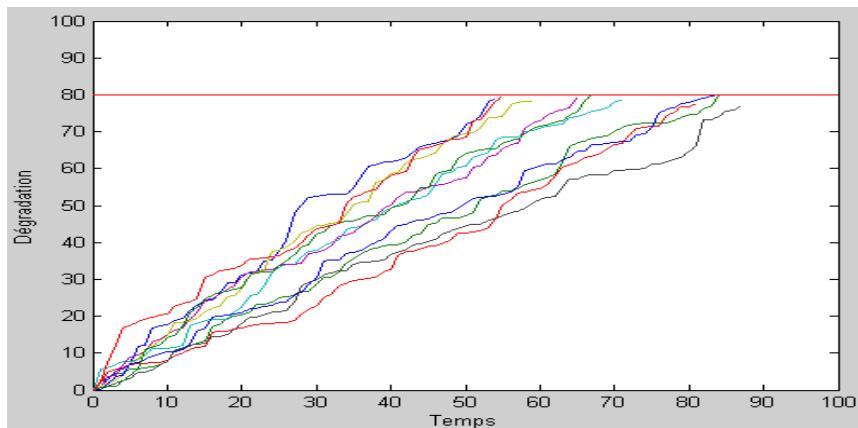


Figure. III.16. trajectoires simulées par le processus de Wiener

Les processus de Wiener font l'objet de larges applications dans l'analyse des données de dégradation ainsi que des données dans le domaine des finances. Par exemple, Park and Padgett [105] ont utilisé ce processus pour définir un modèle de base qui décrit l'évolution de dommages cumulatifs des matériaux. Yu Wang [106] a utilisé le modèle pour étudier l'usure de la tête magnétique des disques durs. Doksum [107] 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.

III.7. La probabilité et les statistiques

La théorie des probabilités est une branche des mathématiques qui traite des propriétés de certaines structures, d'où le hasard intervient dans la modélisation des phénomènes. Considérer comme une théorie mathématique abstraite qui repose sur une axiomatique et se développe de façon autonome par rapport à la réalité physique [108].

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 [108].

III .8. 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. Le 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 [73].

Les tests peuvent être classés en différentes catégories :

- Tests sur une hypothèse relative à la valeur particulière d'un ou plusieurs paramètres ou tests paramétriques.
- Tests de conformité de deux distributions ou *tests d'ajustement* entre une distribution théorique et une distribution expérimentale.
- Tests de comparaison de deux populations (comparaison des moyennes, des variances...).
- Tests 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 a priori s'appellent :

" H_0 " l'hypothèse nulle selon laquelle on fixe a 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 .

Avant 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.

III.9. 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 [109].

Exemple : On a de bonnes raisons d'admettre

- qu'un dé est équilibré.

- que la durée de vie d'un équipement électrique obéit approximativement à une loi exponentielle.
- que le nombre d'articles défectueux par envoi ne dépasse pas une valeur donnée.
- que deux machines fonctionnent indépendamment l'une de l'autre.

De telles hypothèses statistiques sont alors acceptées ou rejetées, en vue 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 priser avec une certitude absolue, quelle qu'en soit la conclusion, le risque de se tromper existe toujours.

III.10. Les principaux tests d'adéquation à une loi

Un test d'adéquation permet de statuer sur la compatibilité d'une distribution observée avec une distribution théorique associée à une loi de probabilité. Il s'agit de modélisation [110].

Les tests statistiques sont des méthodes de la statistique inférentielle comme l'estimation. Ils permettent d'analyser des données obtenues par tirages au hasard. Ils consistent à généraliser les propriétés constatées sur des observations à la population, d'où ces dernières sont extraites, et à répondre à des questions concernant par exemple, la nature d'une loi de probabilité, la valeur d'un paramètre ou l'indépendance de deux variables aléatoires. Nous retrouverons dans certains cas la démarche utilisée en estimation.

III.10.1. Le test du Chi-deux

Le test d'adéquation du khi-deux, certainement le plus ancien et le plus connu, a été introduit au début du siècle par Karl Pearson [111].

Le test du χ^2 convient quelle que soit la nature de la variable aléatoire étudiée. Si on veut tester l'adéquation à une loi multinomiale d'une variable aléatoire discrète, elle convient. Si on veut tester une variable aléatoire continue, il suffit de la découper en intervalles, et elle peut s'appliquer également. Mais dans ce cas, elle est peu puissante. En effet, intervertir les lignes du tableau de calcul n'a pas d'incidence sur les résultats. Or, cette interversion n'a aucun sens si la variable aléatoire est continue, les modalités (les intervalles dans ce cas) sont ordonnées. Pour modifier cet ordre, il devrait altérer, ou même rendre caduque, les conclusions du test d'adéquation [75].

III.10.2. Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov

Lorsque la variable aléatoire X est continue, ou tout du moins prend des valeurs ordonnées, le test de Kolmogorov-Smirnov (K.S.) est une alternative plus puissante au test du χ^2 . Elle s'appuie sur la comparaison de la fonction de répartition empirique avec la fonction de répartition théorique construite à partir de la loi modélisée. Pour que ce rapprochement ait un sens, il est évident que variable aléatoire doit être ordonnée [75].

III.10.3. Test de Shapiro-Wilk ($n \leq 50$)

Pour la loi normale, le test de Shapiro-Wilk est plus puissant que tout autre test connu lorsque la taille de l'échantillon est inférieure à 50 observations [111].

Le test de Shapiro-Wilk (W) est utilisé pour tester la normalité. Si la statistique W est significative, il faut alors rejeter l'hypothèse selon laquelle la distribution correspondante est normale.

III .11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents outils probabilistes de modélisation des phénomènes aléatoires. Car cette dernière, nous permettra de modéliser la dégradation des systèmes 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 en conséquence leur taux de défaillance. Nous avons aussi présenté en bref quelques processus stochastiques, ainsi que les méthodes modernes de diagnostic et d'analyse qui s'appuient sur des modélisations stochastiques de dégradation de systèmes complexes. Et ensuite, nous avons abordé les principaux tests d'adéquation à une loi.

Chapitre IV
Simulation stochastique

Sommaire

IV.1. Introduction.....	79
IV.2. Description du système industriel étudié.....	79
IV.3. Action de maintenance préventive sur les paliers lisses.....	81
IV.4. Méthodologie du travail.....	81
IV.5. Analyse des données.....	82
IV.5.1. Test statistique d'ajustement des valeurs vibratoires collectées.....	83
IV.5.2. Test statistique d'ajustement de l'échantillon des températures.....	84
IV.6. Simulation MATLAB.....	86
IV.6.1. Simulation de l'évolution des valeurs vibratoires.....	86
IV.6.2. Simulation de la variation de la température du palier lisse.....	87
IV.7. Estimation de la fiabilité (fonction de survie).....	89
IV.8. Interprétation des résultats.....	90
IV.9. Conclusion.....	90

IV.1. Introduction

La modélisation stochastique des processus de dégradation est un élément décisif dans l'estimation des modèles probabilistes, dans laquelle cette estimation s'appuiera sur les prévisions extrapolées de l'analyse, ainsi que de l'évaluation de la dégradation d'un système, dont le but d'agir dans un temps opportun. L'analyse vibratoire est l'outil de la maintenance conditionnelle le plus utilisé actuellement pour le suivi du fonctionnement des machines tournantes, elle permet de détecter la majorité des défauts affectants un système industriel, à savoir les machines tournantes.

Les modèles stochastiques, et particulièrement les modèles de dégradation continue, ont fait l'objet de nombreux travaux, afin de définir une loi décrivant la dégradation des systèmes. Cette loi est nécessaire pour description d'un tel processus Gamma, ce dernier est considéré un cas des processus de Lévy.

Le processus Gamma est un outil qui permet de modéliser une dégradation croissante dans le temps. Il a été utilisé avec succès dans de nombreuses applications avec des données réelles [112]. Le processus Gamma est fréquemment utilisé dans la littérature puisqu'il traduit le non réversibilité d'une dégradation ce qui peut convenir du point de vue physique (par exemple dans le cas d'une détérioration monotone).

Donc, cette partie est réservée pour discuter avec beaucoup de détail les processus stochastiques utilisés pour la modélisation de la dégradation d'un compresseur centrifuge, et qui sont ; le processus Lévy et celui de Gamma. Ils permettent de prédire avec succès la dégradation du système par une simulation de l'évolution de la dégradation au cours du temps d'un palier lisse.

IV.2. Description du système industriel étudié

Le présent travail a pour objectif de simuler le processus de la dégradation d'un palier lisse (figure .IV.2), ce dernier est installé sur un compresseur centrifuge (figure. IV.1). Le compresseur possède les caractéristiques suivantes :

Type équipement : barrel multi stage compresseur
Fluide véhicule : Process gaz
Pression maximale de service : 21,8 Kg / Cm²G design pression
Pression essai : 32.8 kg / cm²G
Température de calcul : 130 ° C
Température de service : 112 ° C (maximale)



Figure. IV.1. Installation du compresseur centrifuge

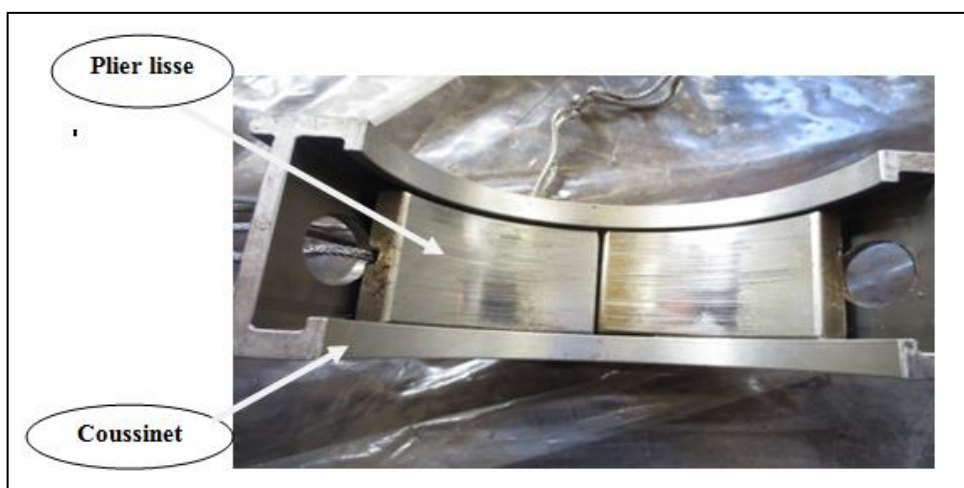


Figure. IV.2. Palier lisse étudié

Pour la collecte des données à analyser, nous avons choisi le point 34, il s'agit d'un palier intermédiaire entre le compresseur et la turbine alimentée en air comprimé par ce dernier. L'amplitude vibratoire et la température de service se sont les deux grandeurs physiques concernées par notre étude, ils ont un suivi particulier selon l'historique de la machine.

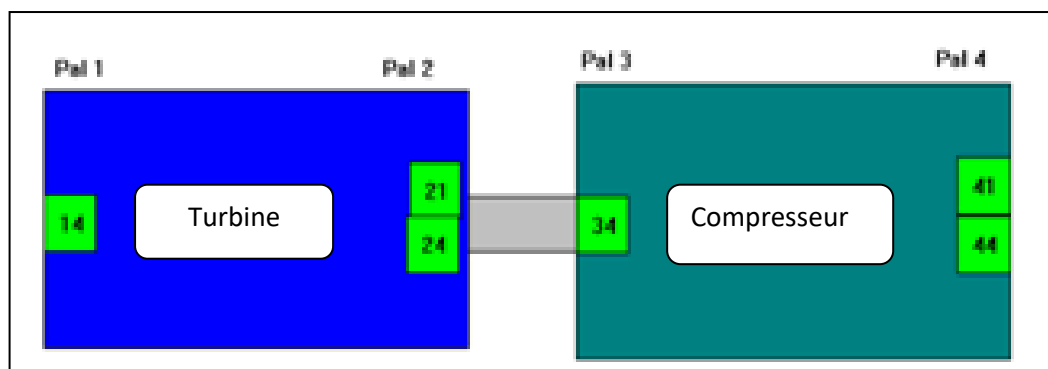


Figure. IV.3. Schéma de la machine

IV.3. Action de maintenance préventive sur les paliers lisses [113]

Les paliers lisses du compresseur centrifuge ont un programme de maintenance préventive rigoureux, en effet les actions de maintenance suivantes sont programmées :

- Le contrôle de l'état et le jeu des paliers lisses.
- La vérification qu'ils ne présentent aucune rayure, fissure, entaille ou traces de choc sur le métal antifriction, et vérifier que la liaison entre le métal antifriction et les socles de palier est bonne.
- La vérification du jeu aux paliers à l'aide de fils fusibles ou de plasti-jauge. Le jeu aux paliers n'est pas ajustable et les socles doivent être remplacés lorsque le jeu devient excessif, (lorsque le remplacement est nécessaire, remplacer l'ensemble du socle de palier).
- La vérification du contact des socles de paliers dans le boîtier et sur le tourillon (si une mauvaise configuration d'usure s'est développée).

IV.4. Méthodologie du travail

Le suivi du processus de dégradation des paliers lisses du compresseur centrifuge en question va nous permettre d'évaluer la durée de fonctionnement limite de l'organe, ainsi que l'évolution du changement de son état dans le temps.

Pour cette étude, les mesures suivantes ont été effectuées :

1- La mesure des amplitudes vibratoires à différents intervalles de temps réguliers appelés "classe d'âge ou périodicité de mesure". L'évolution de la vibration enregistrée sur un palier lisse est exprimée par deux niveaux : le niveau d'alarme et celui d'alerte, à cet effet nous allons considérer que chaque dégradation passe obligatoirement par ces deux niveaux.

2- Des mesures de température de service correspondantes à ces vibrations.

L'intention à travers ce travail, est de faire associer une simulation aux résultats obtenus lors d'une analyse effectuée sur la dégradation du palier lisse du compresseur centrifuge en question.

Premièrement, on effectue un test d'ajustement statistique sur les mesures (amplitude vibratoire et température), et ce afin de déciller toutes les informations sur les échantillons à analyser (μ, σ, H_0, α), dont :

- μ : la moyenne du modèle.

- σ : l'écart-type.
- α : le degré de risque (intervalle de confiance).
- H_0 : hypothèse testée par l'ajustement de Kolmogorov.

Finalement, une simulation de l'évolution du changement de l'état du palier lisse du compresseur par le processus Gamma et celui de Lévy va être proposé.

IV.5. Analyse des données

L'analyse statistique de la conformité des échantillons (amplitudes vibratoires et les températures de service), a été réalisée par l'utilisation d'un logiciel Easy-fit 5.4. Ce dernier permet de vérifier si les mesures suivent les lois Lévy et celui de Gamma ou non.

En effet, le suivi du fonctionnement du compresseur centrifuge nous a permis de collecter les données présentées sur les tableaux (IV.1) et (IV.2).

Tableau. IV.1 : Mesures vibratoires

N°	Vibrations ; (g)	N°	Vibrations ; (g)
1	3.57	16	2.22
2	0.59	17	0.60
3	0.91	18	1.89
4	1.00	19	1.56
5	0.95	20	0.84
6	1.13	21	1.78
7	2.21	22	2.43
8	1.89	23	1.45
9	1.10	24	2.45
10	3.38	25	2.99
11	1.33	26	2.67
12	2.92	27	2.31
13	1.96	28	1.22
14	0.57	29	0.89
15	0.62	30	0.78

Tableau. IV.2 : Mesures de températures

N°	Températures ; (C°)	N°	Températures ; (C°)
1	58	11	73
2	65	12	52
3	52	13	62
4	55	14	53
5	66	15	66
6	60	16	52
7	52	17	70
8	60	18	57
9	65	19	59
10	53	20	68

Avant de procéder à la simulation afin de décrire la loi de la variation des paramètres du comportement du compresseur, à savoir la vibration et la température, on doit vérifier la conformité des échantillons à travers un test statistique, et ce pour vérifier l'adéquation de la distribution des données selon les lois appropriées par rapport aux processus choisis.

IV.5.1. Test statistique d'ajustement des valeurs vibratoires collectées

▪ Vérification de la distribution

En premier lieu, on doit réaliser un test sur l'échantillon des amplitudes vibratoires, pour ce faire, on adopte l'utilisation d'un logiciel statistique Easy-fit 5.4, dont l'idée globale de ce test est de comparer la répartition des données collectées (mesures effectuées) par rapport à une fonction de répartition théorique. En effet, les figures (IV.4) et (IV.5) montrent respectivement la fonction de densité de probabilité, ainsi que celle de répartition des amplitudes vibratoires, elles suivent une loi Gamma.

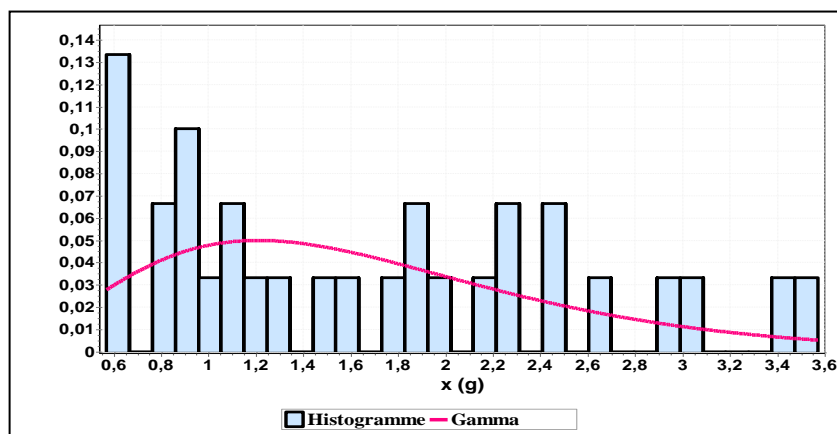


Figure. IV.4. Fonction de densité de probabilité la loi gamma

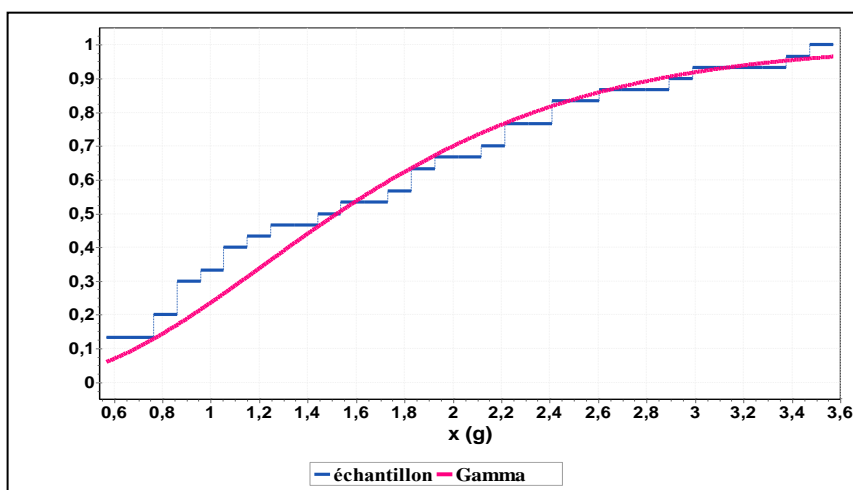


Figure. IV.5. Fonction de répartition la loi gamma.

La réalisation d'un test statistique sur l'échantillon des amplitudes vibratoires, collectées par des mesures effectuées sur le palier lisse étudié, montre que les vibrations enregistrées suivent une loi Gamma, avec des paramètres (écart type $\beta = 0.46304$, la moyenne $\alpha = 3.6145$).

D'après le test statistique de Kolmogorov-Smirnov, l'ajustement des données observées (amplitudes vibratoires) sont acceptées par la règle de décision, et ce quelque soit le degré de risque $\alpha = [0.1; 0.2; 0.01; 0.02; 0.05]$.

▪ **Test d'ajustement**

La distribution des données observées peut être écrite par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable, Selon la distribution Gamma, les résultats issus du test statistiques sont les suivants :

- Taille de l'échantillon= 30
- Statistique=0,09952
- Valeur de p=0,89917

Tableau. IV. 3 : Résultat d'ajustement selon la loi gamma

α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,19032	0,21756	0,2417	0,27023	0,28987
Rejeter ?	Non	Non	Non	Non	Non

IV.5.2. Test statistique d'ajustement de l'échantillon des températures

Pour la vérification de l'adéquation des valeurs des températures de service du palier lisse mesurées, on suit la même méthodologie appliquée sur les amplitudes vibratoires. En effet, l'évolution de la température selon le processus de Lévy est donnée par les figures (IV.6) et (IV.7).

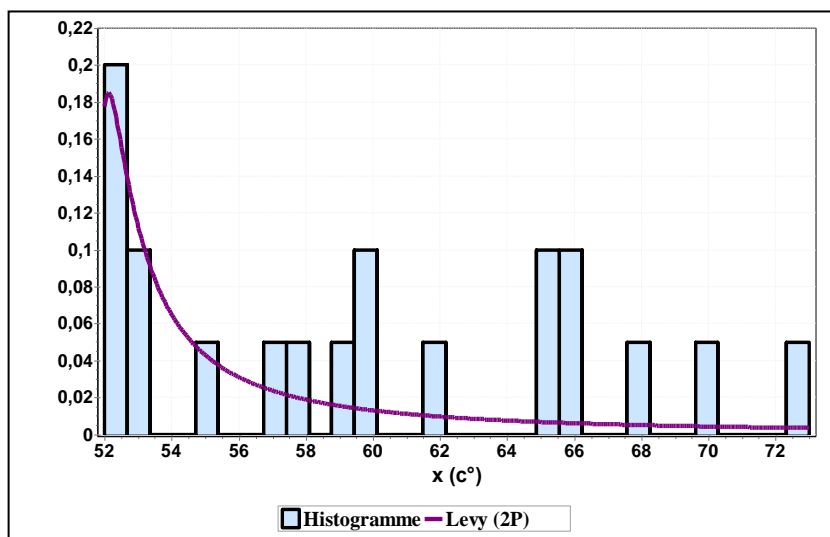


Figure. IV.6. Fonction de densité de probabilité de la loi Lévy ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$) pour la température de palier

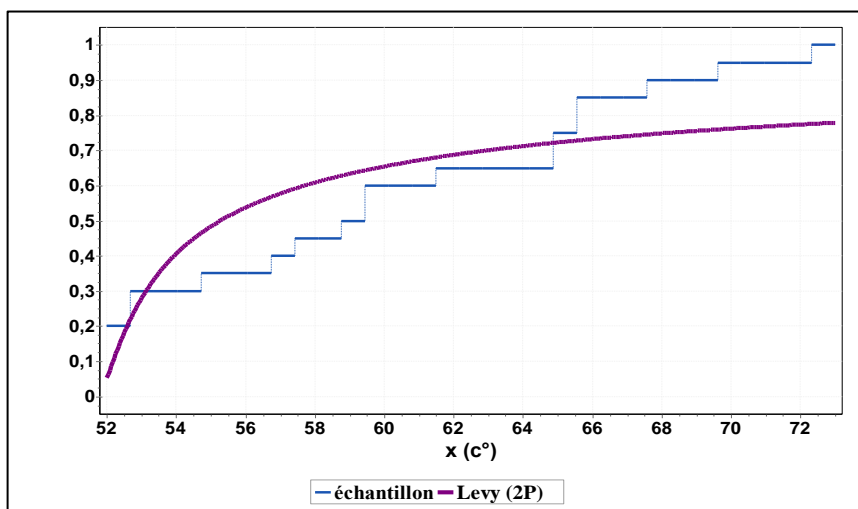


Figure. IV.7. Fonction de répartition de la loi Lévy ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$) pour la température de palier.

Les données observées peuvent être décrites par une loi de probabilité théorique considérée comme étant un modèle convenable, le résultat du test d'ajustement selon une loi Lévy est le suivant :

- Taille de l'échantillon=20
- Statistique=0.22721
- Valeur de p=0.21725

Tableau. IV. 4 : Résultat d'ajustement selon la loi Lévy

α	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valeur critique	0,23156	0,26473	0,29408	0,32866	0,35241
Rejeter ?	Non	Non	Non	Non	Non

Après la vérification de l'adéquation de l'ajustement de l'échantillon des températures de services par rapport à la une loi Lévy à deux paramètres dont les valeurs sont les suivantes : $\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$. On peut confirmer que l'évolution de la température du palier lisse étudié suit un processus de dégradation de Lévy.

IV.6. Simulation sur MATLAB

IV.6.1. Simulation de l'évolution des valeurs vibratoires

La simulation du processus de dégradation Gamma ($\alpha = 3.6145$ et $\beta=0.46304$) est jugée nécessaire, ce qui nous va permettre de décrire des trajectoires de dégradation croissantes, cela peut entrainer une diminution de la dégradation entre deux instants successifs. Les résultats de simulation sur Matlab de l'évolution des vibrations selon le processus gamma sont représentés par les figures (IV.8) et (IV.9).

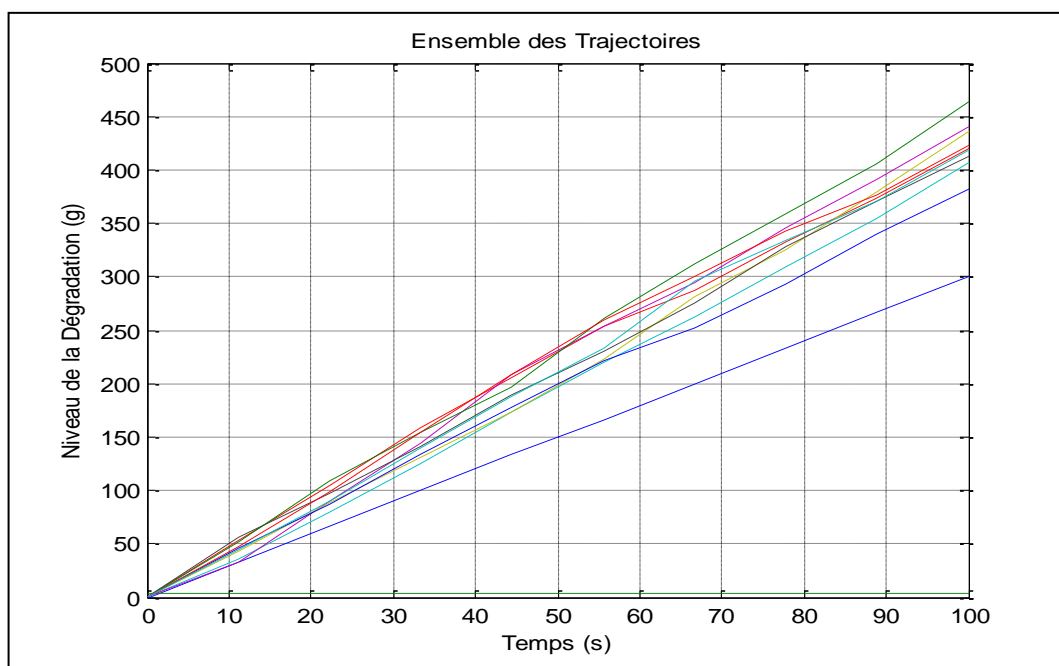


Figure. IV.8. Tracé de 10 trajectoires selon le processus Gamma de paramètres ($\alpha = 3.6145$ et $\beta=0.46304$).

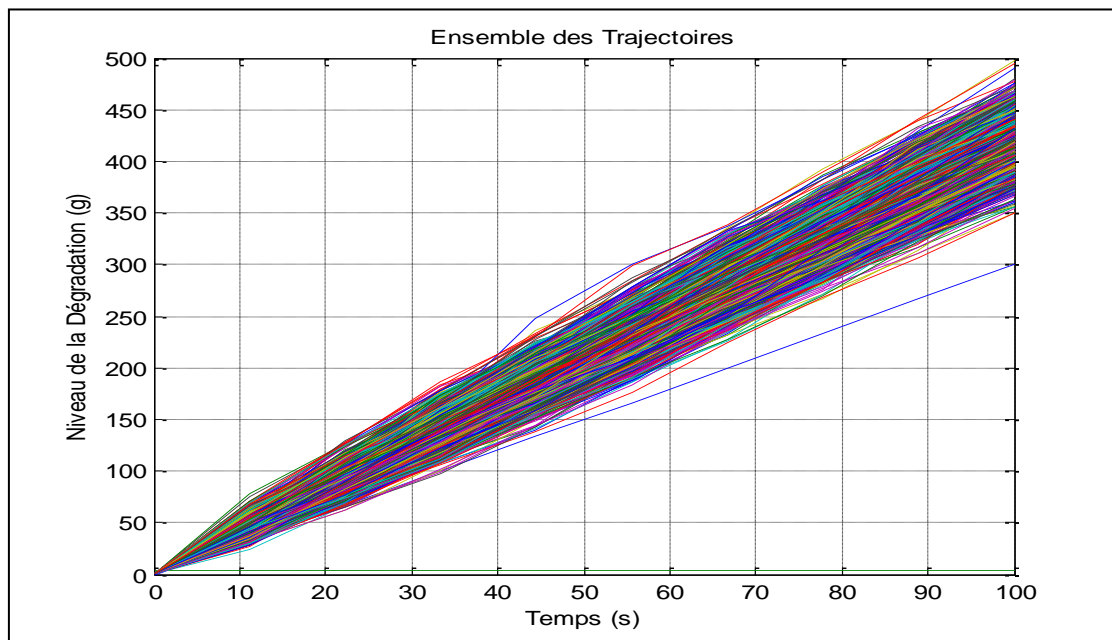


Figure. IV.9. Tracé de 1500 trajectoires selon le processus Gamma de paramètres ($\alpha = 3.6145$ et $\beta=0.46304$).

On voit clairement d'après les figures (IV.8) et (IV.9), que le niveau de dégradation du palier lisse traduit par l'évolution des amplitudes vibratoires (niveau de vibration). En effet, la dégradation est proportionnelle avec le temps, et elle suit une loi Gamma.

En conséquence, la simulation proposée pour 10 et 1500 trajectoires de dégradation selon le processus Gamma fournit une bonne prédiction.

IV.6.2. Simulation de la variation de la température du palier lisse

La simulation sur Matlab de la variation de la température selon le processus Lévy à deux paramètres ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$) pour une loi Gamma, nous a permis l'obtention des résultats présentés par les figures (IV.10) et (IV.11).

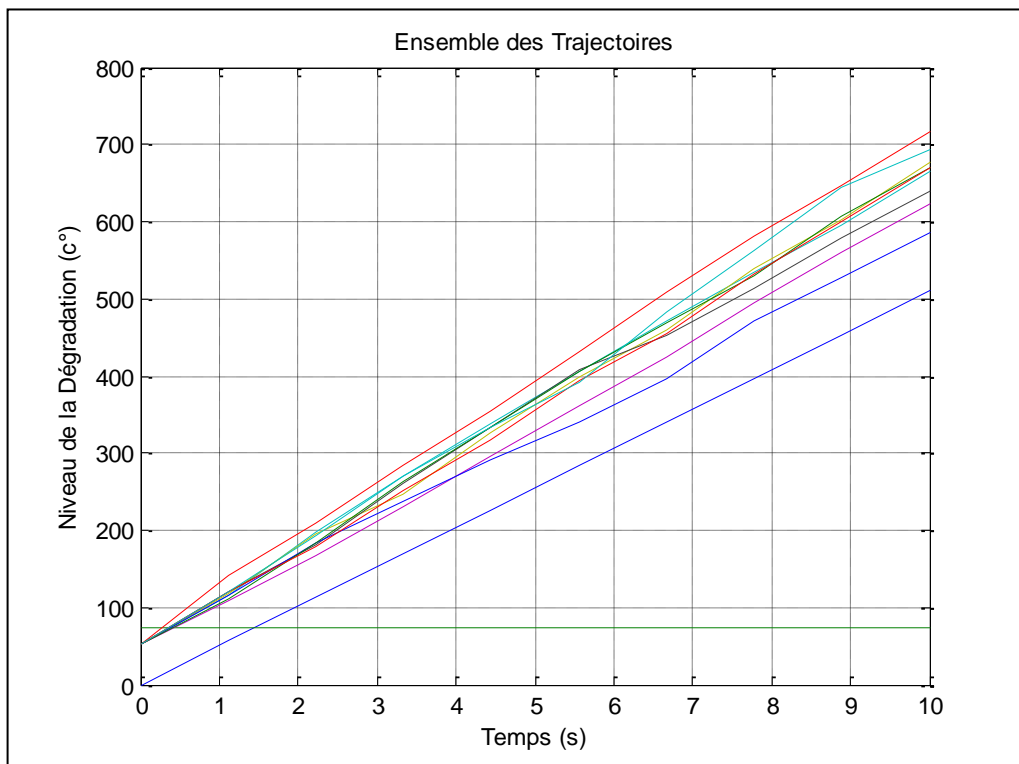


Figure. IV.10. Tracé de 10 trajectoires selon le processus Lévy de paramètres ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$).

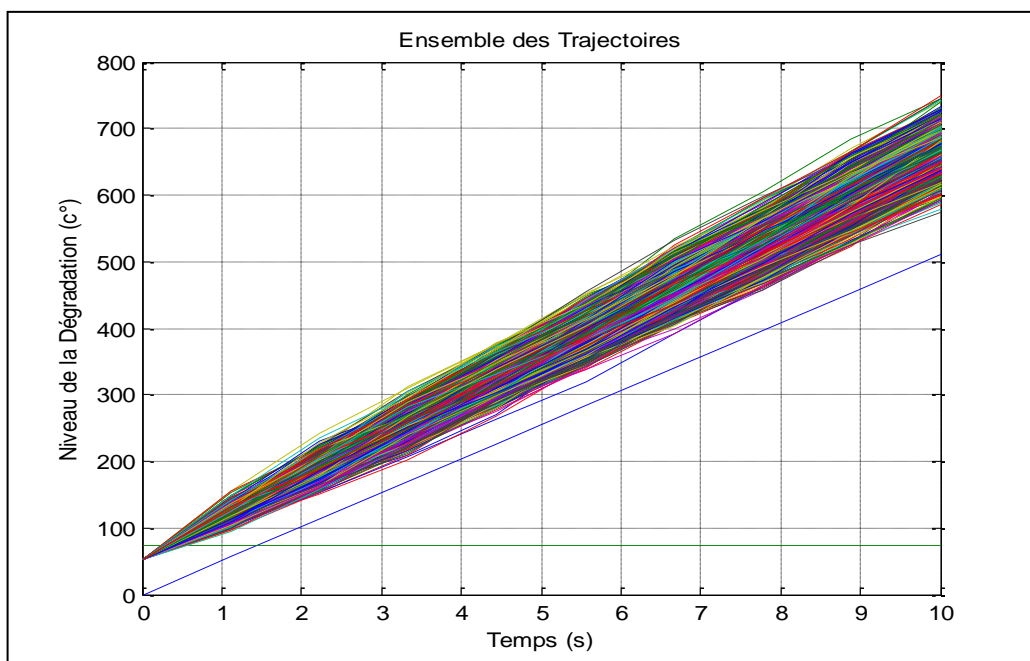


Figure. IV.11. Tracé de 1500 trajectoires selon le processus Lévy de paramètres ($\sigma=1,6937$ et $\gamma=51,55$).

Par l'analyse des figures (IV.10), et (IV.11), on confirme aussi que l'évolution de la température de service du palier lisse peut être simulée selon le processus de dégradation de

Lévy. En effet, une simulation de la variation de la température pour le tracé par exemple de 10 et 1500 trajectoires et donnée, elle fournit aussi une bonne prédiction.

IV.7. Estimation de la fiabilité (fonction de survie)

L'analyse ainsi que le calcul de la fiabilité dans le domaine de la mécanique sont des outils très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie ; mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

La fiabilité d'un dispositif au bout d'un temps t correspond à la probabilité, pour que ce dispositif n'ait pas de défaillance entre 0 et l'instant t .

En désignant par T la variable aléatoire caractérisant l'instant de défaillance du dispositif, la fiabilité s'exprime par la fonction $R(t)$ elle représente la probabilité qu'une entité E soit non défaillante sur la durée $[0 ; t]$, en supposant qu'elle n'est pas défaillante à l'instant $t=0$)

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t) \quad (\text{IV.4})$$

D'où ; $F(t)$ est la fonction de répartition de la variable T

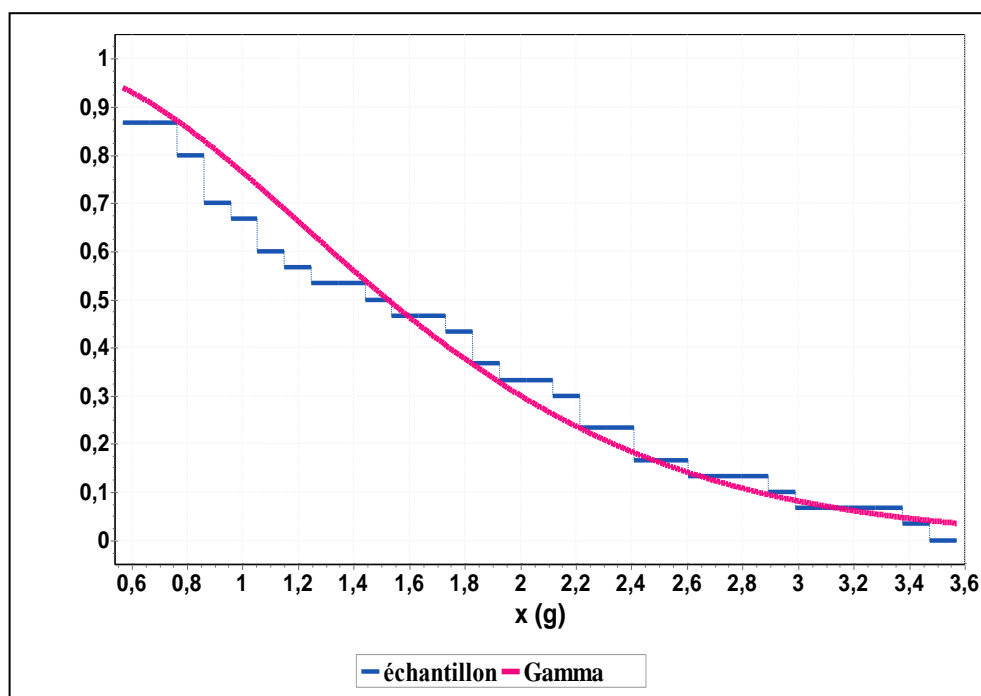


Figure. IV.12. Fonction de fiabilité (fonction de survie) selon la loi Gamma pour les mesures de vibratoires.

La figure (IV.12) représente la fonction de survie (fiabilité), d'après cette dernière nous constatons une bonne corrélation des données observées (amplitudes vibratoires) avec la fonction de fiabilité théorique (selon une loi Gamma).

IV.8. Interprétation des résultats

L'exécution du test statistique montre que les mesures vibratoires de la dégradation de palier lisse étudié suivent une loi Gamma d'écart type =0.46304 et de moyenne =3.6145. D'après le test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov, les données observées sont acceptées par la règle de décision et ce quelque soit le degré de risque $\alpha=[0.1; 0.2; 0.01; 0.02; 0.05]$, de sorte que l'hypothèse du test (H_0) a été réalisée, les valeurs de α représentent les valeurs de l'intervalle de confiance, le test statistique est inférieure à la valeur critique. Donc la règle de décision est acceptée.

Exemple : Pour un degré de risque $\alpha=0.01$

- Le test statistique vaut : $D = 0.13449$
- La valeur critique vaut : $D_0 = 0.28987$
- Règle de décision : $D < D_0$ (Acceptée).

III.9. Conclusion

Un processus stochastique est un phénomène d'évolution temporelle, dont l'analyse peut être soumise au calcul des probabilités. Du point de vue observation, un processus stochastique est constitué par l'ensemble de ses réalisations. Une telle concrétisation consiste à enregistrer une suite d'événements au cours du temps. Le caractère aléatoire de l'évolution d'une grandeur physique est montré par le fait que la répétition de l'expérience conduit à une autre séquence temporelle.

Par le présent travail, nous avons abordé l'utilisation de deux processus stochastique de dégradation. Ces derniers nous ont permis de simuler l'évolution de l'amplitude vibratoire, ainsi que la température de service. Les valeurs des deux grandeurs physiques (vibration et température) ont été prélevées sur un palier lisse équipant un compresseur centrifuge installé au niveau du complexe de raffinage du pétrole RAK1 en Algérie. Il s'agit respectivement des processus de dégradation Gamma et celui de Lévy.

La présentation d'une méthodologie d'analyse statistique par l'utilisation des processus de dégradation Gamma et Lévy est donnée. L'objectif à travers cette analyse est pour vérifier

l'ajustement des données récoltées par rapport à des lois statistiques telles que, la loi Gamma celle de Lévy.

L'ajustement des échantillons des paramètres suivis, nous a permis de simuler avec succès l'évolution de la vibration, ainsi que la température de service du palier étudié. Le résultat obtenu de cette simulation est important, il peut être exploité pour la prédiction des pannes qui peuvent survenir sur un système industriel à savoir l'équipement étudié.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les défaillances rapides des équipements risquent d'impliquer des conséquences significatives sur la production. Pour les systèmes complexes, ou ceux qui fonctionnent dans un environnement instable, ces défaillances sont susceptibles de se produire d'une façon aléatoire. La surveillance et le pronostic du processus de dégradation sont devenus indispensables pour assurer le bon fonctionnement d'un système tout en évitant les risques potentiels des pannes et de leurs conséquences. Dans ce but les analyses de fiabilité et les outils de pronostic pour les systèmes industriels sont donc développés.

Dans cette étude, nous avons présenté un outil de probabilité pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, basé sur les processus stochastiques. En particulier, le processus Gamma et celui de Levy. Aujourd'hui, l'utilisation de ces processus donne une meilleure modélisation des phénomènes aléatoires qui changent dans le temps.

Tout d'abord, nous avons présenté les différents types des compresseurs, en commençant par des définitions typiques d'un compresseur, puis les différents domaines d'applications de ces machines. En particulier, nous avons présenté une partie sur la construction des compresseurs centrifuges, en terminant avec le calcul des principales grandeurs physiques concernant la compression, ainsi que les caractéristiques du compresseur centrifuges. En plus ses performances. Ensuite Les instabilités aérodynamiques dans le compresseur centrifuge, et leurs conséquences dangereuses sur les différentes parties de la machine.

La deuxième partie de cette thèse a porté pour présenter des généralités sur les paliers et en particulier les paliers lisses, à savoir la conception et les caractéristiques de fonctionnement. Les différents types des paliers lisses, les principaux défauts rencontrés sur ces pièces et leurs effets sur les machines ont été discutés.

Une partie de la présente thèse a été consacrée les différents outils probabilistes, pour la modélisation des phénomènes aléatoires à travers les processus stochastiques. Les méthodes modernes de diagnostic et de l'analyse de la dégradation de systèmes complexes ont été aussi présentées. Et après nous avons cité les principaux tests d'adéquation à une loi.

Et finalement, nous avons abordé l'utilisation de deux processus stochastiques de dégradation permettant de simuler l'évolution de la vibration ainsi que la température du palier lisses

installé sur un compresseur centrifuge au niveau du complexe de raffinage du pétrole RAK1 Skikda en Algérie, et qui sont respectivement le processus gamma et celui de Lévy.

L'ajustement des échantillons des paramètres suivis nous a permis de simuler avec succès l'évolution de la vibration, ainsi que la température. Le résultat de simulation est important pour la prédiction des pannes qui peuvent survenir sur l'équipement étudié.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R. N. Brown, « *Compressors: Selection and Sizing* ». 3rd edition. Elsevier Science & Technology Books, June 2005.
- [2] Y. Bousquet, « *Modélisation et analyse des mécanismes impliqués dans l'apparition du pompage d'un étage de compresseur centrifuge* » Thèse de Doctorat Université de Toulouse. Avril 2014
- [3] CH. Zaiet, « *Commande non linéaire d'une turbine à gaz* » mémoire présenté à l'école de technologie supérieure université du Québec 2005.
- [4] J. Larminie et A. Dicks , « *Fuel Cell Systems Explained. Wiley*». 2ème édition, 2003.
- [5] A. Wiartalla, S. Pischinger, W. Bornscheuer, K. Fieweger et J. Ogr-Zewalla « *Compressor expander units for fuel cell systems*». In Fuel Cell Power for Transportation, 2000.
- [6] J. M'boua, « *Contribution à la modélisation et au contrôle de compresseurs. Application à la gestion de l'air dans les systèmes piles à combustible de type PEM* ». Thèse de Doctorat Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Français 2010.
- [7] J. Liedman et R. Mansson, «*dynamic simulation of centrifugal compressor system*»; Chalmers university of technology Gothenburg, Sweden, 2013.
- [8] B. Blunier, « *modélisation de moto-compresseurs en vue de la gestion de l'air dans les systèmes pile à combustible - simulation et validation expérimentale* » Thèse de Doctorat Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2007.
- [9] D. Clodic et M. Duminil, « *Le froid efficace dans l'industrie* ». ADEME Editions, Centre d'Angers, 1999.
- [10] T. Destoop, « *Compresseurs volumétriques* ». Traité génie mécanique, Techniques de l'Ingénieur, aug 1989.
- [11] *Types de compresseurs d'air et dispositifs de régulation* GOUVERNEMENT DU CANADA www.rncan.gc.ca
- [12] OGPE. *China manufacturers and suppliers of oil, gaz and petrochemical equipment*. Disponible sur : <www.China-ogpe.com>
- [13] [Suppresseurs à lobes Roots & Suppresseurs d'air industriels - Duffau](#)
- [14] K. Copeland Limited, « *Scroll compressors, the technology for the third millennium* ». In National conference on refrigeration and air conditioning, 2002.
- [15] Z. Yuanyang, L.Liansheng, S. Jiang, Z. Wei et S. Peng-Cheng , « *Research on oil-free air scroll compressor with high speed in 30 kw fuel cell* ». Applied Thermal Engineering, (23):593–603, 2003.

- [16] Geobati, l'énergie renouvelable. <http://www.geobati.com/>
- [17] B. Besson, « *Suralimentation par compresseur volumétrique* ». Traité génie mécanique, Techniques de l'Ingénieur, may 1992.
- [18] M. Chamoun, « *Modélisation, conception et étude expérimentale d'une pompe à chaleur industrielle à eau à haute température* » Thèse de Doctorat Université de Lyon 2012.
- [19] J. Tommy Gravdahl, « *Modeling and Control of Surge and Rotating Stall in Compressors* », Dr.i.ng. thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Norway 1998.
- [20] Compresseurs dynamiques, « *les compresseurs centrifuges et axiaux* ». atlascopco.com
- [21] [Compresseur axial — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Compresseur_axial)
- [22] G. Riollet, « *Théorie générale des turbomachines* ». Technique de l'Ingénieur, Doc. B 4 400 –1998 (article).
- [23] H. P. Bloch, « *A Practical Guide To Compressor Technology* ». Process Machinery Consulting, Second Edition willeyinter science 3002 , ISBN-13: 978-0-471-72793-4
- [24] M. Frelin, « *Caractéristiques des fluides* ». Traité sciences fondamentales, 1998.
- [25] https://www.researchgate.net/figure/Schema-descriptif-dun-compresseur-centrifuge_fig2_326658464
- [26] N. Pignone, « *compresseur centrifuge* », Doc1998.
- [27] P. C. Hanlon « *Compressor Handbook* » livre 2001.
- [28] H. Mzad, « *Etude théorique et pratique de phénomène de pompage dans les compresseurs industrielles* », czasopismotechniczne, 2007 ISSN 0011-4561.
- [29] B. Bradley, « *Petroleum engineering handbook* », Society of Petroleum Engineering Richardson,Tx,USA 1992 .
- [30] H. Mzad, « *Etude théorique et pratique de phénomène de pompage dans les compresseurs industrielles* », czasopismotechniczne, 2007 ISSN 0011-4561.
- [31] J. M. Mérigou, « *Ventilateurs – Compresseurs, notions fondamentales*», technique de l'Ingénieur, (article) 1998.
- [32] J-M. Pugnet, « *Pompage des compresseurs* », technique de l'Ingénieur BM 4 182(article).
- [33] D. Arnaud, « *Analyse expérimentale des phénomènes instationnaires dans un compresseur multi- étages à forte charge aérodynamique* ». Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [34] H. Ahmed, « *Diagnostic et Surveillance des Processus Industriels Complexes par FDI Floue(Fuzzy Fault Detection and Isolation) - Application à un Système de Compression-*», Thèse de Doctorat Université de M'hamed Bougara – Boumerdès, 2010.

- [35] M. P. Wernet, M. M. Bright, and G. J. Skoch. « *An investigation of surge in a high-speed centrifugal compressor using digital PIV* ». ASME Journal of Turbomachinery, 123 :418, 2001.
- [36] A.N.Vishwanatha Rao et O.N.Ramesh , « *The dynamics of surge in compression systems* ». Gas Turbine Research Establishment, Bangalore, Department of Aerospace Engineering: Indian Institute of Science, February-April 2007.
- [37] C. S. Tan, I. Day, S. Morris, et A. Wadia. « *Spike-type compressor stall inception, detection, and control* ». Annual review of fluid mechanics, pages 275-300, 2010.
- [38] Gas Machinery Research Council, « *Application Guideline for centrifugal compressor surge control systems* ». Southwest Research Institute: Release version 4.3, April 2008.
- [39] Torbjorn Sonstebo Grong, « *modeling of compressor characteristics and active surge control* ». Norwegian University of Science and Technology 2009.
- [40] Klešáková, « *Variable composition gas centrifugal compressor antisurge protection* ». Praha, Czech Republic, 1947.
- [41] V. Dimitrios et P. George, « *Industrial Compressor Anti-Surge Computer control* ». World Academy of Science, Engineering and Technology 2007.
- [42] L. Giarre, D. Bauso, P. Falugi et B. Bamieh, « *LPV model identification for gain scheduling control an application to rotating stall and surge control problem* ». Mechanical and Environmental Engineering, University of Caledonia, Santa Barbara, CA 93106, USA. 2005.
- [43] J. Frêne, « *Butées et paliers hydrodynamiques* ». Techniques de l'Ingénieur, B 5320.1996
- [44] N. Zerrouni, « *Etude de l'interaction fluide visqueux-structure d'un palier fluide soumis à des sollicitations temporelles* ». Thèse de Magister, Université de M'hamed Bougara-Boumerdes, 2009
- [45] S. Boubendir, S. Larbi, R. Bennacer, « *Contribution à l'analyse de la lubrification thermo-hydrodynamique des paliers fluides poreux* ». 21^{ème} congrès français de mécanique. Bordeaux 2013.
- [46] J. Delamare et F. Faure, « *Les paliers magnétiques* ». Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble.
- [47] M. Antila, « *Electromechanical properties of radial active magnetic bearings* ». Thèse de Doctorat, ACTA Polytechnica Scandinavica ,Electrical engineering series No.92, Espoo, Finland, 1998.
- [48] F. Faure, « *Suspension magnétique pour volant d'inertie* ». Thèse de doctorat. juin.2003.

- [49] B. Cherabi, « *Réduction de modèle par PGD dans les problèmes d'élasto-hydrodynamiques liés aux paliers lisses* ». Thèse de Doctorat université m'hamed bougaraboumerdes.
- [50] M. Sayah, « *Contribution à l'étude du comportement dynamique d'un turbocompresseur tournant à grande vitesse supporté par des paliers lisses a coussinets défectueux* ». Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Belabbes. 2019.
- [51] F. Bogard, « *Développement d'une approche numérique pour optimiser le suivi vibratoire des composants d'une machine tournante* ». Thèse de doctorat. Reims. (2000)
- [52] O. Bonneau, S. Berger, et J. Frêne. « *Comportement dynamique des lignes d'arbres soumises à des défauts géométriques* ». MECH IND, 5 (1), 41-47. (2004).
- [53] K. K. Botros, et J. E. Henderson, « *Développements dans le contrôle de surtension du compresseur centrifuge - évaluation de la technologie* ». Turbomachine, 116, 240-249. (1994)
- [54] O. Bonneau, A. Kassai, J. Frêne, J. Der Hagopian. « *Dynamical behaviour of an elastic rotor with squeeze film damper* ». Eurotrib, Helsinki (Finland), 1989.
- [55] M. Lahmar - H. Boucherit. « *Étude comparative du comportement dynamique non linéaire d'un palier amortisseur et d'un palier fluide* ». 2006.p.12
- [56] B.L.Newkrik et L.P Grobel. « *nonwhirling bearing, ans* ». Oil-film whirl-A. Am.Soc.Mech.Engrs, 59, 6047, 193
- [57] D. CHILDS, « *Turbo machines Rotor dynamics. Phénomènes, Modélisation. Analyse* ». New York. (1993).
- [58] G. Grau. « *Paliers aérodynamiques radiaux à structure à feuilles : Contribution à l'étude statique et comportement dynamique non linéaire* ». Thèse de Doctorat. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.2004.
- [59] M. Kadda. « *Etude de l'évolution du régime de lubrification au cours de la phase transitoire dans les paliers hydrodynamiques* ». Thèse de Doctorat ; Université des Sciences et de La Technologie d'Oran « Mohammed Boudiaf » 2015
- [60] R. Stribeck et M. Schröter. « *Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit-und Rollenlager : Untersuchung einer Tandem-Verbundmaschine* ». von 1000 PS. Springer, 1903.
- [61] H.H. Jeffcott, « *The lateral vibration of loaded shafts in the neigh bourhood of a whirling speed-the effect of want of balance* ». Phil. Mag., 37, 304, (1919).
- [62] J-L .Ligier, « *Les techniques de l'ingénieur* ». article B5330-Matériaux pour paliers lisses.
- [63] T. Someya, « *Caractéristiques des paliers* ». Journal Bearing Databook. Springer Verlag (Berlin), 323 p. (1988).

- [64] J. Young Jang et M. Khonsari. « *On the Characteristics of Misaligned Journal Bearings* ». journal lubricants, 3, 27-53,2015.
- [65] I. KAIDI et A. KABOUCHE. « *Effet du désalignement sur les caractéristiques dynamiques d'un palier hydrodynamique* ». Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.
- [66] M. Lalane, J. Wiley & Sons, « *Rotor dynamics Prediction in Engineering* ». Ltd. 1998.
- [67] M. Adams, « *Rotating machinery vibration - from analysis to troubleshooting* ». Case Western Reserve University, Ohio, Marcel Dekker Inc 2000.
- [68] Bruel et k. vibro. « *Méthode de la maintenance conditionnelle* ». société Allemagne de fabrication des appareils et logiciels de mesure vibratoire.
- [69] H. M'sabah Louahem, « *modélisation du phénomène de dégradation des roulements par le processus Wiener et Gamma* ». Thèse de doctorat. Université de Skikda 2016.
- [70] G. Saporta, « *Probabilités, analyse des données et statistique* ». Paris, Technip, 2011.
- [71] J. Héng, « *pratique de la maintenance préventive* » DUNOD, l'usine nouvelle, série : gestion industrielle.
- [72] R. Laronde, « *Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédiée aux énergies renouvelables Application a un système photovoltaïque* » Thèse de doctorat, université d'Angers 2011.
- [73] R. veysseyre, « *Aide-mémoire statistique et probabilités pour l'ingénieur* ». 2^e édition DUNOD paris 2001, 2006.
- [74] C. Marcovici et J-C. Ligeron, « *Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique* ». Technique et documentation, 1974.
- [75] R . Rakotomalala « *Probabilités et Statistique* ». Notes de cours, Université Lumière Lyon 2.
- [76] A. Villemeur. « *Sureté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation* ». Eyrolles, Paris, 1988.
- [77] P. Lyonnet. « *Ingénierie de la fiabilité* ». Lavoisier, 2006.
- [78] N. Tamaloussi. « *Contribution à l'application de la maintenance prédictive pour le diagnostic des défauts des machines tournantes* ». Thèse de doctorat. Université de Skikda 2020.
- [79] A. Demri. « *Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle* ». PhD thèses, Université d'Angers, 2009.

- [80] M. Medkour, « *Modélisation en vue du diagnostic des défauts des machines tournantes par l'utilisation des méthodes stochastiques : Réseaux bayésiens* ». Thèse de doctorat. Université de Skikda 2019.
- [81] O. Gaudoin, « *Fiabilité des Systèmes et des Logiciel* ». Notes de cours. Ensimag-4^{ième} année. Université Joseph Fourier, Grenoble. 2011.
- [82] [Loi log-normale — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)
- [83] [Loi Gamma — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)
- [84] S. Beleulmi, « *Contribution à l'analyse bayésiennes en fiabilité et maintenabilité des systèmes mécaniques* ».Thèse de doctorat en sciences. Université des frères Mentouri Constantine.2016.
- [85] E. W. Montroll et J. L. Lebowitz, « *Studies in Statistical Mechanics* ». North-Holland Publishing Company–Amsterdam, New York, Oxford, 1979.
- [86] N. G. Van Kampen, « *Stochastic Processes in Physics and Chemistry* ». Elsevier, 2007.
- [87] G .Lecuelle, « *Analyse et modélisation de la Dominance Temporelle des Sensations à l'aide de processus stochastiques* ». thèse de doctorat Université Bourgogne-Franche-Comte 2019.
- [88] P. Vrignat. « *Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne* ». Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2010.
- [89] H. ghamlouch, « *Modélisation de la dégradation, maintenance conditionnelle et pronostic : usage des processus de diffusion* ». Thèse de doctorat. Université de technologie de Troyes, 2016.
- [90] C. Coccozza-Thivent, « *Processus stochastique et fiabilité des systèmes* ». Volume 28 of Mathematiques et Applications, Springer Verlag, 1997.
- [91] L. Benzaid, « *Influence des conditions de travail sur la qualité des huiles hydrauliques* ». Thèse de doctorat. Université de Skikda 2020.
- [92] F -V, Jensen. « *Introduction to Bayesian networks* ». UCL Press, London.1996.
- [93] P. Naim, P .Henri, K.Vuillemin, P .Leray, O. Pourret, A. Becker. « *Réseaux bayésiens* ». 3^{ème} édition, Eyrolles. 2007.
- [94] G. Scorletti et G. Binet, « *Réseaux de Pétri* ». Cours EL401T2, université de CAEN/BASSE–NORMANDIE. France, 2006.
- [95] R. Remi, « *Processus de Levy et calcul stochastique* ».Document de Travail, Université Paris-Dauphine. 2010.

- [96] M. Baxter, « *Lévy simple structural models* ». Nomura Fixed Income Quant Group, 22 Décembre 2006.
- [97] A. Mohamed. « *A Gamma Wear Process* ». IEEE, Transactions on Reliability, vol (24), N°(2), pp152–153, Juin 1975.
- [98] L. W Michael, « *A reliability model based on the gamma process and its analytic theory, Advances in applied probability* ». Volume 21, numéro 4, pp 899-918, 1989.
- [99] E. Çinlar, Z.P. Bažant, E. Osman, « *Stochastic process for extrapolating concrete creep, Journal of the Engineering Mechanics Division* ». 103(EM6):1069–1088, 1977.
- [100] J.J Lawless et C.M Rowder, « *Covariates and random effects in a gamma process model with application to degradation and failure* ». Lifetime Data Analysis, 10(3):213–227, 2004.
- [101] S. Bosse, G. Quadri, O. Gilard, A. Cabarbaye, « *Modèle prédictif de dégradation nonlinéaire dans des conditions d'environnements varies* ». Lambda Mu 18 e Congrès, pp : 1-8. [16, 17, 18 octobre 2012].
- [102] 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.
- [103] G.A. Whitmore, « *Estimating degradation by a Wiener diffusion, process subject to measurements error* ». Lifetime Data Analysis, 1, 307-319, Kluwer Academic Publishers. 1995.
- [104] J. Baussaron, « *Mise au point de modèles prédictive de fiabilité dans un contexte de dégradation associé à des profils de mission* ». Thèse de Doctorat, Spécialité: Sciences de l'ingénierie, Université d'Angers. 2011.
- [105] C. Park and W. Padgett. « *New cumulative damage models for failure using Stochastic processes as initial damage* ». IEEE Transactions on Reliability, vol (54), pp530-540, 2005.
- [106] Y. Wang, Y. Zhi-Sheng, et T. Kwok-Leung. « *Stochastic evaluation of magnetic head wears in hard disk drives* ». IEEE Transactions on Magnetics, vol (50), pp1-7, 2014.
- [107] K.A. Doksum et A. Hoyland. « *Models for variable-stress accelerated life testing experiments based on Wiener processes and the Inverse Gaussian distribution. Technometrics* ». vol(34), pp74, 1992
- [108] G. Saporta, « *Probabilités Analyse des données et statistique* ». 2e édition révisée et augmentée. 2006.
- [109] A. Rungg, « *Probabilités et statistique, méthodes mathématique pour l'ingénieur 4^e édition* ». presses polytechnique et universitaires romandes.

- [110] R. Rakotomalala « *Tests de normalité Techniques empiriques et tests statistiques Version 2.0* ». Université Lumière Lyon 2.
- [111] L. Perreault , B. Bobée et P. Legendre. « *Modélisation des événements hydrologiques extrêmes à partir de lois statistiques* ». Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-Eau. Juillet 1994.
- [112] M. J Kallen et J. M Van Noortwijk, « *Optimal maintenance decisions under imperfect inspection* ». Reliability Engineering and System Safety, 90(2-3):177–185, 2005.
- [113] Manuel d’entretien du COMPRESSEUR /*ELLIOTT*_TK31 Ebara corporation, JAPON

Annexes

Annexe

Annexe A	Vérification des données (Easyfit 5.4).....	102
Annexe B	Schéma technique d'un compresseur TK31.....	104
Annexe C	Schéma technique du palier lisse.....	105
Annexe D	Publication et communication	106

Annexe A

Vérification des données (Easyfit 5.4)

Easyfit 5.4 permet de vérifier si les données suivent une loi normale ou bien une loi Gamma, en dessous la fonction de densité et la fonction de répartition, ainsi que la qualité d'ajustement.

The screenshot shows the 'Qualité d'ajustement - Détails' window in EasyFit. It displays the following data:

Gamma [#19]					
Kolmogorov-Smirnov					
Taille de l'échantillon	30				
Statistique	0,09952				
Valeur de P	0,89917				
Rang	11				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,19032	0,21756	0,2417	0,27023	0,28987
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Anderson-Darling					
Taille de l'échantillon	30				
Statistique	0,43302				
Rang	9				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non
Khi-Carré					
Degrés de liberté	3				
Statistique	3,6359				
Valeur de P	0,30356				
Rang	40				
α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	4,6416	6,2514	7,8147	9,8374	11,345
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Résultat d'ajustement selon la loi gamma.

EasyFit - Sans titre - [Fit1]

Fichier Édition Affichage Analyser Options Outils Fenêtre Aide

Graphiques Synthèse **Qualité d'ajustement**

Arbre du projet

- Tables de données
 - Table1
- Résultats
 - Fit1

Qualité d'ajustement - Détails [masquer]

Levy (2P) [#35]

Kolmogorov-Smirnov

Taille de l'échantillon	20
Statistique	0,22721
Valeur de P	0,21725
Rang	40

α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	0,23156	0,26473	0,29408	0,32866	0,35241
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Anderson-Darling

Taille de l'échantillon	20
Statistique	1,6653
Rang	35

α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,3749	1,9286	2,5018	3,2892	3,9074
Rejeter?	Oui	Non	Non	Non	Non

Khi-Carré

Degrés de liberté	1
Statistique	0,16362
Valeur de P	0,68584
Rang	7

α	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01
Valeur critique	1,6424	2,7055	3,8415	5,4119	6,6349
Rejeter?	Non	Non	Non	Non	Non

Résultat d'ajustement selon la loi Lévy.

Annexe D

Publications et communications

- Souhila BOULEGHLEM, Abdelwaheb BENRETEM. « *Modélisation d'un rotor éolien par la méthode élément de pale/quantité de mouvement* ». Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle. Skikda Octobre 2013.
- Souhila BOULEGHLEM, Abdelwaheb BENRETEM, Azzedine BOUZAOUIT. « *L'effet de la forme de la pale sur la puissance de l'éolien* ». La 3^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle. Skikda Novembre 2015.
- Souhila BOULEGHLEM, Azzedine BOUZAOUIT. « *Amélioration des paramètres d'exploitation d'une pompe à pistons axiaux* ». La 4^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance et la Sécurité Industrielle. Skikda Novembre 2017.
- Souhila BOULEGHLEM, Azzedine BOUZAOUIT. « *l'effet de la pression de service sur la durée de vie de la pompe hydraulique* ». International seminar in industrial engineering and applied mathematics. Skikda October 2018.
- Souhila BOULEGHLEM, Azzedine BOUZAOUIT. « *Diagnosis of bearing faults in a centrifugal compressor using stochastic processes: gamma and levy* ». Acta technica napocensis. Vol. 64, Issue IV, November2021.