

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Etude et analyse de l'usure des paliers lisses dans le domaine
des machines tournantes

Auteur : Hichem SABER-ZENAGUI

Présenté et soutenu publiquement le (15/07/2024)

Composition du jury :

Président :	M. Brahim GUERGUEB	MAA	ENP
Examineur :	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP
Encadrant :	M. Djamel SAIDI	MCA	ENP
Encadrant :	M. Nasredine ZEROUDI	MCA	ENP
Encadrant :	M. Hakim MAHOUNI	SARL NTIC	
Représentant de l'incubateur :	M. Abdelkarim LAHLEH	Ingénieur	ENP

ENP 2024

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Etude et analyse de l'usure des paliers lisses dans le domaine
des machines tournantes

Auteur : Hichem SABER-ZENAGUI

Présenté et soutenu publiquement le (15/07/2024)

Composition du jury :

Président :	M. Brahim GUERGUEB	MAA	ENP
Examineur :	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP
Encadrant :	M. Djamel SAIDI	MCA	ENP
Encadrant :	M. Nasredine ZEROUDI	MCA	ENP
Encadrant :	M. Hakim MAHOUNI	SARL NTIC	
Représentant de l'incubateur :	M. Abdelkarim LAHLEH	Ingénieur	ENP

ENP 2024

DÉDICACES

JE REMERCIE SINCÈREMENT **M. SAIDI DJAMEL** ET **M. MAHOUNI HAKIM**
AINSI QUE TOUTE PERSONNE AYANT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA
RÉALISATION DE CE PROJET.

JE REMERCIE SINCÈREMENT **M. SAIDI DJAMEL** ET **M. MAHOUNI HAKIM**
AINSI QUE TOUTE PERSONNE AYANT CONTRIBUÉ DE PRÈS OU DE LOIN À LA
RÉALISATION DE CE PROJET.

ENFIN, J'ADRESSE MES SINCÈRES REMERCIEMENTS À L'ENSEMBLE DES MEMBRES DU
JURY, QUI M'ONT FAIT L'HONNEUR DE BIEN VOULOIR ÉTUDIER AVEC ATTENTION
MON TRAVAIL.

À MA PROMOTION, MON AUTRE FAMILLE QUI M'A TANT APPRIS ET M'A PERMIS DE
ME SURPASSER.

REMERCIEMENTS

AVANT TOUTE CHOSE, JE RENDS GRÂCE À ALLAH, LE TOUT PUISSANT, DE M'AVOIR DONNÉ LA FORCE ET LA PATIENCE DE MENER À BIEN CE TRAVAIL, ET JE LE PRIE DE ME DRESSER ET M'ÉCLAIRER UN CHEMIN VERS LA RÉUSSITE.

JE TIENS ÉGALEMENT À REMERCIER MON ENCADREUR, **M. SAIDI**, POUR SON ACCOMPAGNEMENT ET SON ENCADREMENT DURANT CETTE PÉRIODE. VOS REMARQUES ET ORIENTATIONS, MONSIEUR, M'ONT ÉTÉ D'UNE PRÉCIEUSE UTILITÉ, CE FUT UN HONNEUR POUR MOI DE VOUS AVOIR COMME ENCADRANT.

J'ADRESSE AUSSI MES REMERCIEMENTS AU LABORATOIRE DE FABRICATION, ET PARTICULIÈREMENT À **M. LAHLEH** POUR SON SUIVI, SES CONSEILS ET SES ORIENTATIONS, ET POUR AVOIR MIS À MA DISPOSITION TOUTES LES INFORMATIONS DONT J'AVAIS BESOIN POUR LA RÉALISATION DE MON PROJET. JE REMERCIE CHALEUREUSEMENT ET DU FOND DU CŒUR **M. MAHOUNI HAKIM**, POUR TOUT CE QU'IL A FAIT POUR MOI ET POUR MOI.

ENFIN, J'ADRESSE MES SINCÈRES REMERCIEMENTS À L'ENSEMBLE DES MEMBRES DU JURY, QUI M'ONT FAIT L'HONNEUR DE BIEN VOULOIR ÉTUDIER AVEC ATTENTION MON TRAVAIL.

ملخص

هذا المشروع النهائي يهدف إلى إجراء دراسة متعمقة وتحليل في التآكل في محمل بسيط مقدم من سوناتراخ بوهران، يشمل الهندسة العكسية، تحليل مادة المعدن الأبيض (باليت)، الفحص الغير مدمر وحساب المعايير ذات الصلة بالمحمل (الإعتمادية، القابلية للصيانة، العمر الافتراضي...) بهدف تقييم حالته، الهدف الرئيسي هو إنشاء شركة ناشئة متخصصة في تصميم و معالجة و فحص المحامل البسيطة للألات الدوارة مع دمج ممارسات مبتكرة لتحسين متانة و أداء المكونات الصناعية الأساسية

الكلمات المفتاحية: التآكل، الهندسة العكسية، باييت، الفحص الغير مدمر، معالجة السطح.

Abstract

This final year project aims to conduct an in-depth study and analysis of the wear of a plain bearing provided by SONATRACH in Oran. It will include reverse engineering, analysis of the white metal material (Babbitt), non-destructive testing, and calculation of relevant bearing parameters (reliability, maintainability, availability, lifespan, etc.), with the goal of assessing its condition. The main objective is to create a startup specializing in the design, treatment, and inspection of plain bearings for rotating machinery, incorporating innovative practices to improve the durability and performance of essential industrial components.

Keywords: Wear, Reverse Engineering, Babbitt, Non-Destructive Testing, Surface Treatment.

Résumé

Ce projet de fin d'étude vise à réaliser une étude approfondie et une analyse de l'usure d'un palier lisse fourni par SONATRACH d'Oran. Il comprendra la rétro-ingénierie, l'analyse de la matière du régule (métal blanc), le contrôle non destructif ainsi que le calcul des paramètres pertinents du coussinet (la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, la durée de vie ...), dans le but d'évaluer son état. L'objectif principal est de créer une startup spécialisée dans la conception, le traitement et le contrôle des paliers lisses pour les machines tournantes, en intégrant des pratiques innovantes pour améliorer la durabilité et les performances des composants industriels essentiels.

Mots clés: Usure, Rétro-ingénierie, régule, contrôle non destructif, traitement de surface.

Table des matières

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale **13**

I Généralités sur les machines tournantes et les paliers lisses **15**

- I.1 Introduction 15
- I.2 Les Machines rotatives 15
 - I.2.1 Définition des machines rotatives 15
 - I.2.2 Différents types de machines rotatives utilisées dans l'industrie . . . 16
 - I.2.2.1 Les Turbines 16
 - I.2.2.1.1 Différents Types des turbines 17
 - I.2.2.2 Compresseur 21
 - I.2.2.2.1 Compresseur dynamique 21
 - I.2.2.2.2 Compresseur à déplacement positif 22
 - I.2.2.3 Les Pompes 22
 - I.2.2.3.1 Pompes à déplacement positif 23
 - I.2.2.3.2 Pompes roto dynamique 23
- I.3 Les paliers lisses 24
 - I.3.1 Définition 24
 - I.3.2 Les types des paliers 25
 - I.3.2.1 Paliers hydrodynamiques 25
 - I.3.2.2 Paliers lisses 26
 - I.3.2.3 Les coussinets sphériques 26
 - I.3.2.4 Les coussinets de gabarit de perçage 27
 - I.3.3 L'application des coussinets dans l'industrie 28
 - I.3.4 L'usure des coussinets 29
 - I.3.4.1 Introduction 29
 - I.3.4.2 Usure de rodage d'adaptation 30
 - I.3.4.2.1 Description 30
 - I.3.4.2.2 Analyse 30
 - I.3.4.3 Erosion 31
 - I.3.4.3.1 Description 31
 - I.3.4.3.2 Analyse 32
 - I.3.4.3.3 Causes possibles 32
 - I.3.4.4 Grippage 33
 - I.3.4.4.1 Description 33

I.3.4.5	Contact des bords unilatéral	33
I.3.4.5.1	Description	33
I.3.4.6	Usure en forme de bande au milieu du coussinet	34
I.3.4.6.1	Description	34
I.4	Conclusion	36
II Notions fondamentales sur le traitement de surface et les revêtements métalliques		37
II.1	Introduction	37
II.2	Les méthodes traitement de surface	37
II.2.1	Traitement mécanique	37
II.2.1.1	Le martelage	37
II.2.1.2	Le grenailage	38
II.2.1.3	Le polissage vibro-abrasion	40
II.2.2	Traitement thermochimique	41
II.2.2.1	La boruration	41
II.2.2.2	La cémentation	42
II.2.2.3	La nitruration	43
II.2.3	Traitement chimique	44
II.2.3.1	La chromatisation	44
II.2.3.2	La phosphatation	45
II.3	Les revêtements métalliques	46
II.3.1	Types courants de revêtement métallique	47
II.3.1.1	Galvanoplastie	47
II.3.1.2	Galvanisation	48
II.3.1.3	Revêtement en poudre	48
II.3.1.4	Revêtement de peinture	49
II.3.1.5	Projection thermique	49
II.3.1.6	Revêtement en acier dur	50
II.4	Conclusion	51
III Conception par rétro-ingénierie, calcul et dimensionnement du palier		52
III.1	Introduction	52
III.2	La rétro-ingénierie	52
III.2.1	Méthode utilisée pour la rétro-ingénierie	52
III.2.1.1	Le scanner 3D	53
III.2.1.1.1	Le scanner utilisé (FREESCAN X5)	53
III.2.1.1.2	Caractéristiques du Shining 3D FreeScan X5	53
III.2.1.1.3	Logiciel géomatique Design X	54
III.2.1.2	Les étapes de l'opération	54
III.2.1.2.1	Le positionnement de la pièce	54
III.2.1.2.2	L'opération du scan	55
III.2.1.2.3	Résultats du scan	56
III.2.1.2.4	Traitement par Geomagic	56
III.3	Choix du palier lisse	57
III.3.1	Pression spécifique \bar{p}	57
III.3.2	Vitesse de glissement U	58
III.3.3	Facteur $\bar{p}U$	58
III.3.4	Coefficient correcteur	58

III.3.4.1	Température	58
III.3.4.2	Contre-matériau	59
III.3.4.3	Le coefficient de dimensions	59
III.3.5	Dimensions du palier	59
III.3.6	La durée de vie du palier	60
III.3.7	Partie calcul	60
III.4	Conclusion	61
IV	Etude de fiabilité, maintenabilité et disponibilité	62
IV.1	Introduction	62
IV.2	La Fiabilité	62
IV.2.1	Analyse de la Fiabilité par la Loi Exponentielle	63
IV.2.2	Définition de la loi de Weibull	64
IV.3	Maintenabilité	66
IV.3.1	Définition	66
IV.3.2	Approches de la maintenabilité	66
IV.4	La Disponibilité	66
IV.4.1	Définition	66
IV.4.2	Cas pratique	68
IV.5	Calcul de Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité	69
IV.5.1	Calcul de Fiabilité	69
IV.5.1.1	Préparation des données	70
IV.5.1.2	Tracé de nuage de points et de la droite de Weibull	71
IV.5.1.3	Détermination de β, η, γ	71
IV.5.1.4	Calcul du MTBF	71
IV.5.1.5	Indice sur le MTBF par la loi de Weibull	72
IV.5.1.6	Déduction de la fiabilité	72
IV.5.1.7	Calcul du taux de défaillance	72
IV.5.1.7.1	Calcul du MTTR et le taux de réparation du coussinet	72
IV.6	Conclusion	73
V	Contrôles non destructifs et analyse de la matière	74
V.1	Introduction	74
V.2	Le contrôle non-destructif (CND)	74
V.2.1	Le contrôle visuel	75
V.2.1.1	Principe du contrôle visuel	75
V.2.1.1.1	L'application du contrôle visuel sur le palier	75
V.2.2	Le ressuage	76
V.2.2.1	Principe	76
V.2.2.2	L'application du ressuage sur le coussinet	77
V.2.2.2.1	Les équipements utilisés	78
V.2.2.2.2	L'application de l'opération	79
V.2.2.3	Résultats de l'opération	82
V.2.3	Contrôle par ultrason	83
V.2.3.1	Principe de fonctionnement général	83
V.2.3.2	Mode d'examen	83
V.2.3.3	Domaines d'application	84
V.3	Analyse de la matière	84

V.3.1	Mesure de rugosité	84
V.3.1.1	Les rugosimètres	84
V.3.2	Le test PMI du coussinet	86
V.4	Conclusion	88
Business Model		89
Conclusion Générale		99
Bibliographie		100
Annexes		105

Liste des figures

I.1	Turbine [30]	16
I.2	Turbine de Pelton [31]	17
I.3	Turbine de Francis [32]	18
I.4	Turbine de Kaplan [33]	19
I.5	Turbine à gaz [33]	20
I.6	Turbines à vapeur [34]	21
I.7	Compresseur dynamique [31]	21
I.8	Compresseur à déplacement positif. [34]	22
I.9	Pompes à déplacement positif. [35]	23
I.10	Pompe roto dynamique . [36]	24
I.11	Coussinet [31]	25
I.12	Palier lisse [31]	25
I.13	Palier hydrodynamique [36]	26
I.14	Palier lisse [37]	26
I.15	Les coussinets sphériques [38]	27
I.16	Coussinets de gabarit de perçage [39]	28
I.17	Turbine supportée par deux paliers lisses [40]	29
I.18	Compresseur [41]	29
I.19	Hélice [41]	29
I.20	la progression de l'usure [31]	30
I.21	Usure de rodage d'adaptation [42]	31
I.22	Coquille de coussinet de bielle en matériau composite acier-laiton avec revêtement sputter côté tige [43]	32
I.23	Coquille de coussinet de ligne inférieure en matériau composite acier-aluminium [43]	33
I.24	Coquille de coussinet de bielle en matériau composite acier-laiton avec revêtement sputter côté tige [43]	34
I.25	Coquille de coussinet de ligne inférieure en matériau composite acier-aluminium [43]	35
I.26	Pourcentage de pannes causées par les paliers lisses [43]	35
II.1	Opération de compression [44]	38
II.2	Martelage [44]	38
II.3	Le grenailage [45]	39
II.4	Avant et après l'opération [45]	39
II.5	Nettoyage par grenailage [46]	39
II.6	Polissage vibro-abrasion [48]	40
II.7	Avant et après l'opération [47]	40

II.8	Domaine d'application du polissage [49]	40
II.9	La boruration [50]	41
II.10	Application de la boruration [51]	42
II.11	La cémentation [52]	42
II.12	La nitration [53]	43
II.13	Procédé de de nitration [54]	44
II.14	Chromatation pour pièces en aluminium [55]	45
II.15	Pièces traitées par phosphatation [56]	46
II.16	Configuration de la galvanoplastie [57]	47
II.17	Pièces galvanisées [58]	48
II.18	Partie enduite de poudre [58]	49
II.19	Surface métallique recouverte de peinture. [58]	49
II.20	Surface métallique recouverte de peinture. [59]	50
II.21	Revêtement en acier dur . [60]	51
III.1	Free scan X5.	53
III.2	Le positionnement de la pièce . [6]	55
III.3	L'opération du scan . [6]	56
III.4	l'intérieur du coussinet	56
III.5	l'extérieur du coussinet	56
III.6	conception finale	57
III.7	résultat du traitement par geomagic	57
III.8	coefficient de dimensions a_B . [63]	59
IV.1	le taux de défaillance au fil du temps [65]	63
IV.2	schéma de la disponibilité	67
IV.3	papier de weibull [65]	69
IV.4	droite de Weibull	71
IV.5	résultats [6]	72
V.1	début de l'opération	75
V.2	La présence de rayures sur la surface.	76
V.3	l'usure sur la surface	76
V.4	Des traces causées par l'usure	76
V.5	Les étapes de ressuage	77
V.6	Le dégraissant	78
V.7	Le Révélateur blanc D-100	78
V.8	Pénétrant DP-55	79
V.9	Espace de travail	79
V.10	Nettoyage de la pièce	80
V.11	Application du pénétrant D-55	81
V.12	Lavage de la pièce	81
V.13	Application du révélateur blanc D-100	82
V.14	résultats de l'opération	82
V.15	la couleur rouge montre les défauts causés par l'usure	82
V.16	appareille de control par ultrason. [64]	83
V.17	Exemple d'application . [65]	84
V.18	mesure de rugosité	85
V.19	l'opération de PMI	87

V.20 Page 1	87
V.21 Page 2	87
V.22 Page 3	87

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
BMC	Business Model canevas
CND	Contrôle non-destructif
FMD	Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité
MTBF	Le temps moyen entre pannes
MTTE	Moyenne des temps techniques d'exploitation
MTTR	Moyenne des Temps Techniques de Réparation
PMI	Positive material identification
TBF	Temps de bon fonctionnement
TTE	Temps techniques d'exploitation
TTR	Temps techniques de réparation

Introduction générale

Les défis récurrents ancrés dans le paysage industriel exercent une influence significative sur la productivité et la performance globale. C'est au sein de cette toile complexe de difficultés industrielles que notre projet trouve sa place, en se concentrant soigneusement sur un problème répandu observé dans le domaine spécifique des machines tournantes : l'usure des paliers lisses dans le domaine des machines tournantes.

Les complexités nuancées des systèmes mécaniques, en particulier ceux liés aux machines tournantes, offrent un terrain fertile pour l'exploration. Dans ce domaine dynamique, le phénomène d'usure des paliers lisses émerge comme un point central, nécessitant une attention méticuleuse et une investigation approfondie.

Dans ce projet de fin d'études, nous menons une étude exhaustive et une analyse détaillée de l'usure des paliers lisses utilisés dans les machines tournantes. Notre principal objectif est de réaliser une étude et une analyse des Modes de l'usure d'un coussinet fourni par SONATRACH d'Oran.

Pour atteindre cet objectif, ce projet de fin d'étude est structuré en plusieurs chapitres complémentaires. Le premier chapitre est dédié à une recherche bibliographique exhaustive sur les machines tournantes et les paliers lisses. Cette section fournira une base théorique solide en explorant les différents types de machines tournantes, les mécanismes des paliers lisses, leur modes d'usures.

Le deuxième chapitre portera sur les notions fondamentales du traitement de surface et des techniques de contrôle non destructif. Ces connaissances sont essentielles pour comprendre comment prolonger la durée de vie des paliers lisses et prévenir leur usure prématurée. Nous aborderons les différents traitements de surface appliqués aux paliers, ainsi que les méthodes de contrôle non destructif utilisées pour détecter et évaluer les défauts sans endommager les composants.

Dans le troisième chapitre, nous procéderons à la conception par rétro-ingénierie, ainsi qu'au calcul et au dimensionnement du coussinet. Cette section impliquera une analyse détaillée du coussinet, en utilisant des techniques de rétro-ingénierie pour modéliser et améliorer le design existant. Les calculs de dimensionnement seront effectués pour connaître les caractéristiques du coussinet.

Le quatrième chapitre traitera de l'étude de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité du coussinet. Cette analyse est cruciale pour évaluer la performance à long terme du coussinet et identifier les mesures nécessaires pour assurer sa fiabilité. Nous utiliserons des méthodes statistiques et des modèles de fiabilité pour quantifier les risques d'usure.

Enfin, le cinquième chapitre sera consacré à l'analyse de la matière et aux opérations de contrôles non destructifs du coussinet. Nous examinerons la composition matérielle du coussinet, ainsi que les propriétés mécaniques et chimiques qui influencent son usure. Les techniques de contrôle non destructif seront appliquées pour évaluer l'intégrité du coussinet.

Ce projet sera clôturé par l'élaboration d'un business model visant à transformer ce projet en une startup viable, L'objectif est de créer une entreprise spécialisée dans la conception, le traitement et le contrôle des paliers lisses pour les machines tournantes, contribuant ainsi à améliorer la productivité industrielle tout en minimisant les coûts liés à l'usure des composants critiques. Ce projet startup représente une opportunité unique de combiner expertise technique et vision entrepreneuriale pour répondre à un besoin industriel pressant et créer de la valeur ajoutée.

Une conclusion générale viendra finalement couronner notre étude.

Chapitre I

Généralités sur les machines tournantes et les paliers lisses

I.1 Introduction

Les machines tournantes sont des composants vitaux dans de nombreux secteurs industriels, jouant un rôle clé dans la conversion de l'énergie en mouvement rotatif pour diverses applications. Parmi ces machines, les turbines, les compresseurs et les pompes. Les paliers lisses, qui supportent les arbres rotatifs, sont essentiels à leur fonctionnement efficace en réduisant la friction et en permettant un mouvement fluide. L'usure de ces paliers peut entraîner des défaillances mécaniques coûteuses et des interruptions de production, affectant ainsi la rentabilité et l'efficacité des opérations industrielles. Par conséquent, l'étude et l'optimisation des paliers lisses sont cruciales pour améliorer la fiabilité et la performance des machines tournantes. En se concentrant sur la réduction de l'usure et l'amélioration des matériaux et des conceptions des paliers, on peut réduire significativement les coûts de maintenance et augmenter la durée de vie des équipements. Cela contribue non-seulement à des opérations plus durables mais également à une meilleure gestion des ressources et à une réduction des temps d'arrêt imprévus.

I.2 Les Machines rotatives

I.2.1 Définition des machines rotatives

Les machines tournantes sont des dispositifs mécaniques conçus pour convertir l'énergie d'une forme à une autre, principalement sous forme de mouvement rotatif. Elles sont essentielles dans de nombreux secteurs industriels, où elles jouent un rôle crucial dans la production d'énergie, le transport de fluides, et d'autres processus clés. Historiquement, les premières machines tournantes ont émergé au cours de la révolution industrielle, lorsque les ingénieurs ont cherché des moyens efficaces de convertir l'énergie thermique et mécanique en mouvement rotatif pour alimenter les usines et les machines. Depuis lors, leur conception et leur technologie ont considérablement évolué, intégrant des matériaux modernes et des techniques avancées pour améliorer leur efficacité, leur fiabilité et leur durabilité. Aujourd'hui, les machines tournantes sont omniprésentes dans divers domaines technologiques et industriels, contribuant de manière significative à l'infrastructure et à l'économie mondiale. [1]

I.2.2 Différents types de machines rotatives utilisées dans l'industrie

I.2.2.1 Les Turbines

Une turbine est un dispositif rotatif qui convertit partiellement l'énergie interne d'un fluide, qu'il soit liquide (comme l'eau) ou gazeux (vapeur, air, gaz de combustion), en énergie mécanique par le biais de pales disposées sur un arbre tournant à grande vitesse. L'énergie entrante du fluide se caractérise par sa vitesse, sa pression et son enthalpie. L'énergie mécanique sortant de la turbine entraîne un autre mécanisme rotatif tel qu'un alternateur, un compresseur, une pompe ou tout autre récepteur (par exemple, un générateur). La combinaison est alors appelée un turbo-alternateur, un turbocompresseur ou une turbopompe respectivement.

Les turbines jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles et énergétiques. Par exemple, dans les centrales électriques, les turbines à vapeur convertissent la chaleur produite par la combustion de combustibles fossiles ou par des réactions nucléaires en électricité. De même, les turbines hydrauliques exploitent l'énergie cinétique de l'eau dans les barrages pour générer de l'électricité de manière renouvelable.

Les turbines à gaz sont couramment utilisées dans les avions pour propulser les moteurs à réaction, et dans les centrales électriques pour produire de l'électricité de manière rapide et efficace. Elles sont également utilisées dans les installations industrielles pour entraîner des compresseurs et des pompes nécessaires à divers processus de fabrication.

La conception et l'ingénierie des turbines requièrent une compréhension approfondie de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. Les matériaux utilisés pour fabriquer les pales et autres composants doivent résister à des conditions extrêmes de température et de pression. Les innovations dans la technologie des turbines, telles que l'utilisation de matériaux composites avancés et de revêtements résistants à la chaleur, continuent d'améliorer l'efficacité et la durabilité de ces machines critiques.[2]

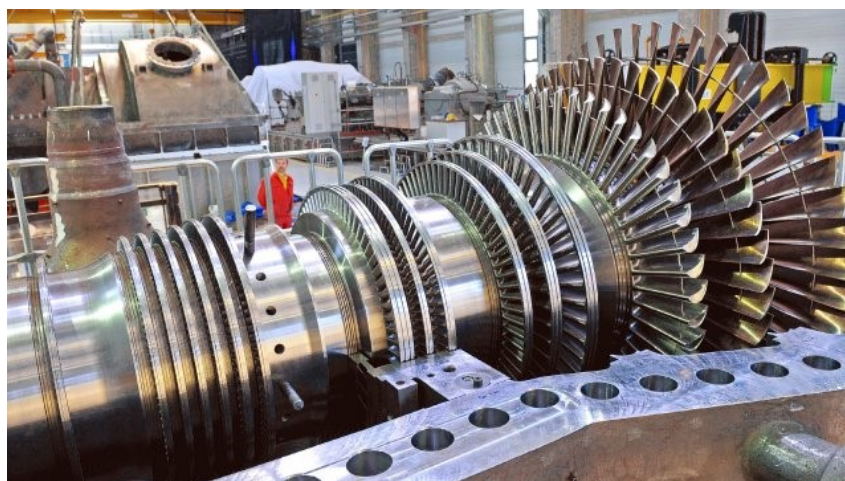


Figure I.1: Turbine [30]

I.2.2.1.1 Différents Types des turbines

1. **Turbines hydrauliques** : Une turbine hydraulique est une machine rotative qui produit de l'énergie mécanique à partir de l'eau en mouvement ou potentiellement en mouvement. Elle constitue le composant essentiel des centrales hydroélectriques conçues pour produire de l'électricité à partir d'un flux d'eau. IL existe trois types de turbines hydrauliques.

- **Turbine de Pelton** : La turbine Pelton est de type "action" car l'énergie cinétique de l'eau qui s'écoule hors de la conduite forcée est transmise à la turbine (couple et vitesse angulaire) via un jet d'eau qui agit directement sur les godets de la roue. Ce type de turbine ne possède pas de diffuseur (ou aspirateur) à la sortie de l'eau, car l'eau s'écoule librement à pression atmosphérique à partir du moment où elle quitte l'injecteur sous forme de jet. Plus précisément, le jet se divise en deux lorsqu'il atteint la cuvette, chaque demi-jet étant ensuite dévié par la forme concave du godet dans lequel il se heurte (transmettant ainsi son énergie cinétique au mouvement de la roue), puis l'eau s'échappe latéralement de la roue avec une faible vitesse résiduelle. Elle est enfin récupérée par la tarpaulin - une coque enveloppant la turbine - le long de laquelle elle s'écoule par gravité. Selon le calcul de la vitesse spécifique, ces turbines conviennent aux "hautes chutes" (au-dessus de 400 m) avec un faible débit d'eau (moins de 15 m³/s).[3]



Figure I.2: Turbine de Pelton [31]

- **Turbine de Francis** :

Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type "jet". Elle convient aux hauteurs de chute moyennes (de 30 à 300 mètres), pour des puissances et des débits moyens ou élevés (comme le barrage d'Itaipu), c'est-à-dire de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts pour des débits de 10 à

700 m³/s. C'est une turbine dans laquelle le fluide entre sous haute pression et transmet son énergie aux pales fixées au rotor. Une partie de l'énergie est transmise par le fluide aux pales en raison du changement de pression, tandis que le reste de l'énergie est extrait à travers la spirale qui entoure la turbine. À la sortie, le fluide a une faible vitesse et une faible énergie. La forme du tube de sortie est conçue pour ralentir le fluide et le faire monter en pression. La turbine Francis est largement utilisée dans les centrales hydroélectriques en raison de sa polyvalence et de son efficacité. Contrairement à la turbine Pelton, elle est adaptée aux hauteurs de chute moyennes, ce qui en fait un choix privilégié pour de nombreux projets hydroélectriques dans le monde entier. L'efficacité de la turbine Francis dépend en partie de la conception de ses pales et de la géométrie de sa spirale. Des recherches constantes sont menées pour optimiser ces aspects afin d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les pertes par turbulence. [4]



Figure I.3: Turbine de Francis [32]

- **Turbine de Kaplan** : La turbine Kaplan est une turbine hydraulique de type "réaction" avec un design de type hélice, inventée en 1912 par l'ingénieur autrichien Viktor Kaplan. Elle convient aux hauteurs de chute basses allant de 2 à 25 mètres et aux débits très élevés allant de 70 à 800 m³/s.

La turbine Kaplan se distingue des autres turbines à hélice grâce à ses pales réglables, qui peuvent varier leur inclinaison pendant le fonctionnement. Cela lui permet d'atteindre une efficacité énergétique élevée pour des débits d'eau variables. Son rendement se situe généralement entre 90% et 95%. Il s'agit d'une évolution technique de la turbine Francis. Son invention a permis une production d'énergie efficace dans des situations où la turbine Francis ne pouvait pas être utilisée.

Les diamètres des turbines Kaplan peuvent varier entre 2 et 11 mètres, avec une plage de vitesse de rotation de la turbine de 50 à 250 tr/min, pour une puissance installée pouvant atteindre 250 MW.

La turbine Kaplan est largement utilisée dans les centrales hydroélectriques pour exploiter l'énergie de cours d'eau à faible hauteur de chute. Sa capacité à ajuster ses pales en fonction des variations de débit en fait un choix attrayant pour les installations hydroélectriques où les conditions de flux d'eau peuvent

varier considérablement. Son efficacité élevée en fait une option rentable pour la production d'électricité propre et renouvelable.[5]



Figure I.4: Turbine de Kaplan [33]

2. **Turbines à gaz** : Une turbine à gaz, également appelée turbine à combustion ou parfois turbine à gaz de combustion (le nom le plus précis), est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique sous forme de rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique des gaz produits par la combustion d'un hydrocarbure (fuel oil, gaz combustible...) qui sont dilatés dans une turbine. L'oxydant, le plus souvent l'air ambiant, est généralement comprimé avant d'entrer dans la chambre de combustion, en utilisant un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine. Il existe deux types de turbines à gaz : axiales et radiales.

Les turbines axiales sont réservées aux machines de grande puissance, tandis que les turbines centripètes sont utilisées pour des puissances modérées et dans les cas où la température des gaz de travail est modérée en raison du fait que ces machines ne sont pas refroidies et que les calories sont drainées vers l'axe, c'est-à-dire vers les paliers.

Chaque étage de turbine axiale comporte une rangée de pales fixes ou de distributeurs conçus pour créer un moment angulaire et une roue mobile équipée d'aubes. La fonction de la roue mobile est d'annuler le moment angulaire incident, ce qui entraîne la création d'un couple sur l'arbre de la turbine. Il existe deux types d'aubes de roue mobile : action ou réaction. Dans le premier cas, la pression reste sensiblement constante lors du passage à travers la roue mobile, et la déviation des pales est significative. La poussée axiale sur l'arbre est alors faible. Cette configuration est réservée aux sections de pied des aubes mobiles. Le second agencement, qui donne une chute de pression dans la roue, se trouve sur les sections de tête des aubes. La poussée axiale sur le rotor est alors substantielle.

Dans le cas des turbines centrifètes, le chemin parcouru par le fluide est sensiblement inverse de celui des gaz traversant un compresseur centrifuge. La veine d'entrée de gaz est soit axiale (configuration aéronautique) et se situe entre deux cylindres coaxiaux, soit perpendiculaire à l'axe de rotation, le flux étant alors distribué dans un plan radial autour du rotor au moyen d'une volute. Dans la partie radiale en amont de la mobile, une soupape à aubes fixes est parfois placée, dont la fonction est identique à celle des soupapes axiales.

Les mécanismes de transformation de l'énergie sont analogues à ceux décrits pour les machines axiales, sauf que la chute de pression dans les pales de la roue mobile est due non seulement à l'augmentation de la vitesse par rapport aux aubes, mais aussi à l'approche vers l'axe des feuilles de courant fluide (c'est l'effet centrifète). Le disque supporte les pales, qui sont radialement coincées pour minimiser les contraintes mécaniques dans le matériau. Pour la même raison, des lunules sont réalisées sur la périphérie du disque, entre les pales. Comme dans le cas des roues axiales, le moment angulaire d'entrée est annulé dans la roue, afin de récupérer le couple correspondant de l'arbre de turbine. Dans le cas des turbines à gaz entraînées mécaniquement, un diffuseur d'échappement axial ou radial contribue à minimiser l'énergie cinétique évacuée. [2]

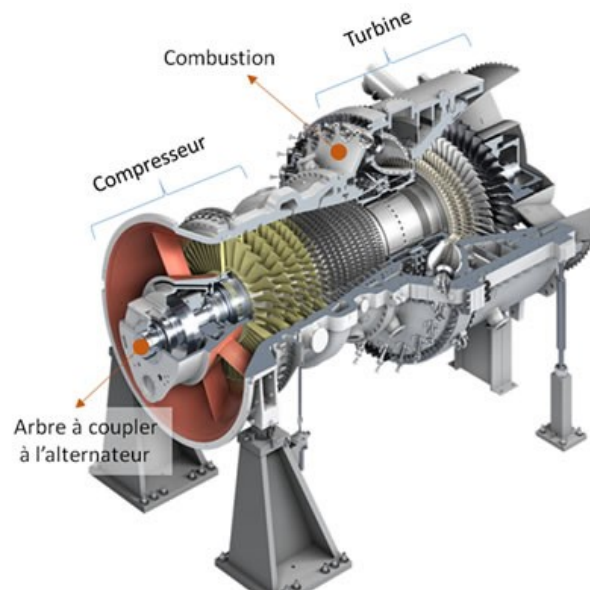


Figure I.5: Turbine à gaz [33]

3. **Turbines à vapeur** : Une turbine à vapeur est une machine qui extrait l'énergie thermique de la vapeur sous pression et l'utilise pour produire un travail mécanique en faisant tourner l'arbre de sortie. La version moderne a été inventée par Sir Charles Parsons en 1884. Comme la turbine génère un mouvement de rotation, elle convient particulièrement pour entraîner un générateur électrique ; environ 90% de la production d'électricité aux États-Unis (en 1996) était réalisée à l'aide de turbines à vapeur. La turbine à vapeur est une forme de machine thermique qui doit une grande partie de l'amélioration de son rendement thermodynamique à l'utilisation de plusieurs étages dans l'expansion de la vapeur, ce qui permet d'obtenir un résultat proche du processus d'expansion réversible idéal.[2]

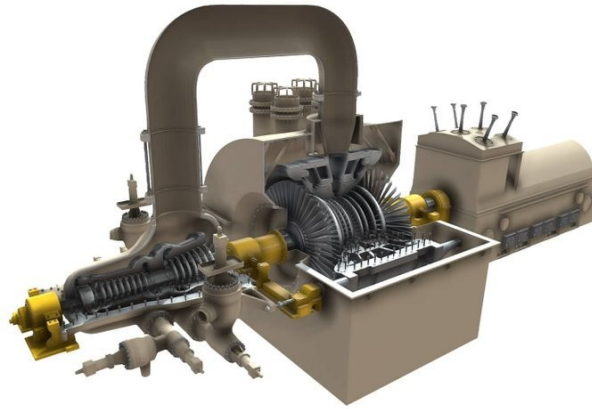


Figure I.6: Turbines à vapeur [34]

I.2.2.2 Compresseur

Un compresseur mécanique est un composant mécanique conçu pour augmenter la pression d'un gaz, et donc son énergie. Il existe également des compresseurs sans aucun composant mécanique, ce sont les thermo-compresseurs, plus couramment connus sous le nom d'éjecteurs. Il existe des compresseurs à déplacement positif et des compresseurs dynamiques.[2]

I.2.2.2.1 Compresseur dynamique

Dans ce type de compresseur, l'air est accéléré par un système de pales rotatives. Selon la direction principale que prend l'air dans le système, on parle de système axial ou radial. Les vitesses obtenues sont souvent très élevées. Ainsi, la pression statique est obtenue par la décélération du gaz dans un diffuseur à la sortie du système d'accélération du gaz. Contrairement aux compresseurs à déplacement positif, un changement de pression de fonctionnement (bien que minime) entraînera des changements significatifs du débit. Un suivi est donc nécessaire pour s'assurer que le système fonctionne correctement.

De plus, les roues qui accélèrent l'air ont des débits de fonctionnement maximum et minimum. Par conséquent, dans les cas où la vitesse est trop faible et le débit trop faible, la pression obtenue deviendra supérieure à celle du compresseur. Dans ce cas, le risque de retour d'air pourrait causer des dommages. Avec un débit très élevé, le gaz peut atteindre la vitesse du son. Enfin, ce système, lorsqu'il ne fonctionne pas à une vitesse adéquate, entraîne du bruit, des dommages potentiels et des vibrations. [6]

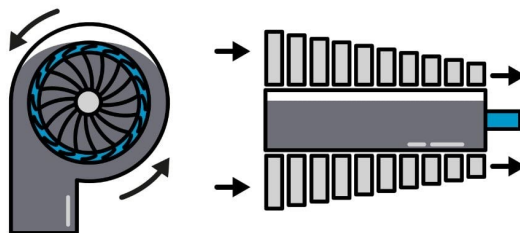


Figure I.7: Compresseur dynamique [31]

I.2.2.2 Compresseur à déplacement positif

Pour comprendre pleinement son fonctionnement, il suffit de savoir comment fonctionne le compresseur le plus simple de cette catégorie. Le meilleur exemple pour illustrer le fonctionnement de ce système est la pompe à vélo. Tout d'abord, l'air est aspiré dans la chambre de compression, puis il est comprimé, généralement par le piston. Dans les compresseurs à piston à déplacement positif, ce dernier fonctionne comme dans un moteur de voiture avec un vilebrequin rotatif et une bielle. La compression est donc cyclique. Parfois, le piston peut effectuer la compression des deux côtés, ce qui est appelé un compresseur à double effet. Si le piston agit uniquement d'un côté, c'est un compresseur à simple effet. Pour connaître le rapport de pression de ce type de compresseur, il suffit d'évaluer les pressions de sortie et d'entrée. Par exemple, pour une pression atmosphérique (1 bar) et une pression de sortie à 9 bars de surpression, le rapport de pression correspond à la formule : $(9+1) / 1$ ou 10.[6]



Figure I.8: Compresseur à déplacement positif. [34]

I.2.2.3 Les Pompes

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de pomper un liquide. La plus ancienne pompe connue est la pompe à godet inventée en Chine au 1^{er} siècle après J.-C. Les pompes modernes ont été développées à partir du XVIII^e siècle. Les pompes diesel et électriques, utilisées aujourd'hui, peuvent avoir des débits de pompage très élevés, à basse pression pour la circulation de l'eau et à haute pression (plus de 400 bars) pour l'hydro-hydraulique.

Les pompes sont des éléments essentiels dans de nombreuses applications industrielles, domestiques et agricoles. Elles sont utilisées pour transférer des liquides d'un endroit à un autre, pour augmenter la pression d'un liquide, ou pour créer un flux dans un système de tuyauterie. Les pompes modernes sont conçues pour une variété de besoins, allant de simples pompes à eau de jardin aux pompes utilisées dans les industries pétrolière, chimique et alimentaire pour des applications plus complexes. Les pompes diesel et électriques sont particulièrement efficaces pour des applications nécessitant des débits élevés et des pressions variables. Par exemple, les pompes diesel sont couramment utilisées dans l'agriculture pour l'irrigation des cultures et dans les applications de lutte contre les incendies, tandis que les pompes électriques sont utilisées dans les systèmes de circulation

d'eau des bâtiments, les stations de pompage d'eau potable et les systèmes de refroidissement industriels.[2]

I.2.2.3.1 Pompes à déplacement positif

Une pompe à déplacement positif est une pompe dans laquelle une certaine quantité de fluide "piégé" est forcée de se déplacer vers le port de sortie. Le débit d'une pompe à déplacement positif est proportionnel à la vitesse d'actionnement de ses pièces mobiles et dépend très peu de la pression de refoulement. La pompe à déplacement positif est ainsi appelée parce que le mouvement du fluide est dû à une variation du volume occupé par ce fluide. C'est grâce à un mouvement cyclique qu'un piston (ou un diaphragme) se déplacera en avant et en arrière, variant ainsi le volume de la tête de cylindre. [7]

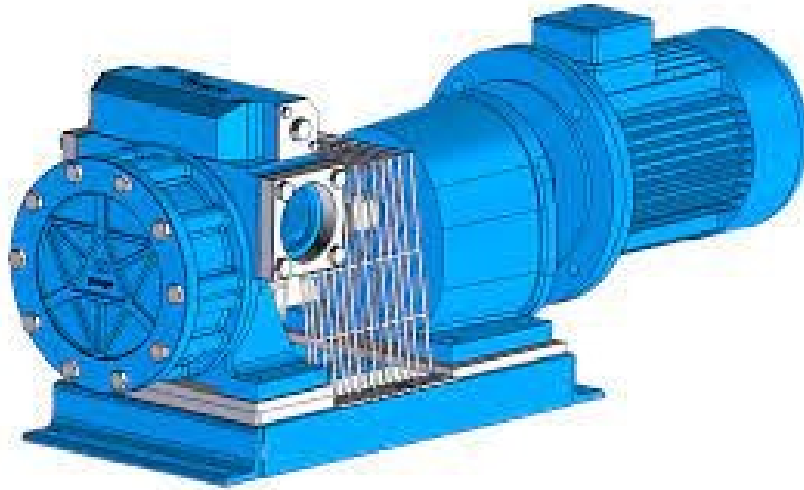


Figure I.9: Pompes à déplacement positif. [35]

I.2.2.3.2 Pompes roto dynamique

Une pompe roto dynamique est un type de pompe utilisé pour augmenter la pression d'un fluide en transférant l'énergie cinétique du rotor en rotation au fluide. Contrairement aux pompes alternatives, les pompes roto dynamiques fonctionnent continuellement en utilisant un rotor en rotation pour créer un mouvement dynamique du fluide. Ces pompes se caractérisent par des composants rotatifs, tels que des roues ou des hélices, qui entraînent le fluide à travers la pompe, générant ainsi une augmentation de pression ou de débit. Les pompes centrifuges et les pompes hélico centrifuges sont des exemples courants de pompes roto dynamiques. Elles sont largement utilisées dans divers domaines tels que l'approvisionnement en eau, le traitement des eaux usées, l'industrie chimique et d'autres applications nécessitant le déplacement efficace des fluides. [8]



Figure I.10: Pompe roto dynamique . [36]

I.3 Les paliers lisses

I.3.1 Définition

Les paliers lisses, également connus sous le nom de paliers, bagues ou douilles, ont une forme cylindrique et ne contiennent aucun élément roulant. Les paliers lisses sont conçus pour effectuer des mouvements de glissement, oscillants, rotatifs ou alternatifs. Dans les applications impliquant des mouvements de glissement, les paliers lisses servent de paliers coulissants, de glissières ou de plaques d'usure. Dans ces applications, les surfaces de glissement sont généralement plates, mais elles peuvent aussi être cylindriques ; le mouvement est toujours linéaire plutôt que rotatif. Les paliers lisses peuvent avoir une forme monolithique ou être fabriqués avec une fente longitudinale (anneau roulé) afin de faciliter leur assemblage.

Il existe deux principales familles de paliers :

- Les paliers lisses : où l'arbre repose sur un palier et est séparé de celui-ci par un film lubrifiant. Ils sont utilisés dans une grande variété de conditions de fonctionnement (charge, température, vitesse de rotation, etc.) de plus en plus sévères. Le chauffage à l'intérieur du film lubrifiant devient important, ce qui influencera les performances des paliers.
- Les roulements : dont les corps roulants (billes ou rouleaux) séparent la bague rotative du trou extérieur.

En fonction de la direction de la charge par rapport à l'arbre en rotation, on distingue deux types de paliers porteurs de charge pour lesquels la charge est radiale, généralement appelés roulements, et les butées ou roulements de butée pour lesquels la charge est axiale. Les paliers à charge radiale sont généralement composés de deux éléments en arc de 180°, plus couramment appelés demi-bagues, et d'un élément en arc de 360°, appelé douille. Les paliers à charge axiale sont généralement composés de demi-flasques ou de rondelles pleines. Quel que soit le type de palier considéré, il est soit :

- Monocouche (exemple d'un palier en bronze massif).
- Multicouche (par exemple, un cuproplomb sur un support en acier).

Pour les applications sévères, les propriétés requises pour le bon fonctionnement du palier sont souvent antagonistes et la manière la plus élégante de contourner cette difficulté

est d'utiliser des matériaux multicouches qui fournissent les propriétés désirées au cœur ou en surface.[9]



Figure I.11: Coussinet [31]

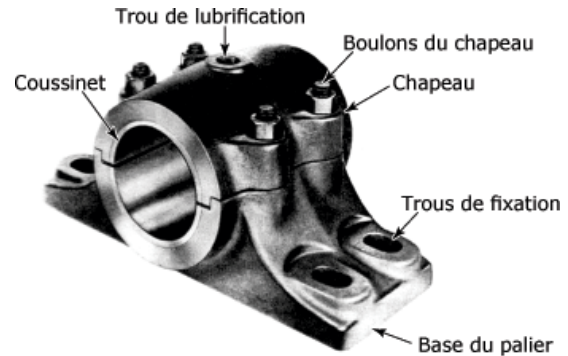


Figure I.12: Palier lisse [31]

I.3.2 Les types des paliers

Plusieurs types de coussinets sont utilisés dans les machines pour fournir une surface de roulement qui réduit la friction entre deux composants. Voici les types de coussinets les plus courants :

I.3.2.1 Paliers hydrodynamiques

Ces types de paliers sont généralement utilisés pour soutenir les vilebrequins des moteurs et sont conçus avec des surfaces en acier inoxydable hautement polies et des roulements de liaison, tous situés à l'intérieur du carter. Les surfaces polies réduisent la friction et l'usure, augmentant ainsi la durée de vie des composants.

Les paliers principaux du moteur fonctionnent sous un régime hydrodynamique. Cela signifie que, dans des conditions normales de fonctionnement, un film d'huile formé par l'arbre en rotation sert de barrière entre les paliers et les tourillons. Cette huile est acheminée à travers des trous dans les paliers, garantissant qu'ils sont bien lubrifiés tout en empêchant toute possibilité de corrosion au sein des roulements de liaison. Ce mécanisme de lubrification est crucial pour éviter l'usure excessive et les défaillances prématurées des composants.

De nombreuses turbomachines industrielles, y compris les compresseurs et les turbines, utilisent des paliers à tourillon. Cependant, ces industries utilisent également des paliers hydrostatiques. Cela signifie que l'arbre peut être soutenu par un coin d'huile même lorsque le système correspondant n'est pas en service. Les paliers hydrostatiques sont particulièrement avantageux dans les applications où les charges élevées et les vitesses de rotation variables sont fréquentes, car ils offrent une meilleure stabilité et un contrôle plus précis de la position de l'arbre.

L'utilisation de paliers hydrodynamiques et hydrostatiques permet de maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes mécaniques dans diverses applications industrielles. [10]



Figure I.13: Palier hydrodynamique [36]

I.3.2.2 Paliers lisses

Bien qu'ils fonctionnent selon un principe similaire à celui des conceptions de coussinet mentionnées précédemment, les paliers lisses sont utilisés aussi fréquemment pour les mouvements linéaires que pour les mouvements rotatifs. En raison de cette polyvalence, ces composants mécaniques sont souvent appelés roulements ou bagues de manière interchangeable.

Cependant, contrairement aux paliers hydrodynamiques et aux coussinets babbitt, qui impliquent souvent des systèmes mécaniques assez complexes avec un système de lubrification intégré, les coussinets lisses sont des composants relativement simples, ajustés par pression et utilisés dans une variété d'applications.

Les coussinets lisses sont souvent fabriqués en bronze fritté ou en fonte, et ils contiennent parfois des bouchons de lubrifiant à l'intérieur. Selon vos besoins, il existe également divers coussinets en plastique. Il existe deux principaux types de coussinets lisses disponibles : une version cylindrique simple et un type à collerette qui offre une surface de roulement pour les charges axiales. [10]



Figure I.14: Palier lisse [37]

I.3.2.3 Les coussinets sphériques

Les coussinets sphériques sont spécifiquement conçus pour supporter la rotation angulaire entre le bras de commande et les liaisons, bien qu'ils n'aient pas été spécifiquement conçus

pour gérer cette rotation, mais plutôt pour soutenir le mouvement angulaire entre les composants. De plus, la friction entre deux surfaces est considérablement réduite par une couche lubrifiante.

Les coussinets sphériques diffèrent des roulements à rouleaux typiques ; ces derniers appartiennent à la famille des roulements à éléments roulants, et bien que les coussinets sphériques aient également des capacités de rotation, leur utilisation principale est le mouvement angulaire.

La piste intérieure sphérique tourne généralement de manière angulaire à l'intérieur de la piste extérieure, tandis que l'huile fournit une couche lubrifiante entre les surfaces en contact des roulements sphériques. Certaines applications lourdes exigent des billes supplémentaires entre les pistes pour créer un mouvement avec très peu de friction.[10]



Figure I.15: Les coussinets sphériques [38]

I.3.2.4 Les coussinets de gabarit de perçage

Les coussinets de gabarit de perçage sont l'un des outils de serrage les plus importants destinés à offrir un guidage de perçage lors d'opérations de perçage de métaux précises. Ils sont principalement utilisés pour guider les forets lors du perçage de trous précis dans les pièces métalliques. Ces coussinets sont généralement utilisés dans les applications où une grande précision dimensionnelle est requise, telles que la fabrication d'outils, la production de pièces automobiles et l'usinage de précision.

Étant donné qu'ils sont principalement utilisés pour guider les outils plutôt que pour assurer le maintien réel du travail, les coussinets de gabarit de perçage sont principalement des composants ajustés par pression avec des doublures interchangeables. Cela permet de remplacer facilement les doublures endommagées ou usées, prolongeant ainsi la durée de vie utile du coussinet et garantissant des résultats de perçage précis à long terme.

De plus, en raison de leur rôle crucial dans le processus de perçage, les coussinets de gabarit sont fabriqués à partir de matériaux de haute qualité, tels que l'acier allié ou le carbure de tungstène, pour garantir une résistance élevée à l'usure et une durabilité maximale dans des conditions de travail difficiles.[11]



Figure I.16: Coussinets de gabarit de perçage [39]

I.3.3 L'application des coussinets dans l'industrie

Contrairement aux roulements à éléments roulants, qui sont conçus avec une durée de vie limitée à l'esprit, les coussinets lisses avec lubrification fluide intégrale présentent une durabilité exceptionnelle et une très longue durée de vie. En conséquence, ils sont utilisés dans des applications exigeantes où une défaillance du palier pourrait avoir des conséquences désastreuses.

Ces applications comprennent les turbines à vapeur et les compresseurs utilisés dans des applications de pipelines vitales dans les centrales électriques. Les arbres à faible vitesse, tels que ceux utilisés dans les hélices de navires, utilisent également fréquemment des coussinets lisses. Ils constituent également une solution simple et économique pour l'industrie agroalimentaire, ainsi que pour des opérations finales telles que les applications intermittentes.

De plus, les coussinets lisses offrent des avantages supplémentaires, tels qu'une capacité de charge élevée, une résistance à la corrosion et une réduction du bruit. Leur conception robuste et leur capacité à fonctionner sans entretien prolongent la durée de vie des équipements, réduisant ainsi les coûts de maintenance et améliorant l'efficacité opérationnelle dans une variété d'applications industrielles. [12]

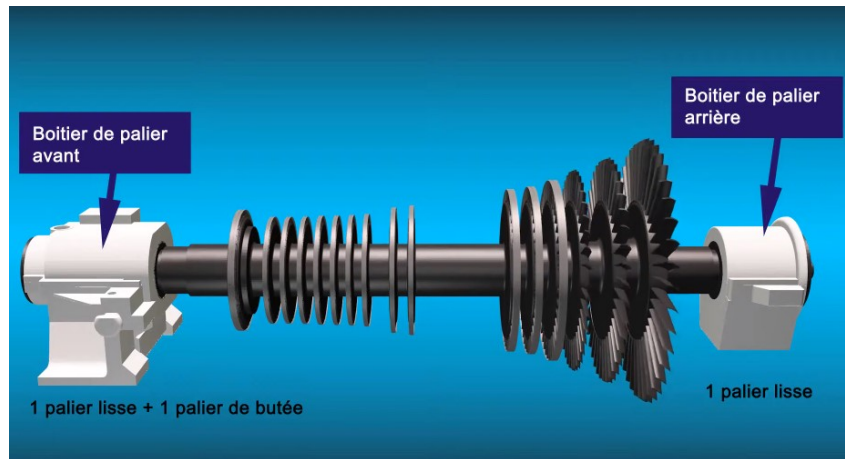


Figure I.17: Turbine supportée par deux paliers lisses [40]



Figure I.18: Compresseur [41]

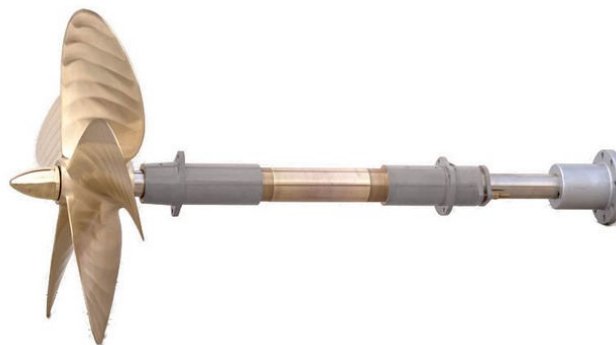


Figure I.19: Hélice [41]

I.3.4 L'usure des coussinets

I.3.4.1 Introduction

« L'usure est une perte progressive de matière à la surface d'un corps solide, due à des causes mécaniques, c'est-à-dire au contact et au mouvement relatif d'un corps antagoniste solide, liquide ou gazeux. » (DIN 50320)

Dans le cas des coquilles de coussinet, l'usure est due au contact métallique consécutif à la friction mixte entre le coussinet et le tourillon. Ceci est le cas, par exemple, à chaque démarrage et arrêt d'un moteur. Entre l'arrêt et la vitesse de décrochage de l'arbre, les coussinets utilisés traversent la plage de friction mixte. Dans cette plage, la capacité de charge du film de lubrifiant ne suffit pas toujours pour séparer complètement les partenaires de glissement (voir chapitre : « Fonctions des coussinets »).

Les matériaux résistants à l'usure jouent par conséquent un rôle important dans le cas des véhicules avec start/stop automatique. Aux faibles nombres de tours et si la contrainte est importante, il est également possible que la friction liquide ne soit pas atteinte et que le coussinet s'use. Des écarts de géométrie consécutifs à des erreurs de montage ou des déformations des manetons et du passage de coussinets peuvent également être responsables d'une usure.

Au cours des premières heures de service d'un coussinet, les partenaires de glissement s'adaptent entre eux. Les pics de rugosité et le profil de rugosité s'aplanissent. Cette usure de rodage d'adaptation est tout à fait souhaitable et ne constitue pas un mauvais fonctionnement du coussinet. Si la friction mixte s'intensifie, l'usure de rodage d'adaptation normale se transforme en érosion puis en grippage et la panne devient totale.

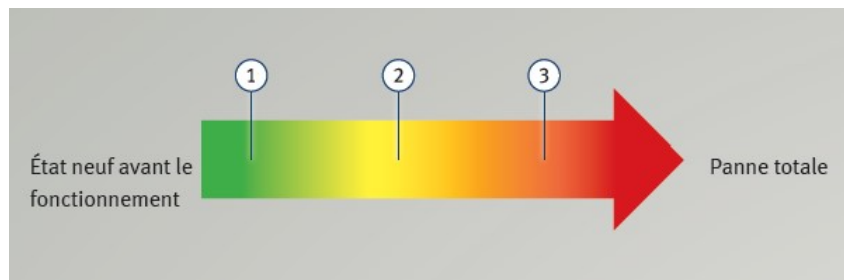


Figure I.20: la progression de l'usure [31]

1 : Usure de rodage d'adaptation 2 : Érosion 3 : Grippage

I.3.4.2 Usure de rodage d'adaptation

I.3.4.2.1 Description

- Traces de portée brillantes et lisses dans la zone de charge principale
- Transitions d'entrée et de sortie douces
- Structure d'usinage du coussinet encore reconnaissable

Une bande d'usure brillante est reconnaissable au milieu du coussinet tandis qu'aucune trace de fonctionnement n'est visible au niveau du dégagement et des bords. La structure d'usinage du coussinet est encore reconnaissable.

I.3.4.2.2 Analyse

Au cours des premières heures de service d'un coussinet, les pics de rugosité sont lissés et le profil de rugosité aplani par le contact entre le coussinet et le tourillon dans la zone

de friction mixte. L'usure se produit essentiellement dans la zone de charge principale du coussinet ou aux zones de divergences de forme macroscopiques (voir chapitre : « Cas particuliers d'usure par friction mixte »). L'usure de rodage d'adaptation est souhaitable et ne constitue donc pas un dommage du coussinet.

Remarque
Le fonctionnement du coussinet n'est pas altéré.

Toutefois, si l'usure de rodage d'adaptation s'intensifie, par exemple suite à un défaut d'alignement ou de forme persistant, il peut se produire des érosions, des grippages ou des dommages par fatigue.



Figure I.21: Usure de rodage d'adaptation [42]

I.3.4.3 Erosion

I.3.4.3.1 Description

- Traces de friction mixte brillantes et lisses, surtout dans la zone de charge principale

- Décalages de la couche de roulement ou de la couche de glissement jusque dans la zone de dégagement, généralement en forme de langue dans le sens de rotation

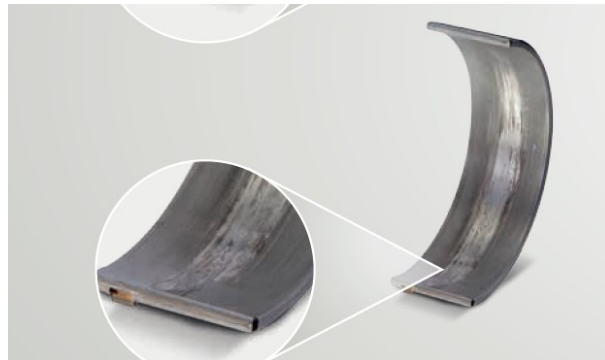


Figure I.22: Coquille de coussinet de bielle en matériau composite acier-laiton avec revêtement sputter côté tige [43]

Une trace de friction mixte brillante accompagnée en partie d'une formation de stries est reconnaissable. La couche sputter est décalée jusque dans la zone de dégagement. La zone où la couche sputter est déjà grippée est fondue. [13]

I.3.4.3.2 Analyse

Les érosions peuvent résulter de traces de frottement lorsque l'effet de la friction mixte s'intensifie. Si cette situation est provisoire, elles peuvent à nouveau être aplanies, le fonctionnement du coussinet n'est pas altéré outre mesure.

Toutefois, ceci est très difficile à évaluer. Si la situation de friction mixte perdure, l'érosion se solidifie et des stries peuvent se former sur le maneton. Les conséquences en sont des grippages sur les coquilles de coussinet concernées, la coquille de coussinet se soudant au maneton sous l'effet de la contrainte thermique.

I.3.4.3.3 Causes possibles

- Orifices d'huile pas dégagés : la cause peut en être un montage incorrect des coquilles de coussinet ou une obstruction des orifices d'huile, ce qui est souvent le cas avec les biocarburants
- Interstice de lubrification trop étroit, empêchant un film de lubrifiant solide de se former – cause : écarts de forme et de géométrie de l'arbre ou du maneton ou flexion du vilebrequin
- Interstice de lubrification trop grand : la pression hydrodynamique nécessaire à la formation d'un film de lubrification solide n'est pas atteinte
- Niveau d'huile ou pression d'huile trop bas
- Filtre à huile encrassé
- Pompe à huile défectueuse

- Fuite de conduites d'huile
- Surcharge des coussinets : contrainte supérieure à celle prévue – causes : par exemple tuning par puce électronique ou grippage du piston
- Action de particules : des particules pénètrent dans l'interstice du coussinet et provoquent des érosions sur le maneton et le coussinet. En cas d'incorporation ou de formation de stries, les bords se relèvent – conséquence : forte augmentation de la friction mixte.

I.3.4.4 Grippage

I.3.4.4.1 Description

- Zones d'arrachage de matériau
- Forte formation de stries et déformation
- Dégagement ainsi que rugosité et fragmentation
- Baisse de la cote d'écartement visible à l'œil nu en comparaison avec les coquilles de coussinet voisines intactes
- Caractéristiques de surchauffe : des fusions du matériau d'appui et des décolorations sont par exemple fréquentes en cas de grippages



Figure I.23: Coquille de coussinet de ligne inférieure en matériau composite acier-aluminium [43]

On constate une fusion et un déplacement du matériau d'appui au-delà du bord du coussinet de même qu'une fragmentation de la surface avec des zones d'arrachement du matériau.

I.3.4.5 Contact des bords unilatéral

I.3.4.5.1 Description

- Au niveau du contact des bords : manifestations de fatigue du matériau ou érosions reconnaissables dans les cas graves

- Caractéristiques de surchauffe telles que décolorations par la contrainte thermique ou dépôt de calamine au niveau du contact des bords au dos du coussinet

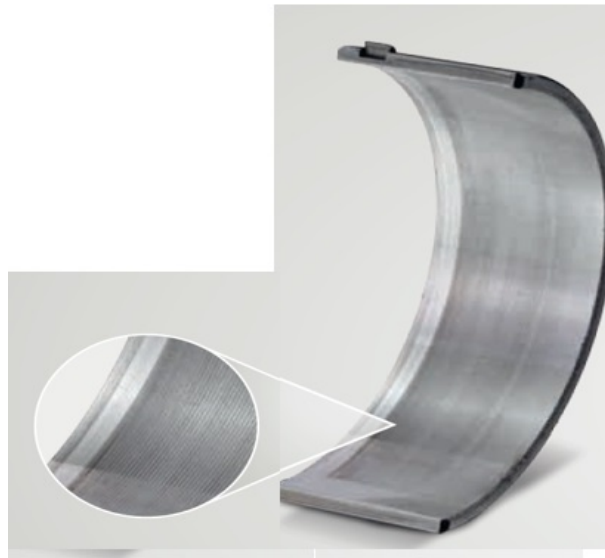


Figure I.24: Coquille de coussinet de bielle en matériau composite acier-laiton avec revêtement sputter côté tige [43]

Une usure unilatérale du bord est visible. L'usure se présente sous la forme d'une usure de rodage d'adaptation. Le fonctionnement du coussinet n'est pas altéré.

I.3.4.6 Usure en forme de bande au milieu du coussinet

I.3.4.6.1 Description

- Usure en forme de bande au milieu du coussinet dans le prolongement de la rainure d'huile – sur le coussinet de bielle dans les deux coquilles de coussinet au niveau de l'orifice d'huile sur le maneton
- Avec en partie des éraflures périphériques
- Usure moindre des bords du coussinet
- Zone d'usure étroitement limitée
- Dans les cas graves : manifestations de fatigue du matériau et érosions visibles [13]



Figure I.25: Coquille de coussinet de ligne inférieure en matériau composite acier-aluminium [43]

Cette figure illustre le pourcentage de pannes causées par les paliers lisses et leur impact sur le fonctionnement des machines tournantes :

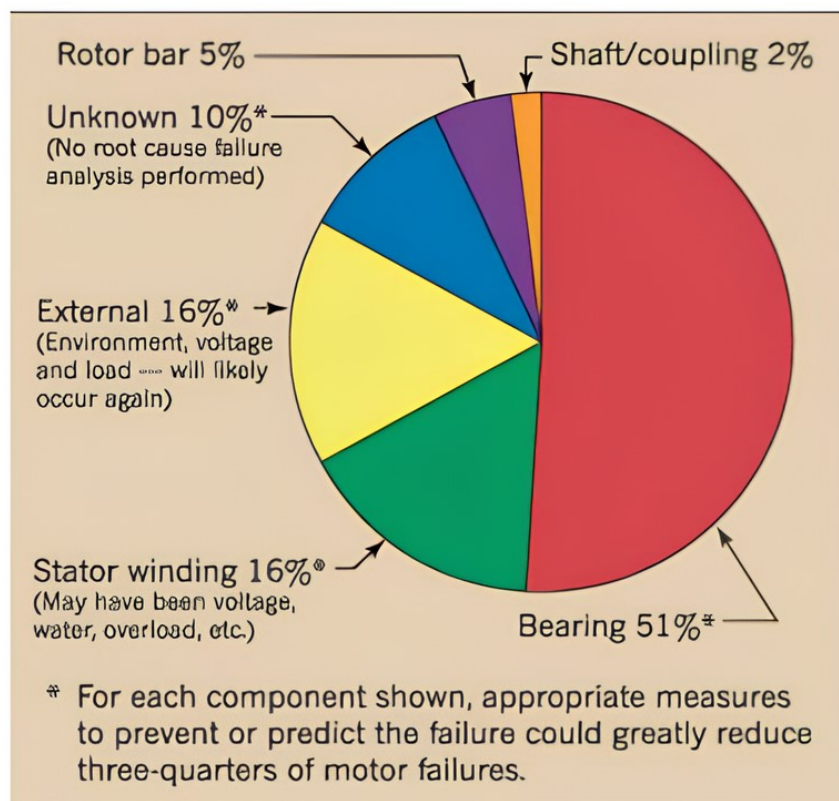


Figure I.26: Pourcentage de pannes causées par les paliers lisses [43]

I.4 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière l'importance cruciale des machines tournantes dans divers secteurs industriels, tels que la production d'énergie et la fabrication industrielle. Ces machines, essentielles à de nombreux processus, nécessitent des paliers lisses pour réduire le frottement et l'usure entre les pièces mobiles, influençant ainsi directement leur durabilité et leur efficacité. La compréhension approfondie des mécanismes d'usure, tels que l'abrasion, l'adhésion, la corrosion et la fatigue, ainsi que l'optimisation des matériaux et des techniques de lubrification, est essentielle pour améliorer la conception et la maintenance des paliers. Les avancées technologiques, y compris l'utilisation de lubrifiants nano structurés et les systèmes de surveillance conditionnelle, jouent un rôle clé dans la prolongation de la durée de vie des paliers et la réduction des coûts de maintenance. Pour garantir l'efficacité et la longévité des machines tournantes, il est crucial de se concentrer sur la conception, la sélection des matériaux et la maintenance des paliers lisses, tout en encourageant la collaboration entre chercheurs, ingénieurs et fabricants pour développer des solutions innovantes répondant aux exigences de performance et de durabilité de l'industrie moderne.

Chapitre II

Notions fondamentales sur le traitement de surface et les revêtements métalliques

II.1 Introduction

Le traitement de surface représente un pilier essentiel en génie mécanique et en science des matériaux, visant à métamorphoser les caractéristiques de la surface des matériaux pour améliorer leur performance et leur longévité. Cette discipline inclut une gamme variée de méthodes telles que le traitement mécanique, chimique, thermique et thermochimique, chacune adaptée à des applications spécifiques comme l'amélioration de la résistance à l'usure, de la protection contre la corrosion, et de l'adhérence, ainsi que l'optimisation des aspects esthétiques. Les revêtements métalliques, tels que ceux en nickel, chrome ou aluminium, sont également largement employés pour conférer une protection supplémentaire tout en améliorant l'attrait visuel des surfaces traitées. Une compréhension approfondie des principes fondamentaux du traitement de surface est indispensable pour maximiser les performances des composants dans des environnements rigoureux, garantissant ainsi leur fiabilité opérationnelle et leur durabilité accrue.

II.2 Les méthodes traitement de surface

II.2.1 Traitement mécanique

II.2.1.1 Le martelage

Le martelage de surface (en l'anglais shot peening) est un procédé qui nécessite de frapper de manière répétée une pièce métallique et utilisé dans plusieurs secteurs industriels, soit en particulier dans les secteurs aéronautique et automobile. C'est une vieille technique utilisée par les armuriers du Moyen Âge qui martelaient les armures des chevaliers pour les rendre plus résistantes aux attaques ennemies. Plus récemment, cette technique a été reprise par des ingénieurs en surface qui martelaient des surfaces métalliques à l'aide de marteaux à tête arrondie afin de leur procurer une meilleure résistance à la contrainte de compression et d'ainsi prolonger leur durée de vie utile. Le martelage est un processus utilisé pour produire une compression ou contrainte sur le métal afin de modifier ses

propriétés mécaniques. Pour y arriver, il suffit de projeter de très petites billes métalliques (bille de verre, d'acier ou de céramiques) sur une surface métallique avec suffisamment de force pour produire une déformation.

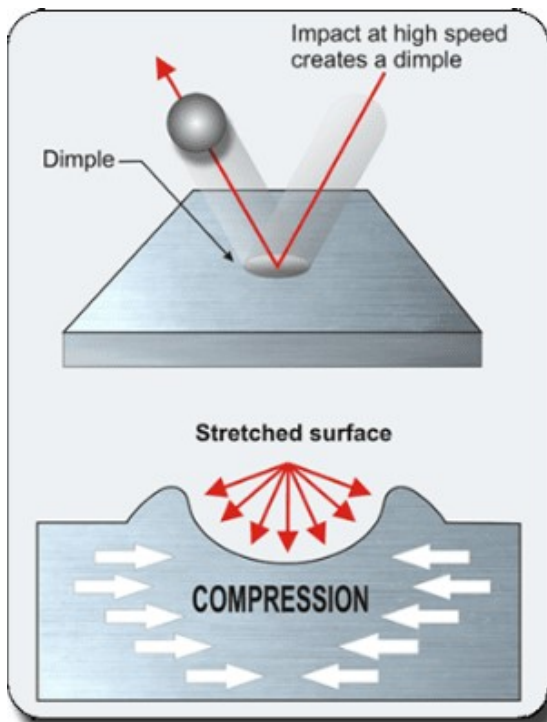


Figure II.1: Opération de compression [44]

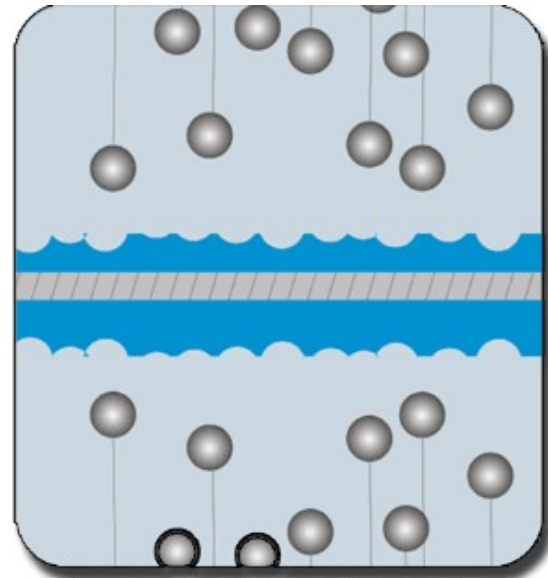


Figure II.2: Martelage [44]

Domaine d'application :

Le martelage est une technique industrielle essentielle pour améliorer les propriétés mécaniques et réduire le poids des composants, utilisée dans des secteurs comme l'aéronautique, l'automobile et le ferroviaire. En augmentant la résistance et en réduisant la consommation de matériaux, il contribue à l'efficacité des véhicules et des structures en béton armé. Cette technique renforce également les composants métalliques, diminuant le risque de bris sous des conditions extrêmes et augmentant la résistance à la fatigue des pièces de transmission, telles que les engrenages. [14]

II.2.1.2 Le grenailage

Le grenailage est une technique qui consiste à projeter à grande vitesse des billes sur la surface d'un objet pour en modifier la structure superficielle. Le grenailage peut être utilisé pour le nettoyage de surfaces, le formage de pièces fines et pour la mise en contrainte superficielle.



Figure II.3: Le grenailage [45]



Figure II.4: Avant et après l'opération [45]

Domaine d'application :

Le grenailage, également connu sous le nom de sablage, est une technique de traitement de surface utilisée dans divers domaines industriels pour améliorer les propriétés mécaniques et l'apparence des matériaux. Voici quelques-uns des principaux domaines d'application :

- **Aéronautique** : Utilisé pour renforcer les pièces métalliques, améliorer la résistance à la fatigue et préparer les surfaces pour le revêtement.
- **Automobile** : Emploi dans le renforcement des composants, le nettoyage des pièces avant peinture et le polissage des surfaces pour une finition esthétique.
- **Construction Navale** : Utilisé pour le nettoyage des coques des navires, l'élimination de la rouille et la préparation des surfaces pour les revêtements anticorrosion.
- **Industrie Métallurgique** : Préparation des surfaces avant la peinture, le revêtement ou la galvanisation, et pour l'élimination des contaminants.
- **Fabrication de Composants de Transmission** : Amélioration de la résistance à la fatigue des engrenages et autres pièces soumises à des contraintes mécaniques élevées. [15]



Figure II.5: Nettoyage par grenailage [46]

II.2.1.3 Le polissage vibro-abrasion

Le polissage vibro-abrasion ou tribofinition des métaux est un procédé qui consiste à ébavurer et polir les surfaces de pièces métalliques ou autres matériaux. Les pièces sont plongées avec des medias d'ébavurage ou de polissage, de l'eau et un additif (liquide, pâte, ou poudre) dans des bols vibrants. Par vibration, on obtient une surface qui peut être lisse, brillante ou mate et qui procure aux pièces une résistance à la corrosion accrue. En outre, ce procédé mécanique tend à écrouir la surface de la pièce métallique et augmente sa dureté superficielle. Polissage, ébavurage, rayonnage, désoxydation, lissage, dégraissage, décapage, nettoyage de surface et décalaminage sont quelques exemples courants d'applications de la tribofinition.



Figure II.6: Polissage vibro-abrasion [48]



Figure II.7: Avant et après l'opération [47]

Domaine d'application :

Le polissage par vibro-abrasion est utilisé dans divers secteurs industriels pour améliorer la finition de surface des pièces métalliques et non métalliques. Ses principales applications incluent l'aéronautique, où il sert à lisser et à polir les composants complexes, l'automobile pour la finition des pièces du moteur et de transmission, et la bijouterie pour donner un éclat final aux pièces. Il est également employé dans la fabrication de dispositifs médicaux pour assurer des surfaces lisses et sans bavures, et dans l'industrie des outils de coupe pour améliorer la durée de vie et les performances des outils. Ce procédé est apprécié pour sa capacité à traiter de grandes quantités de pièces avec une uniformité de finition élevée. [16]



Figure II.8: Domaine d'application du polissage [49]

II.2.2 Traitement thermochimique

II.2.2.1 La boruration

La boruration est un procédé de traitement thermochimique visant à améliorer la dureté et la résistance à l'usure des surfaces métalliques. Ce processus consiste à diffuser des atomes de bore dans la surface d'un matériau, généralement à des températures comprises entre 700 et 1000 °C. La couche borurée formée est extrêmement dure et résistante à la corrosion et à l'oxydation, prolongeant ainsi la durée de vie des pièces traitées. Utilisée couramment dans l'industrie des outils, des pièces mécaniques et des composants exposés à des conditions sévères, la boruration est un traitement efficace pour améliorer les performances des matériaux.

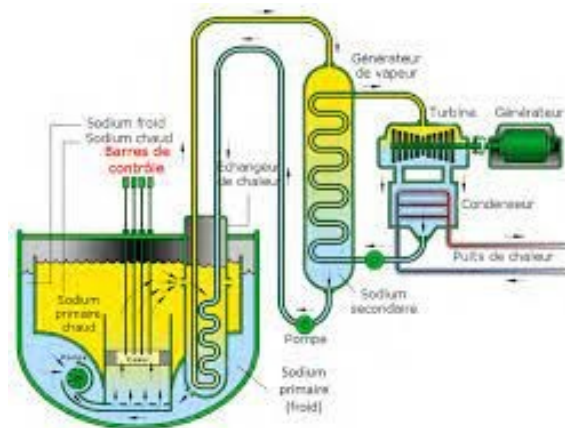


Figure II.9: La boruration [50]

Domaine d'application :

La boruration trouve son application dans divers secteurs industriels nécessitant une amélioration significative de la résistance à l'usure et à la corrosion des pièces métalliques. Cela inclut les engrenages et les arbres de transmission pour augmenter leur durabilité et réduire l'usure, les outils de coupe tels que les forêts et les fraises pour prolonger leur durée de vie et maintenir la précision des coupes, ainsi que les composants de machines soumis à des environnements agressifs comme les turbines, où la résistance à la corrosion est essentielle pour assurer une performance durable. La boruration est également utilisée dans l'industrie automobile pour renforcer les pièces mécaniques critiques comme les arbres à cames et les pistons, améliorant ainsi leur fiabilité et leur longévité dans des conditions de fonctionnement extrêmes. [31]

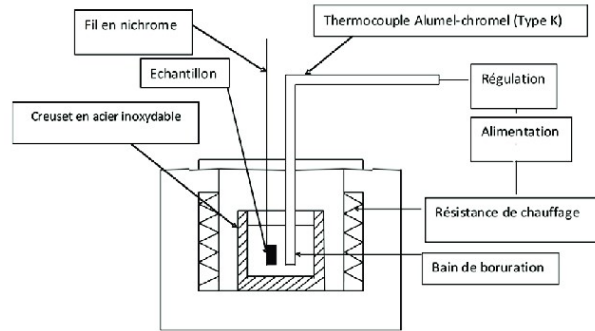


Figure II.10: Application de la boruration [51]

II.2.2.2 La cémentation

La cémentation est un traitement thermo-chimique qui consiste à faire pénétrer superficiellement du carbone dans un acier dont le pourcentage de carbone est insuffisant pour prendre de la trempe, afin de le transformer en surface en un acier fortement carburé susceptible d'être trempé. La cémentation désigne deux procédés métallurgiques :

- **Historiquement** : c'est un procédé de fabrication de l'acier par réaction de fer avec du monoxyde de carbone (cémentation à cœur pour obtenir de l'acier de cémentation) .
- **Acception moderne** : procédé de métallurgie servant à durcir les aciers par ajout superficiel de carbone, avant une trempe superficielle (cémentation superficielle pour obtenir de l'acier cémenté). Le mécanisme est le même dans les deux cas, mais dans le procédé historique, on attend « suffisamment longtemps » pour que le carbone pénètre à cœur.



Figure II.11: La cémentation [52]

Principe d'application :

La cémentation fonctionne en chauffant une pièce métallique en présence d'une source de carbone, telle que du charbon ou une poudre de carbone, à des températures élevées mais inférieures au point de fusion du métal de base. À ces températures, le carbone a la capacité de diffuser dans la surface du métal. Ce processus de diffusion du carbone forme une couche superficielle enrichie en carbone, créant des carbures qui augmentent la dureté de la surface tout en préservant la ténacité du cœur métallique. La profondeur et

l'épaisseur de la couche carbonée peuvent être contrôlées en ajustant la température et la durée du traitement, permettant ainsi d'adapter les propriétés mécaniques de la pièce selon les besoins spécifiques de l'application. [18]

II.2.2.3 La nitruration

La nitruration est un traitement de surface qui consiste à incorporer de l'azote dans la couche superficielle d'un acier, pour en modifier les propriétés mécaniques. Procédé de nitruration :

La nitruration est un traitement superficiel où l'ammoniac se décompose en hydrogène et azote lorsqu'il est chauffé avec de l'acier entre 520 °C et 580 °C. L'azote réagit avec le fer pour former une couche superficielle de nitrures de fer, connue sous le nom de couche de combinaison, à partir de laquelle l'azote diffuse vers le cœur de la pièce. Ce procédé peut considérablement augmenter la dureté superficielle des aciers spéciaux. Il existe trois méthodes principales : nitruration en phase liquide, nitruration gazeuse et nitruration ionique. Les avantages incluent une résistance accrue à l'usure sans altérer les propriétés mécaniques du cœur de la pièce, notamment pour les engrenages et les roulements. Cependant, la nitruration est un processus long (jusqu'à 100 heures pour une pénétration maximale de 1 mm) et la couche formée ne supporte aucune déformation plastique, limitant ses applications dans des pièces soumises à des contraintes élevées.[18]



Figure II.12: La nitruration [53]

Domaine d'application :

La nitruration trouve son application dans divers domaines industriels nécessitant une augmentation significative de la résistance à l'usure et à la corrosion des pièces métalliques. Cela inclut les engrenages, les arbres de transmission, les roulements et autres composants mécaniques critiques où une surface dure et résistante est essentielle pour prolonger la durée de vie et réduire l'usure. Les industries telles que l'automobile, l'aérospatiale, la fabrication d'outils et les équipements industriels utilisent la nitruration pour améliorer les performances des pièces soumises à des conditions de travail extrêmes. Les avantages incluent une dureté élevée de surface tout en conservant les propriétés mécaniques du cœur de la pièce, ce qui en fait un choix précieux pour les applications où la résistance à l'usure et la longévité sont cruciales.



Figure II.13: Procédé de de nitration [54]

II.2.3 Traitement chimique

II.2.3.1 La chromatisation

La chromatisation, également appelée passivation chromique, est un traitement chimique de surface appliqué principalement aux métaux, tels que l'aluminium, le zinc et l'acier galvanisé, pour améliorer leur résistance à la corrosion et préparer les surfaces pour des traitements ultérieurs (comme la peinture ou le revêtement). Ce processus forme une couche de conversion chimique composée de chromates sur la surface du métal traité.

Principe de l'opération :

- **Préparation de la surface :** La surface métallique est d'abord nettoyée pour enlever toute saleté, huile, oxyde ou autres contaminants. Ceci est généralement réalisé par des procédés de nettoyage alcalins ou acides.
- **Immersion dans la solution de chromatisation :** La pièce métallique propre est ensuite immergée dans une solution de chromatisation, qui contient principalement des composés de chrome hexavalent ($Cr6+$) ou, dans des alternatives plus récentes et plus sûres, des composés de chrome trivalent ($Cr3+$).
- **Formation de la couche de conversion :** Pendant l'immersion, une réaction chimique se produit entre la surface du métal et les ions chromate présents dans la solution. Cette réaction forme une couche de conversion chimique sur la surface métallique, souvent visible comme un film coloré (jaune, vert, bleu ou transparent selon les spécificités du traitement).
- **Rinçage et séchage :** Après la formation de la couche de conversion, la pièce est rincée à l'eau pour enlever tout excès de solution chimique, puis séchée. La couche formée est généralement assez mince mais offre une protection efficace contre la corrosion.

Domaine d'application :

- **Industrie aéronautique :** Utilisée pour protéger les composants en aluminium contre la corrosion tout en offrant une base adhérente pour les peintures et les revêtements.

- **Industrie automobile** : Employée pour améliorer la résistance à la corrosion des pièces en zinc et en aluminium, et pour préparer les surfaces pour le revêtement et la peinture.
- **Électronique** : Utilisée pour protéger les contacts et les composants métalliques contre la corrosion, tout en assurant une bonne conductivité électrique.
- **Construction et infrastructure** : Utilisée pour protéger les structures métalliques et les composants exposés aux environnements corrosifs, tels que les ponts, les bâtiments, et les installations offshore.
- **Équipements industriels** : Appliquée sur les pièces et les machines en métal pour prolonger leur durée de vie et améliorer leur résistance à la corrosion dans des environnements industriels rigoureux. [18]



Figure II.14: Chromatisation pour pièces en aluminium [55]

II.2.3.2 La phosphatation

La phosphatation est un traitement chimique de surface utilisé principalement pour améliorer l'adhérence des peintures et revêtements, augmenter la résistance à la corrosion, et réduire les frottements sur les métaux tels que l'acier, l'aluminium, et le zinc. Ce processus forme une couche de phosphate de zinc, de fer ou de manganèse sur la surface du métal traité.

Principe de l'opération

- **Préparation de la surface** : La surface métallique est d'abord nettoyée pour éliminer toute saleté, huile, oxydes ou autres contaminants. Cela se fait généralement par des procédés de dégraissage et de décapage chimique ou mécanique.
- **Immersion dans la solution de phosphatation** : La pièce métallique propre est ensuite immergée dans une solution de phosphatation, qui contient des ions phosphates, ainsi que des agents oxydants et des accélérateurs. Les solutions peuvent varier en fonction du type de phosphatation (zinc, fer, manganèse).
- **Formation de la couche de conversion** : Pendant l'immersion, une réaction chimique se produit entre la surface du métal et les ions phosphate présents dans la solution. Cette réaction forme une couche de conversion chimique composée de cristaux de phosphate sur la surface métallique. La nature et la structure de cette couche dépendent du type de phosphate utilisé.

- **Rinçage et séchage** : Après la formation de la couche de conversion, la pièce est rincée pour éliminer tout excès de solution chimique, puis séchée. Un traitement ultérieur avec un scellant ou une huile peut être appliqué pour améliorer encore la résistance à la corrosion.

Domaine d'application

- **Industrie automobile** : Utilisée pour préparer les surfaces métalliques des carrosseries et des pièces avant l'application de peintures et de revêtements, et pour améliorer la résistance à la corrosion des pièces en acier.
- **Industrie électroménager** : Appliquée sur les appareils ménagers en métal pour augmenter leur durabilité et leur résistance à la corrosion.
- **Construction** : Utilisée pour protéger les structures métalliques et les composants en acier contre la corrosion et pour améliorer l'adhérence des peintures et des revêtements de protection.
- **Équipements industriels** : Appliquée sur les pièces et les machines pour réduire les frottements, améliorer la résistance à l'usure et augmenter la durabilité des équipements dans des environnements industriels exigeants.
- **Industrie militaire** : Utilisée pour protéger les équipements et les véhicules militaires en métal contre la corrosion et pour améliorer la durabilité et la résistance des surfaces.

La phosphatation est largement utilisée en raison de sa capacité à fournir une protection anticorrosion efficace et à améliorer l'adhérence des peintures et des revêtements sur diverses surfaces métalliques. Elle joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels pour prolonger la durée de vie des composants métalliques et améliorer leurs performances globales.[19]



Figure II.15: Pièces traitées par phosphatation [56]

II.3 Les revêtements métalliques

Le revêtement métallique est le processus consistant à recouvrir une pièce matérielle d'une couche supplémentaire de métal et d'alliages pour éviter la corrosion. En plus de prévenir

la détérioration, le revêtement métallique améliore les propriétés mécaniques, physiques et esthétiques des pièces sur lesquelles il est appliqué (Substrat). Il existe plusieurs manières d'obtenir la couche métallique sur la surface, notamment électro chimiquement, chimiquement et mécaniquement.

Le zinc, le cadmium, l'aluminium, le chrome, le nickel et l'argent sont des métaux couramment utilisés pour le revêtement métallique. Cependant, le zinc est le plus courant dans la pratique de l'industrie manufacturière.[20]

II.3.1 Types courants de revêtement métallique

II.3.1.1 Galvanoplastie

La galvanoplastie est le processus de développement d'une fine couche de métal de revêtement sur la surface du substrat par électrolyse. Le matériau de substrat sert de cathode et le matériau de revêtement d'anode dans le processus. Des solutions aqueuses d'acides, de bases ou de sels sont utilisées pour conduire le courant. Ici, le matériau enduit doit être contenu dans la solution aqueuse.

Les ions du matériau de revêtement se déplacent vers la cathode lorsque l'électricité est appliquée aux électrodes, où ils déposent une couche. Cette approche est la plus couramment utilisée pour le placage de zinc sur des matériaux ferreux.



Figure II.16: Configuration de la galvanoplastie [57]

La surface doit être uniformément recouverte du matériau libéré par l'anode. Le volume de dépôt est affecté par plusieurs variables, notamment la densité de courant, la durée de l'électrolyse et d'autres paramètres. Visualisons cela à l'aide d'une équation complexe.

Domaine d'application

La galvanoplastie trouve des applications dans divers domaines industriels. Dans la bijouterie, elle permet de plaquer des métaux précieux comme l'or et l'argent sur des métaux moins coûteux, améliorant ainsi l'esthétique et la résistance à la corrosion. Dans l'industrie automobile, elle est utilisée pour chromer des pièces telles que les pare-chocs et les jantes, offrant une finition brillante et durable. En électronique, elle améliore la conductivité et la résistance à la corrosion des connecteurs et des circuits imprimés en utilisant des métaux comme l'or et le nickel. Dans l'aéronautique, elle protège les

composants métalliques critiques contre la corrosion, augmentant ainsi leur durabilité et fiabilité. [20]

II.3.1.2 Galvanisation

Galvanisation est le procédé de revêtement métallique le plus courant dans lequel le zinc est appliqué sur l'acier ou le fer pour le protéger de la corrosion. Si vous avez déjà observé que pratiquement tous les produits en acier ont une teinte argentée brillante sur leur surface, cette couleur est causée par la galvanisation et est connue sous le nom d'acier galvanisé. Les pièces sont galvanisées en les plongeant dans une solution de zinc chaude, qui forme une fine couche protectrice. Au cours du processus de galvanisation à chaud, le métal de base nettoyé a été plongé (après avoir atteint le point de fusion du zinc) dans un bain de zinc fondu. Enfin, une couche de revêtement faible et uniforme est formée en faisant passer les feuilles à travers des rouleaux immédiatement après le revêtement. Le revêtement métallique avec galvanisation est une technique très abordable, simple et rapide qui offre une haute résistance à la corrosion. Les équipements et composants des machines agricoles, automobiles, meubles, construction et bien d'autres articles sont tous soumis au processus de galvanisation.



Figure II.17: Pièces galvanisées [58]

Domaine d'application

La galvanisation est largement utilisée dans plusieurs industries pour protéger les métaux contre la corrosion. Dans la construction, elle est appliquée aux structures en acier, comme les poutres et les poteaux, pour prolonger leur durée de vie et assurer leur résistance aux intempéries. Dans l'automobile, elle est utilisée pour protéger les châssis et les autres composants métalliques des véhicules contre la rouille. En agriculture, la galvanisation protège les équipements et les structures, comme les clôtures et les silos, contre la corrosion due à l'exposition aux éléments et aux produits chimiques agricoles. De plus, elle est essentielle dans les infrastructures de transport, notamment pour les ponts et les rails, où la protection contre la corrosion est cruciale pour la sécurité et la longévité. [20]

II.3.1.3 Revêtement en poudre

Le plus revêtement en poudre La méthode utilise la force électrostatique pour appliquer un revêtement en poudre métallique sec sur la surface du composant. La poudre contient des grains raffinés de particules de pigment qui donnent à la surface une couleur appropriée.

La surface du matériau à revêtir est nettoyée dans une première phase, où la poussière, la rouille, les scories et toute autre pollution sont éliminées à l'aide d'un nettoyage acide

ou simplement d'eau distillée, en fonction de la propreté de la surface et des exigences de qualité de finition. Le processus de nettoyage augmente également l'adhésivité de la surface afin que le revêtement soit plus efficace.



Figure II.18: Partie enduite de poudre [58]

II.3.1.4 Revêtement de peinture

Le « revêtement de peinture métallique » fait référence à l'application de diverses peintures liquides sur des surfaces matérielles. Le processus de création d'une fine couche métallique supplémentaire qui résiste à la corrosion est très traditionnel. Cependant, la formulation de la couleur est un élément crucial dans l'efficacité de cette stratégie. Par conséquent, différentes formulations de peinture sont requises en fonction du type de matériau, de l'environnement exposé et des exigences de performance.

Le revêtement de peinture est moins durable que les autres méthodes de revêtement métallique que nous avons examinées car il a tendance à s'user après un certain temps. Cependant, cela reste un excellent moyen de rendre résistants à la corrosion les produits et les pièces qui seront installés à l'intérieur. [20]



Figure II.19: Surface métallique recouverte de peinture. [58]

II.3.1.5 Projection thermique

Le revêtement par projection thermique est surtout connu pour la couche métallique des structures en acier. L'acier utilisé dans les petits et grands systèmes tels que les chemins de fer, les voies ferrées et les bâtiments en acier est exposé à l'environnement et nécessite une forte protection contre la formation de rouille. En raison de leur taille, ces structures sont difficiles à galvaniser, à galvaniser ou à recouvrir de métaux protecteurs par d'autres

méthodes. Mais en utilisant une technique de projection thermique, il est possible de revêtir des surfaces en acier avec du zinc, de l'aluminium ou des alliages zinc-aluminium.

Le nettoyage est effectué dans une première phase pour améliorer l'adhésivité de la surface et éliminer les imperfections de la surface. Ensuite, le pistolet pulvérisateur avec la source de chaleur (flamme d'oxygène gazeux ou arc électrique) est alimenté avec la poudre métallique ou les formes métalliques. Ensuite, le zinc ou l'aluminium liquide est pulvérisé sur la surface à l'aide d'un jet d'air comprimé. L'aluminium peut fréquemment être appliqué comme couche barrière avant le zinc pour améliorer l'efficacité du revêtement. Il utilise les oxydes de titane, de chrome et de nickel.

Parlons maintenant un peu plus du revêtement métallique de l'acier, car la plupart des structures sont aujourd'hui construites en acier et tous les types d'industries utilisent des produits et des pièces en acier.[20]

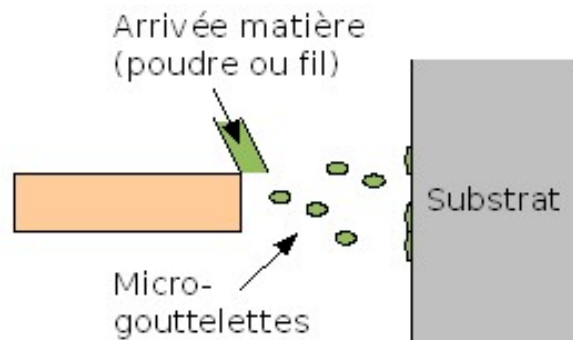


Figure II.20: Surface métallique recouverte de peinture. [59]

II.3.1.6 Revêtement en acier dur

C'est un type particulier de procédé de revêtement métallique pour les composants en acier qui participent continuellement à l'opération de glissement, qui contient principalement des oxydes, des nitrures, des carbures, des borures ou du carbone. L'objectif principal du revêtement dur pour l'acier est d'améliorer sa résistance à la corrosion et sa solidité dans le mécanisme coulissant afin qu'il puisse facilement résister aux environnements les plus difficiles sans se détériorer.



Figure II.21: Revêtement en acier dur . [60]

Domaine d'application

Le revêtement en acier dur est essentiel dans de nombreux secteurs industriels pour renforcer la durabilité et la performance des pièces métalliques. Dans la fabrication, il prolonge la durée de vie des outils de coupe, des matrices et des moules en les protégeant de l'usure. En ingénierie mécanique, il augmente la résistance des composants critiques comme les arbres, les roulements et les engrenages face aux contraintes mécaniques. Le secteur énergétique utilise ce revêtement pour améliorer la fiabilité des turbines, des vannes et des équipements de forage dans des environnements hostiles. Dans l'aérospatiale, il protège les pièces des moteurs et des structures contre les conditions extrêmes, assurant la sécurité et l'efficacité des avions. [20]

II.4 Conclusion

En conclusion, les méthodes de traitement de surface jouent un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés des matériaux métalliques, répondant ainsi aux exigences spécifiques de diverses industries. La galvanoplastie, la galvanisation, la phosphatation et le revêtement en acier dur, entre autres, offrent des solutions efficaces pour augmenter la résistance à la corrosion, améliorer la durabilité, et optimiser la performance des composants. Les revêtements métalliques, comme ceux en nickel, chrome ou aluminium, sont également largement utilisés pour fournir une protection supplémentaire et améliorer les caractéristiques esthétiques des surfaces traitées. Chaque méthode possède ses propres avantages et domaines d'application, allant de la protection esthétique des bijoux à la robustesse des pièces mécaniques dans des environnements extrêmes. L'innovation continue dans ces technologies de traitement de surface est essentielle pour répondre aux défis industriels actuels et futurs, garantissant des produits plus performants et durables.

Chapitre III

Conception par rétro-ingénierie, calcul et dimensionnement du palier

III.1 Introduction

La conception par rétro-ingénierie, combinée au calcul et au dimensionnement des paliers lisses, est une approche innovante visant à améliorer et à optimiser les performances des systèmes mécaniques existants. La rétro-ingénierie permet de déconstruire et d'analyser des composants pour comprendre leur fonctionnement et leurs caractéristiques structurelles, facilitant ainsi la reproduction ou l'amélioration des pièces. Dans le cas des paliers lisses, cette méthodologie est essentielle pour déterminer les dimensions optimales et les matériaux appropriés, garantissant une réduction de l'usure, une meilleure dissipation de la chaleur, et une longévité accrue. Par conséquent, cette approche intégrée joue un rôle crucial dans la fiabilité et l'efficacité des machines tournantes, tout en réduisant les coûts de maintenance et en améliorant la productivité industrielle.

III.2 La rétro-ingénierie

La rétro-ingénierie est le processus qui permet d'identifier les propriétés d'un objet physique en effectuant une analyse complète de sa structure, de ses fonctions et de ses conditions de fonctionnement. Les mesures de la géométrie de la surface totale de l'objet sont prises, soit manuellement, soit à l'aide de diverses technologies de mesure 3D, afin de créer une représentation numérique 3D de l'objet.

La rétro-ingénierie permet aux fabricants de comprendre comment une pièce a été conçue afin de la reproduire, de la modifier ou de l'améliorer. La rétro-ingénierie est également connue sous le nom d'ingénierie inverse. Pour quelle raison ? Les équipes de rétro-ingénierie travaillent « à rebours » du processus de conception original ; elles partent du résultat final, déconstruisent le produit et effectuent des évaluations et des mesures afin d'obtenir les informations de conception physique. [22]

III.2.1 Méthode utilisée pour la rétro-ingénierie

Pour effectuer le rétro-engineering du coussinet, on a utilisé le scanner 3D du laboratoire de fabrication (FABLAB).

III.2.1.1 Le scanner 3D

Un scanner tridimensionnel est un appareil qui analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture...) de ceux-ci. Les données ainsi collectées peuvent alors être utilisées pour construire des images de synthèse en trois dimensions (objets numériques) à des fins diverses. Ces appareils sont beaucoup utilisés par les industries du divertissement pour des films ou des jeux vidéo. Des images numériques en 3D d'objets scannés servent également à la conception industrielle, à la conception d'orthèses et de prothèses, à la rétro-ingénierie, pour le contrôle qualité (référentiel numérique) ou pour la documentation d'objets culturels. [23]

III.2.1.1.1 Le scanner utilisé (FREESCAN X5)

Le Free Scan X5 est un scanner 3D portable conçu par le fabricant Shining 3D, basé en Chine. Le Shining 3D Free Scan X5 est léger et portable avec un poids de seulement 0.8 kg. Il remplace le Free Scan X3 en offrant davantage de performance grâce à sa rapidité et précision accrues. Ce scanner 3D professionnel utilise la technologie de triangulation laser (10 lignes, Classe II eye safe) en projetant une raie lumineuse sur l'objet ou la pièce à scanner en 3D. [23]



Figure III.1: Free scan X5.

III.2.1.1.2 Caractéristiques du Shining 3D FreeScan X5

- **Léger et facile à manipuler** : Léger et pratique avec son poids de seulement 0.8 kg il se faufile facilement pour accéder aux zones complexes à scanner en 3D.
- **Scan 3D grand volume** : Presque sans limitations de taille. N'est pas affecté par la taille, texture et couleur des pièces à scanner en 3D.
- **Haute précision et rapide** : Précision mesurée à 0.03 mm selon le standard Allemand VDI/VDE 2634. La vitesse de scan 3D peut atteindre 350000 points/s.
- **Compatibilité** : Compatible avec les systèmes photogrammétriques, ce qui permet le scan 3D de pièces de très grandes dimensions.

- **Interface avec logiciels CAD** : Le Shining 3D Free Scan X3 est compatible avec les logiciels de CAO les plus connus : 3D Systems (Geomagic Solutions), InnovMetric Software (PolyWork), Dassault Systèmes (CATIA V5 & SolidWorks), PTC (Pro/ENGINEER), Siemens (NX Solid Edge) et Autodesk (Inventor Alias, 3ds Max, May & Softimage). [23]

III.2.1.1.3 Logiciel géomatique Design X

Geomagic Design X est un logiciel de rétro-ingénierie développé par 3D Systems. Il permet principalement de transformer un scan 3D en modèle CAO (conception assistée par ordinateur) grâce à son interface intuitive. Ce logiciel combine des fonctionnalités de modélisation surfacique et volumique, ce qui le rend particulièrement efficace pour recréer des géométries complexes à partir de données de numérisation 3D. Geomagic Design X est utilisé dans divers domaines, tels que l'ingénierie, la fabrication, l'automobile, l'aérospatiale et la santé, où la précision et l'efficacité de la rétro-conception sont essentielles pour le développement de produits et l'optimisation des processus. [24]

III.2.1.2 Les étapes de l'opération

III.2.1.2.1 Le positionnement de la pièce

On commence par poser le coussinet sur une table stable et propre pour assurer une surface de travail adéquate. Il est important de s'assurer que la table est suffisamment grande pour accueillir à la fois le coussinet et les équipements nécessaires pour le scannage. Ensuite, on fixe des autocollants non seulement sur la table mais aussi sur le coussinet lui-même. Ces autocollants, qui doivent être disposés de manière stratégique, servent de repères pour le scanner. Le positionnement précis des autocollants est essentiel car le scanner les utilise pour créer un nuage de points détaillé de la surface du coussinet. Ces points permettent de capturer avec précision la géométrie complexe de la pièce, facilitant ainsi les étapes ultérieures de modélisation.



Figure III.2: Le positionnement de la pièce . [6]

III.2.1.2.2 L'opération du scan

Le scanner doit pénétrer entièrement le coussinet pour détecter tous les autocollants et ainsi former un nuage de points, comme mentionné précédemment. Cette étape est cruciale pour garantir une capture précise de la géométrie du coussinet. Une fois que le nuage de points est complet, il peut être utilisé pour créer une modélisation 3D détaillée du coussinet. Le résultat sera ensuite traité en utilisant le logiciel Geomagic.



Figure III.3: L'opération du scan . [6]

III.2.1.2.3 Résultats du scan

Après le scan, nous obtenons la conception du coussinet. Cependant, cette conception nécessite un traitement supplémentaire, car les photos ci-dessous révèlent des anomalies telles que des trous vides, des courbures irrégulières et des zones non détectées. Grâce à Geomagic Design X, nous pouvons corriger ces anomalies et obtenir la version finale du coussinet. Ce logiciel nous permet de transformer les données de numérisation en un modèle CAO précis et complet, éliminant les imperfections et assurant que toutes les caractéristiques du coussinet sont correctement représentées.

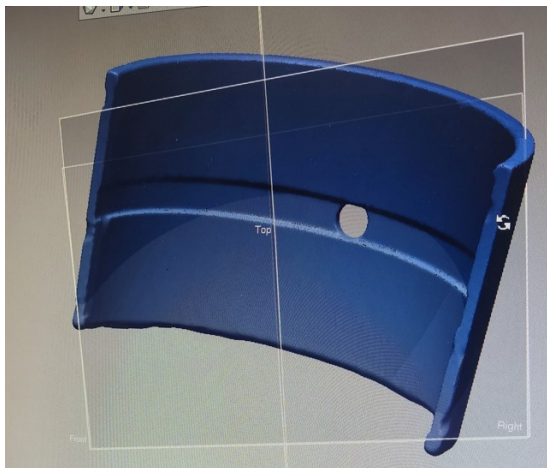


Figure III.4: l'intérieur du coussinet

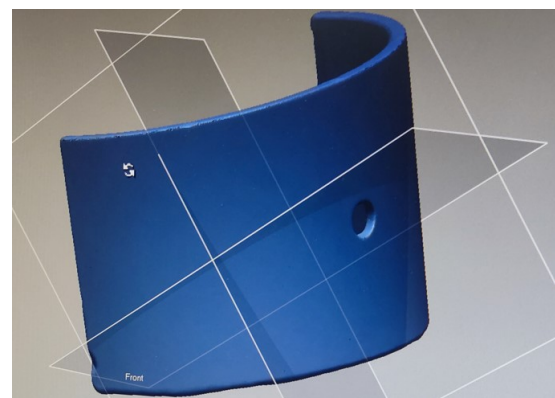


Figure III.5: l'extérieur du coussinet

III.2.1.2.4 Traitement par Geomagic

Après avoir effectué le scan, on obtient une représentation 3D de notre coussinet. Cependant, cette première version peut présenter certains problèmes, tels que des surfaces mal détectées,

des courbures anormales sur la surface, ou encore des petits détails non détectés. Ces imperfections sont courantes lors du processus de numérisation et peuvent affecter la précision du modèle 3D. Pour résoudre ces problèmes, nous utilisons le logiciel Geomagic, qui offre une suite d'outils avancés pour traiter et améliorer la qualité du modèle. Geomagic permet de corriger les surfaces mal détectées, de lisser les courbures, et d'ajouter les détails manquants, afin de produire une représentation 3D précise et fidèle du coussinet. Ce processus de post-traitement est essentiel pour garantir que le modèle final répond aux exigences de qualité et de précision nécessaires pour les étapes ultérieures de conception et d'analyse.

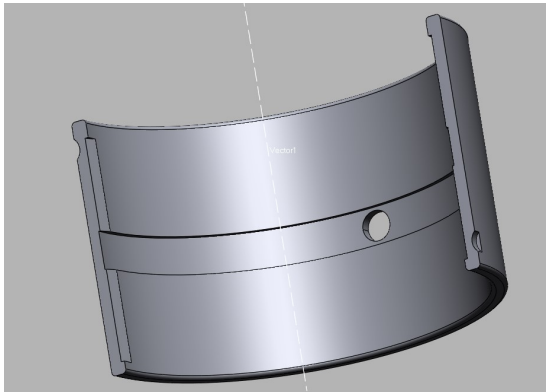


Figure III.6: conception finale



Figure III.7: résultat du traitement par geomagic

III.3 Choix du palier lisse

La procédure de calcul varie sensiblement d'une famille à l'autre et d'un fabricant à l'autre. Pour des choix précis il est nécessaire d'utiliser des documents constructeurs. Deux modes de calcul peuvent être suivis :

- Un calcul de durée de vie basé sur les dimensions acceptables de la bague,
- Un calcul des dimensions de la bague sur la base de la durée de vie demandée.

L'effort maximal pouvant être supporté par un palier peut être exprimé par les termes de pression spécifique limite p_{lim} , laquelle dépendra du type de charge. Elle est plus élevée dans le cas de charges statiques que pour des charges dynamiques ou mouvements oscillants, lesquels produisent des contraintes de fatigue dans le palier entraînant une réduction de la pression spécifique limite autorisée. La pression spécifique ne doit pas dépasser les limites de pression spécifique données par le fabricant.

III.3.1 Pression spécifique \bar{p}

La pression spécifique \bar{p} est obtenue en divisant la charge totale appliquée par la surface projetée du palier, exprimée en N/mm^2 . Notre coussinet est une bague cylindrique d'où :

$$\bar{p} = \frac{F}{D_i \cdot B} \quad (III.1)$$

III.3.2 Vitesse de glissement U

Elle correspond à la vitesse circonférentielle de l'arbre.

Cas d'une bague cylindrique

Pour un mouvement continu :

$$U = \frac{\pi \cdot D_i \cdot N}{60 \cdot 10^3} \quad (\text{III.2})$$

Pour un mouvement oscillant :

$$U = \frac{\pi \cdot D_i \cdot N}{60 \cdot 10^3} \cdot \frac{4 \cdot \phi \cdot N_{osz}}{360} \quad (\text{III.3})$$

III.3.3 Facteur $\bar{p}U$

La durée de vie normale d'un palier est fonction du facteur $\bar{p}U$, produit de la pression spécifique \bar{p} [N/mm²] par la vitesse de glissement U [m/s]. Ce facteur dépend du type de mouvement (continu ou intermittent) ainsi que du matériau constituant le palier.

$$\bar{p}U = \bar{p} \times U \quad (\text{III.4})$$

III.3.4 Coefficient correcteur

Les coefficients correcteurs suivants influenceront la performance du palier et doivent être considérés en calculant les dimensions acceptables ou en estimant la durée de vie pour une application spécifique.

III.3.4.1 Température

La durée de vie d'un palier dépend de la température. En fonctionnement à sec, une chaleur, due au frottement, est générée à la surface de glissement dépendant du facteur $\bar{p}U$. Pour un facteur $\bar{p}U$ spécifique, la température opérationnelle dépendra de la température ambiante et des capacités du logement de dissiper la chaleur. Un fonctionnement intermittent influencera la dissipation calorifique du logement et la température de la bague.

L'effet de la température sur la durée de vie des paliers est indiqué par le coefficient correcteur a_T . et est mentionné dans le tableau ci-dessous:

Conditions de fonctionnement	Nature du logement	Température d'environnement du palier T_{amb} [°C] et coefficient de température d'application a_T					
		25	60	100	150	200	280
Fonctionnement continu à sec	Qualités moyennes de dissipation calorifique	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1
Fonctionnement continu à sec	Logement embouti, ajouré ou isolé avec faibles qualités de dissipation calorifique	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	-
Fonctionnement continu à sec	Logement non métallique avec mauvaises qualités de dissipation calorifique	0,3	0,3	0,2	0,1	-	-
Fonctionnement intermittent à sec (durée moins de 2 min, suivie par une longue période de repos)	Qualités moyennes de dissipation calorifique	2,0	1,6	1,2	0,8	0,4	0,2
Continuellement immergé dans l'eau		2,0	1,5	0,6	-	-	-
Alternativement immergé dans l'eau et à sec		0,2	0,1	-	-	-	-
Continuellement immergé dans des liquides non lubrifiants autres que l'eau		1,5	1,2	0,9	0,6	0,3	0,1
Continuellement immergé dans les lubrifiants		3,0	2,5	2,0	1,5	-	-

Table III.1: le coefficient correcteur a_T [65]

III.3.4.2 Contre-matériau

Le choix du type de contre-matériau sur la durée de vie des paliers a un effet donné par le coefficient correcteur du contre-matériau a_M et le coefficient correcteur de durée de vie a_L .

Matériau	a_M	a_L	Matériau	a_M	a_L
Acier et fonte			Chrome dur	2,0	600
Acier au carbone	1	200	Plomb	1,5	600
Acier au manganèse	1	200	Nickel	0,2	600
Acier allié	1	200	Phosphatation	0,2	300
Acier cémenté	1	200	Etain Nickel	1,2	600
Acier nitruré	1	200	Nitruure de titane	1,0	600
Acier carbo-nitruré	1	200	Carbure de tungstène	3,0	600
Acier inoxydable (Ni 7-10 % Cr 17-20 %)	2	200	Zinc	0,2	600
Acier chromé	1	200	Métaux non ferreux		
Fonte (0,3 $\mu\text{m Ra}$)	1	200	Alliages aluminium	0,4	200
Acier revêtu d'une épaisseur minimale de revêtement de 0,013 mm			Bronze et alliage cuivreux	0,1-0,4	200
Cadmium	0,2	600	Aluminium anodisé dur (épaisseur 0,025 mm)	3,0	600

Table III.2: coefficients correcteurs a_L et a_M . [63]

III.3.4.3 Le coefficient de dimensions

Suite à un jeu plus important lorsque les dimensions des bagues augmentent, la surface de contact diminue proportionnellement. Cette réduction de surface de contact augmente la pression spécifique et le facteur pU . Le coefficient a_B de taille de la bague est utilisé pour tenir compte de cet effet.

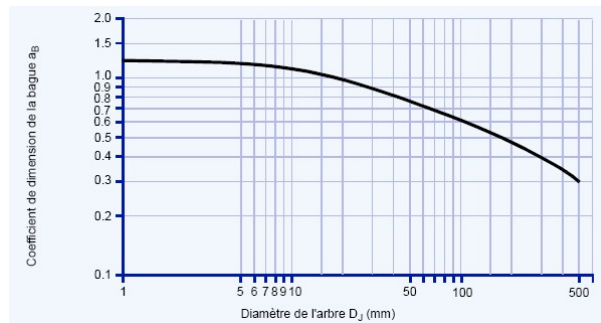


Figure III.8: coefficient de dimensions a_B . [63]

III.3.5 Dimensions du palier

Lors de l'étude des paliers, le diamètre d'arbre est habituellement défini par des considérations de stabilité physique ou de rigidité. La principale variable à déterminer est la longueur de la bague ou la largeur de la rondelle de butée. Les formules données ci-dessous permettent de calculer la longueur ou la largeur nécessaire pour satisfaire à la fois la limite de pression spécifique et le rapport pU /durée de vie. S'il est établi que la longueur excède deux fois le diamètre de l'arbre, ceci indique que les conditions de fonctionnement envisagées sont trop sévères pour le matériau et il faudra alors redimensionner le palier afin de réduire la pression spécifique.

Cas d'une bague fixe, arbre rotatif

$$B = \frac{F \cdot N \cdot (L_H + a_L)}{1.25 \cdot 10^7 \cdot a_T \cdot a_M \cdot a_B} + \frac{F}{p_{\text{lim}} \cdot D_i} \quad (\text{III.5})$$

Cas d'une bague rotative, arbre fixe

$$B = \frac{F \cdot N \cdot (L_H + a_L)}{2.5 \cdot 10^7 \cdot a_T \cdot a_M \cdot a_B} + \frac{F}{p_{\text{lim}} \cdot D_i} \quad (\text{III.6})$$

III.3.6 La durée de vie du palier

Quand les dimensions d'un palier sont déterminées par l'espace disponible, les calculs suivants peuvent être utilisés pour déterminer si la durée de vie sera satisfaisante. Si la durée de vie n'était pas suffisante, il faudrait redimensionner le palier.

Cas d'une bague (charge fixe)

$$L_H = \frac{6150}{pU} - a_L \quad (\text{III.7})$$

Cas d'une bague (charge rotative)

$$L_H = \frac{12300}{pU} - a_L \quad (\text{III.8})$$

III.3.7 Partie calcul

Calcul de la pression de contact

$$F = 500 \text{ N (donnée par le constructeur)}$$

$$D_i = 291 \text{ mm (mesurée)}$$

$$B = 190 \text{ mm (mesurée)}$$

$$P = \frac{F}{D_i \cdot B} = \frac{500}{291 \cdot 190} = 0.009 \text{ N/mm}^2 \approx 0.09 \text{ N/m}^2$$

La vitesse du glissement U

$$N = 368 \text{ tr/min (donnée par le constructeur)}$$

$$U = \frac{\pi \cdot D_i \cdot N}{60 \cdot 10^3} = \frac{\pi \cdot 291 \cdot 368}{60 \cdot 10^3} = 5.61 \text{ m/s}$$

Le facteur $P \cdot U$

$$P \cdot U = 0.09 \text{ N/m}^2 \times 5.61 \text{ m/s} = 0.5049 \text{ N/ms}$$

La durée de vie du coussinet

Notre matériau est un alliage d'aluminium donc $a_L = 200$.

$$L_H = \frac{12300}{pU} - a_L$$

$$L_H = \frac{12300}{0.5049} - 200 = 24400 \text{ heures}$$

III.4 Conclusion

En conclusion, la conception par rétro-ingénierie associée au calcul et au dimensionnement des paliers lisses représente une méthode essentielle pour optimiser les performances des systèmes mécaniques existants. Grâce à la rétro-ingénierie, il devient possible de comprendre en profondeur les composants et leurs interactions, permettant ainsi de reproduire ou d'améliorer les paliers lisses avec précision. Cette approche non seulement garantit des dimensions optimales et des choix de matériaux adaptés, mais elle contribue également à réduire l'usure, à améliorer la dissipation thermique et à prolonger la durée de vie des équipements. En définitive, l'application judicieuse de cette méthodologie intégrée renforce la fiabilité des machines tournantes, réduit les coûts de maintenance et accroît la productivité industrielle de manière significative.

Chapitre IV

Etude de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

IV.1 Introduction

Ce chapitre traite de trois paramètres essentiels pour l'évaluation de notre coussinet : la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité. La fiabilité mesure la probabilité que le coussinet fonctionne correctement sur une période donnée. La maintenabilité évalue la facilité et la rapidité avec lesquelles le coussinet peut être réparé ou maintenu en cas de défaillance. Enfin, la disponibilité combine les deux premiers paramètres pour donner une indication globale de la performance opérationnelle du coussinet. En calculant ces paramètres, nous pourrions mieux comprendre et caractériser les performances et les capacités du coussinet, ce qui est crucial pour assurer son bon fonctionnement dans les machines tournantes.

IV.2 La Fiabilité

Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné (NF EN 13306) ou « caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné » (NF X 60-500). La fiabilité est caractérisée par deux paramètres principaux : le taux de défaillance et le MTBF.

Taux de défaillance λ

Le taux de défaillance, noté $\lambda(t)$, est un indicateur de la fiabilité. Il représente une proportion de dispositifs survivants à un instant t .

$$\lambda = \frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{durée d'usage}}$$

MTBF (Mean Time Between Failures)

Le temps moyen entre pannes ou durée moyenne entre pannes, souvent désigné par son sigle anglais MTBF, est une des valeurs qui indiquent la fiabilité d'un composant, d'un

produit ou d'un système. C'est la moyenne arithmétique du temps de fonctionnement. On distingue deux types d'analyses de fiabilité :

- **Cas 1** : le taux d'usure est constant (époque de maturité), on utilise la loi exponentielle.
- **Cas 2** : le taux d'usure est variable (jeunesse ou vieillesse), on utilise la loi de Weibull.

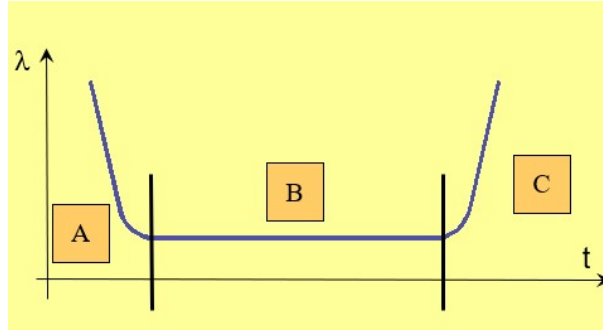


Figure IV.1: le taux de défaillance au fil du temps [65]

- **Zone A** : période de jeunesse.
- **Zone B** : période de maturité.
- **Zone C** : période de vieillesse. [25]

IV.2.1 Analyse de la Fiabilité par la Loi Exponentielle

Durant la période de maturité d'un équipement, $\lambda(t)$ est constant ou sensiblement constant (période de maturité). C'est le champ d'application de la loi exponentielle qui repose sur l'hypothèse $\lambda = \text{constante}$. Les défaillances émergent sous l'action de causes diverses et indépendantes. Dans ce cas :

La loi de fiabilité

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{IV.1}$$

Le MTBF

$$\text{MTBF} = \frac{\text{temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre de périodes de bon fonctionnement}} = \frac{1}{\lambda} \tag{IV.2}$$

Durée de vie associée à un seuil de fiabilité

Il est intéressant de savoir à quel instant la fiabilité atteindra un seuil déterminé.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln R(t) = -\lambda t \Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{R(t)} \tag{IV.3}$$

Densité de probabilité

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (\text{IV.4})$$

Fonction de répartition

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (\text{IV.5})$$

Espérance mathématique

$$E(t) = \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{IV.6})$$

Analyse de la Fiabilité par la Loi de Weibull

IV.2.2 Définition de la loi de Weibull

Cette loi est utilisée lorsque le système que l'on étudie vieillit et que le taux de panne augmente au cours du temps. C'est une loi de fiabilité à 3 paramètres qui permet de prendre en compte les périodes où le taux de défaillance n'est pas constant (jeunesse et vieillesse) [25].

La loi de fiabilité

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{IV.7})$$

- β : paramètre de forme > 0 sans dimension.
 - Si $\beta > 1$, le taux de défaillance est croissant, caractéristique de la zone de vieillesse.
 - $1.5 < \beta < 2.5$: fatigue.
 - $3 < \beta < 4$: usure, corrosion.
 - Si $\beta < 1$, le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse.
- γ : paramètre de position $-\infty < \gamma < +\infty$, qui s'exprime dans l'unité de temps.
 - $\gamma > 0$: survie totale sur l'intervalle de temps $[0, \gamma]$.
 - $\gamma = 0$: les défaillances débutent à l'origine des temps.
 - $\gamma < 0$: les défaillances ont débuté avant l'origine des temps.
- η : paramètre d'échelle > 0 qui s'exprime dans l'unité de temps.

Le MTBF

$$\text{MTBF} = A \cdot \eta + \gamma \quad (\text{IV.8})$$

L'écart type

$$\sigma = B \cdot \eta \tag{IV.9}$$

Les paramètres A et B dépendent de β et sont déterminés à l'aide du tableau suivant:

β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,20	120	1901	1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
0,25	24	199	1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
0,30	9,2605	50,08	1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
0,35	5,0291	19,98	1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,40	3,3234	10,44	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,235
0,45	2,4786	6,46	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,50	2	4,47	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,55	1,7024	3,35	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,60	1,5046	2,65	1,90	0,8874	0,486	4,8	0,9160	0,218
0,65	1,3663	2,18	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,70	1,2638	1,85	2	0,8862	0,463	5	0,9182	0,210
0,75	1,1906	1,61	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,80	1,1330	1,43	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,85	1,0880	1,29	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,90	1,0522	1,17	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,95	1,0234	1,08	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
1	1	1	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
1,05	0,9603	0,934	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,188
1,10	0,9649	0,878	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
1,15	0,9517	0,830	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1,20	0,9407	0,787	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,25	0,9314	0,750	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,30	0,9236	0,716	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,35	0,9170	0,687	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,40	0,9114	0,660	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,170
1,45	0,9067	0,635	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,168
			3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
			3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
			3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,161
			3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,160

Table IV.1: table des paramètres A et B . [65]

Densité de probabilité

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{IV.10}$$

Fonction de répartition

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \tag{IV.11}$$

Le taux de défaillance

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \tag{IV.12}$$

IV.3 Maintenabilité

IV.3.1 Définition

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. La maintenabilité peut se caractériser par son MTTR (Mean Time To Repair) ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation [ref25].

MTTR

$$\text{MTTR} = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{nombre de pannes}} \quad (\text{IV.13})$$

Le taux de réparation

Le taux de réparation, noté $\mu(t)$, est un indicateur de la maintenabilité. Il est égal à l'unité de temps sur la MTTR :

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (\text{IV.14})$$

IV.3.2 Approches de la maintenabilité

L'hypothèse exponentielle : L'hypothèse exponentielle signifie que le taux de réparation est supposé constant. La répartition des TTR est alors exponentielle. Dans ce cas la loi de maintenabilité est :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (\text{IV.15})$$

Si μ est variable :

$$M(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m}{\sigma}\right)^2} dt \quad (\text{IV.16})$$

Le calcul se fait en passant par la variable centrée réduite où m est la moyenne des $\ln(t)$ et σ l'écart type des $\ln(t)$.

IV.4 La Disponibilité

IV.4.1 Définition

Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée. Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance. Les moyens extérieurs nécessaires autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien (NF EN 13306) [25].

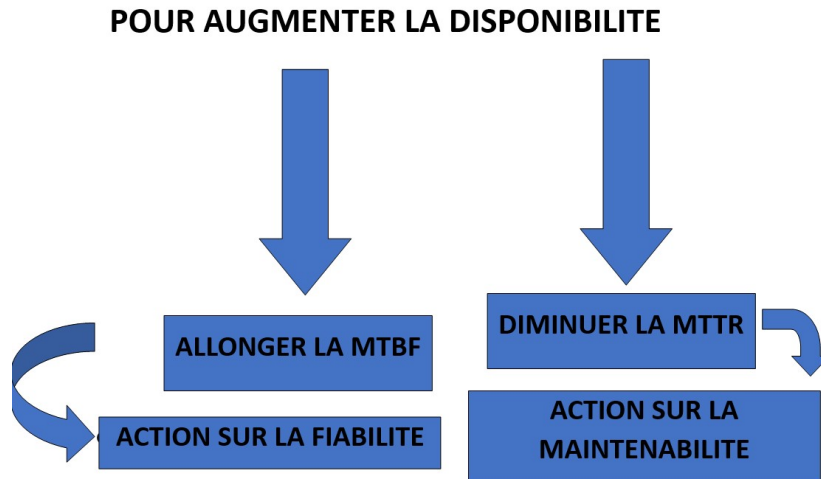


Figure IV.2: schéma de la disponibilité

Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut être évaluée par le rapport :

$$\frac{\text{temps de disponibilité}}{\text{temps de disponibilité} + \text{temps d'indisponibilité}} \quad (\text{IV.17})$$

En l'exprimant par rapport à des temps moyens, la disponibilité moyenne s'écrit :

$$\frac{\text{temps moyen de disponibilité}}{\text{temps moyen de disponibilité} + \text{temps moyen d'indisponibilité}} = \frac{\text{TMD}}{\text{TMD} + \text{TMI}} \quad (\text{IV.18})$$

Disponibilité intrinsèque D_i

Elle exprime le point de vue du concepteur. Ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui donnant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées idéales.

Le calcul de la disponibilité intrinsèque D_i fait appel à 3 paramètres :

- TBF : temps de bon fonctionnement
- TTR : temps techniques de réparation
- TTE : temps techniques d'exploitation

$$D_i = \frac{\text{TBF}}{\text{TBF} + \text{TTR} + \text{TTE}} \quad (\text{IV.19})$$

Disponibilité opérationnelle D_o

Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur. Le calcul de D_o fait appel aux

mêmes paramètres sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historique d'exploitation) [ref25].

$$D_o = \frac{\text{TBF}}{\text{TBF} + \text{TTR} + \text{TTE}} \quad (\text{IV.20})$$

En l'exprimant par rapport à des temps moyens :

$$D_o = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR} + \text{MTTE}} \quad (\text{IV.21})$$

IV.4.2 Cas pratique

Voici un tableau regroupant l'historique de travail du coussinet. Il inclut le TBF (temps de bon fonctionnement) ainsi que le TTR (temps de réparation). Ce tableau a été construit à partir du fichier Excel fourni par l'entreprise Sonatrach. Il couvre l'historique de travail du coussinet sur une période de trois ans, du 23/08/2017 au 01/09/2020.

Rang de la panne	TBF (heures)	TTR (heures)
1	2635.54	120
2	189.26	48
3	1557.95	48
4	100.17	72
5	313.56	648
6	533.13	264
7	419.25	240
8	8.76	1248
9	201.42	1896
10	2.44	24
11	135.27	24
12	1654.05	2256
13	460.79	72
14	10.22	288
15	25.13	24
16	343.42	96
17	1605.97	120
18	1176.74	312
19	1217.64	72
20	21.9	96
21	335.49	1824
22	3.92	96

Table IV.2: Historique du coussinet

Pour calculer la fiabilité, nous allons utiliser l'approche de Weibull car le taux de défaillance du coussinet n'est pas constant.

- **Le papier de Weibull** C'est un papier log/log qui comporte 4 axes :

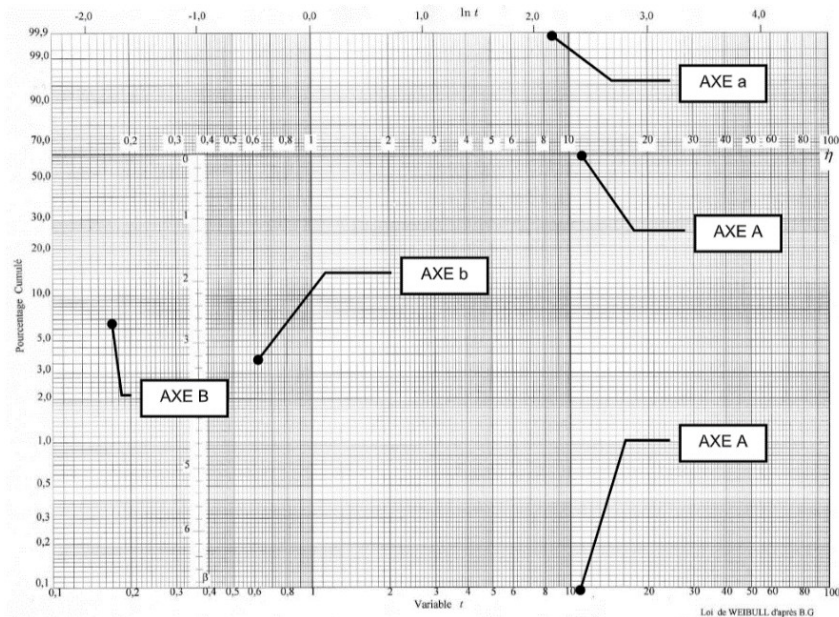


Figure IV.3: papier de weibull [65]

- **Axe A** : axe des temps sur lequel on porte les valeurs t_i des TBF.
- **Axe B** : valeurs des probabilités de défaillance F_i calculées par la méthode des rangs moyens ou des rangs médians. On estime $R(t)$ par $R(t) = 1 - F(t)$.
- **Axe a** : axe des temps en logarithmes népériens : $\ln(t)$.
- **Axe b** : axe qui permet l'évaluation de β .

Le papier de Weibull est utilisé pour mettre le nuage de points et puis tracer la droite de Weibull $F(t)$ en fonction des TBF (Time Between Failures) qui passe par le maximum des points de nuage, afin de déterminer les paramètres de la loi et formuler l'équation correspondante de la loi de Weibull.

IV.5 Calcul de Fiabilité, Maintenabilité et Disponibilité

IV.5.1 Calcul de Fiabilité

La loi de fiabilité

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Nous devons maintenant déterminer les paramètres β , η et γ . Pour ce faire, nous devons d'abord ordonner le tableau et calculer les F_i (probabilité de défaillance) afin de tracer le nuage de points des couples $(F_i, t(i))$. Cela nous permettra ensuite de déterminer les trois paramètres.

Pour le calcul des F_i , il existe 3 méthodes : On remarque que le nombre d'échantillons (22 échantillons) est compris entre 20 et 50. Par conséquent, nous utiliserons la méthode des rangs moyens pour calculer les F_i .

$$F_i = \frac{i}{N+1} \quad (\text{IV.23})$$

Nbr de données N	20	50
Prise en charge des données	Données t_i classées par ordre croissant (un rang i est affecté à chaque données)	
Estimation de F_t	$\frac{i - 0,3}{N + 0,4}$ méthode des rangs médians	$\frac{i}{N + 1}$ méthode des rangs moyens
		Données rangées par classe t_i $\frac{\sum n_i}{N}$ n_i : effectif de la classe i

Table IV.3: méthodes pour le calcul des F_i .

IV.5.1.1 Préparation des données

Voici le tableau ordonné, qui inclut également les valeurs de F_i calculées à l'aide de MATLAB.

Code Matlab :

```
N=22
% calcul des Fi
for i = 1:22
    Fi = i/(N+1);
    disp(Fi)
end
```

Rang de la panne	TBF (heures)	F_i
1	2.44	0.0435
2	3.92	0.0870
3	8.76	0.1304
4	10.22	0.1739
5	21.9	0.2174
6	25.13	0.2609
7	100.17	0.3043
8	135.27	0.3478
9	189.26	0.3913
10	201.42	0.4348
11	313.56	0.4783
12	335.49	0.5217
13	343.42	0.5652
14	419.25	0.6087
15	460.79	0.6522
16	533.13	0.6957
17	1176.74	0.7391
18	1217.64	0.7826
19	1557.95	0.8261
20	1605.97	0.8696
21	1654.05	0.9130
22	2635.54	0.9565

Table IV.4: Tableau ordonné

IV.5.1.2 Tracé de nuage de points et de la droite de Weibull

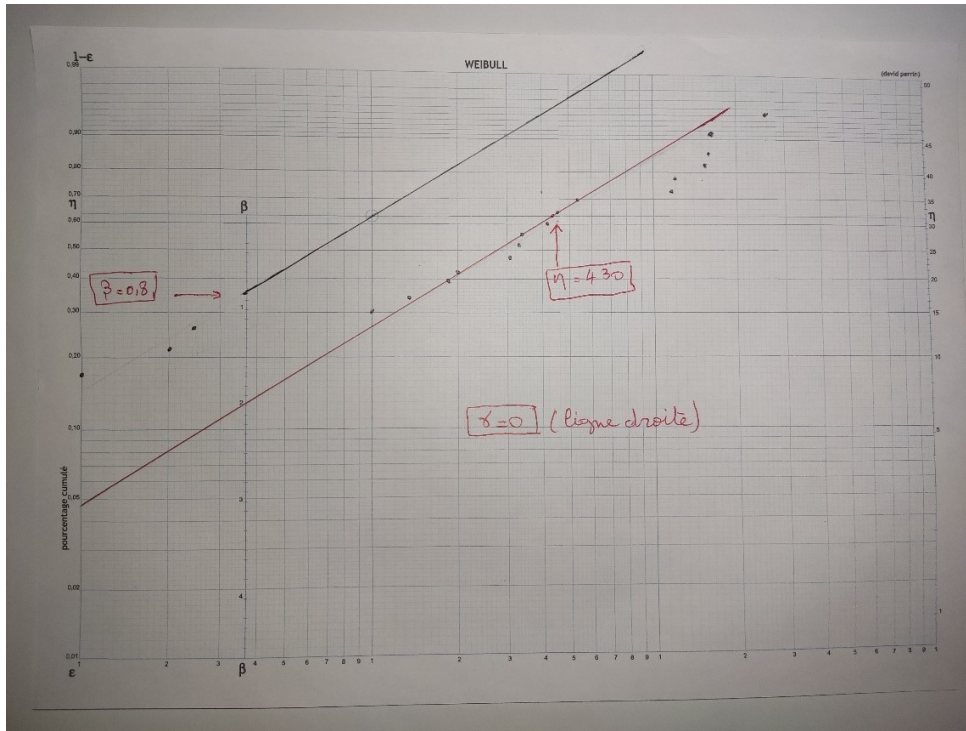


Figure IV.4: droite de Weibull

IV.5.1.3 Détermination de β , η , γ

- $\gamma = 0$ car nous avons une droite.
- La droite en noir, parallèle à la droite en rouge, passant par l'origine coupe l'axe β en un point $\beta = 0.8$. C'est la valeur du paramètre de forme.
- La droite en rouge coupe l'axe des temps à $\eta = 430$ heures. C'est le paramètre de la loi de Weibull.

Remarque :

- $\beta = 0.8$ signifie que le taux de défaillance est décroissant, caractéristique de la zone de jeunesse.
- $\gamma = 0$: les défaillances débutent à l'origine des temps.

IV.5.1.4 Calcul du MTBF

Pour calculer le MTBF, il suffit de calculer la moyenne des TBF du tableau :

$$MTBF = \frac{2.44 + 3.92 + 8.76 + 10.22 + 21.9 + 25.13 + 100.17 + 135.27 + 189.26 + 201.42 + 313.56 + 335.17}{12}$$

IV.5.1.5 Indice sur le MTBF par la loi de Weibull

Les tables de Figure IV.2 donnent les valeurs de A et B pour $\beta = 0.8$: $A = 1.133$ et $B = 1.43$.

$$\text{MTBF} = A \cdot \eta + \gamma = 1.133 \cdot 430 = 487.19 \text{ heures}$$

Et

$$\sigma = B \cdot \eta = 1.43 \cdot 430 = 614.9 \text{ heures}$$

IV.5.1.6 Dédution de la fiabilité

L'équation de la loi :

$$R(t) = e^{-(t/430)^{0.8}}$$

Pour calculer la fiabilité, on doit calculer $R(t)$ pour chaque valeur de TBF, puis faire la moyenne des $R(t)$. Pour cela, j'ai utilisé MATLAB. Voici les résultats de calcul :

```
>> trsf
Les valeurs de R(t) sont:
Columns 1 through 15
    0.9842    0.9769    0.9566    0.9510    0.9118    0.9020    0.7322    0.6727    0.5953    0.5798    0.4599    0.4405    0.4337    0.3753    0.3475
Columns 16 through 22
    0.3049    0.1067    0.1003    0.0608    0.0567    0.0530    0.0141
La fiabilité est : 50.07%
```

Figure IV.5: résultats [6]

Ainsi, la fiabilité = 50.07%.

IV.5.1.7 Calcul du taux de défaillance

$$\lambda = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{0.8}{430} \left(\frac{t}{430} \right)^{-0.2}$$

Pour le t , on le remplace par le MTBF :

$$\lambda = 0.0017$$

IV.5.1.7.1 Calcul du MTTR et le taux de réparation du coussinet

$$\text{MTTR} = \frac{\sum \text{temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombres de pannes}}$$

Et le taux de réparation :

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

Application numérique :

$$\text{MTTR} = \frac{120 + 48 + 48 + 72 + 648 + 264 + 240 + 1248 + 1896 + 24 + 24 + 2256 + 72 + 288 + 24 + 96}{22}$$

Le taux de réparation :

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} = \frac{1}{441.27} = 0.00226$$

Calcul de la disponibilité basée sur la fiabilité

On doit calculer le D_o (disponibilité opérationnelle) car le MTBF et le MTTR sont plus basés sur les conditions réelles (historique d'exploitation).

$$D_o = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

On sait que le

$$\text{MTBF} = 588.73 \text{ h}$$

Le

$$\text{MTTR} = 441.27 \text{ h}$$

Donc

$$D_o = \frac{588.73}{588.73 + 441.27} = 0.571$$

Ainsi,

$$D_o = 57.1\%$$

IV.6 Conclusion

Les évaluations de fiabilité, maintenabilité et disponibilité du coussinet révèlent des performances variées. Avec une fiabilité de 50%, le coussinet démontre une probabilité moyenne de fonctionner correctement sur une période donnée. Une disponibilité de 57.1% combine ces aspects pour fournir une indication globale de la capacité opérationnelle du coussinet. Ces résultats soulignent l'importance d'optimiser la fiabilité pour améliorer la disponibilité du coussinet dans les applications de machines tournantes.

Chapitre V

Contrôles non destructifs et analyse de la matière

V.1 Introduction

L'analyse de la matière et les contrôles non destructifs (CND) sont des éléments cruciaux dans l'évaluation et l'assurance de la qualité des matériaux utilisés dans diverses industries. L'analyse de la matière permet de déterminer la composition chimique et les propriétés physiques des matériaux, garantissant qu'ils répondent aux spécifications requises. Les contrôles non destructifs, quant à eux, englobent une série de techniques permettant d'inspecter et d'évaluer l'intégrité des matériaux et des structures sans les endommager. Ces techniques, telles que la radiographie, l'ultrason et la magnétoscopie, jouent un rôle vital dans la détection précoce des défauts, la prévention des défaillances et la prolongation de la durée de vie des composants. En intégrant ces approches, les industries peuvent assurer la sécurité, la fiabilité et la performance optimale de leurs produits tout en minimisant les coûts liés aux réparations et aux remplacements.

V.2 Le contrôle non-destructif (CND)

Le Contrôle Non Destructif (CND), appelé également Essais Non Destructifs ou Évaluation Non Destructive, est une discipline regroupant des procédés et techniques qui permettent de mesurer et d'assurer la conformité et l'intégrité d'un matériau ou d'une pièce sans avoir à la détruire ou à l'altérer. Le contrôle non destructif peut même aller jusqu'à éviter un démontage ou un déplacement de pièce. L'utilisation des techniques de mesures sans destruction est primordiale pour l'industrie. En effet, les techniques de CND sont très importantes pour une entreprise car elles permettent de faire beaucoup d'économies en ne détruisant pas des pièces qui peuvent parfois être très coûteuses. Il existe aujourd'hui plusieurs techniques très populaires d'évaluation non destructive. L'industrie de la métrologie et du contrôle qualité perfectionne ces technologies d'année en année et leur permettent de remplacer de plus en plus le contrôle destructif, encore trop présent dans l'industrie. [26]

Il existe plusieurs techniques de CND, on distingue :

V.2.1 Le contrôle visuel

V.2.1.1 Principe du contrôle visuel

Ce type de contrôle non destructif se met en œuvre avant toute autre technique CND. Son mode opératoire est établi en référence à la norme de principe général de la méthode : NF EN 13018/A1. Cette technique de contrôle est effectuée à l'œil nu et permet de déceler toute anomalie de surface. Elle peut être classée dans la famille des contrôles CND. Toutefois, ce contrôle est le seul qui ne fasse pas appel à une technique particulière. Il est basé sur l'observation : il convient donc de définir des conditions d'observations et de les optimiser. [27]

V.2.1.1.1 L'application du contrôle visuel sur le palier

i. Nettoyage de la pièce : Avant de commencer l'opération de contrôle visuel, il est essentiel de nettoyer la pièce afin de garantir une clarté et une visibilité optimales pour l'analyse de la surface. Ce nettoyage minutieux permet d'éliminer toutes les impuretés, les saletés et les résidus qui pourraient obstruer la vue et compromettre l'intégrité de l'inspection. Utiliser des solvants appropriés ou des nettoyeurs spécifiques assure que chaque recoin de la pièce est dépourvu de contaminants. Cette étape préliminaire est cruciale, car une surface propre permet de détecter avec précision les éventuelles anomalies ou défauts, assurant ainsi la fiabilité du contrôle visuel. Un nettoyage bien effectué facilite le travail des inspecteurs et améliore la qualité des résultats obtenus lors de l'évaluation finale.

ii. L'opération du contrôle visuel : On place la pièce dans un endroit bien éclairé afin d'assurer une clarté optimale pour l'inspection. Une fois la pièce correctement positionnée sous la lumière, on procède à la détection des défauts, des anomalies et des signes d'usure sur la surface. La lumière adéquate permet de mettre en évidence même les plus petites imperfections, garantissant une inspection minutieuse et précise. Cette étape est essentielle pour identifier tout problème potentiel qui pourrait affecter la performance ou la sécurité de la pièce. En détectant ces défauts à un stade précoce, on peut prendre les mesures correctives nécessaires pour assurer la qualité et la fiabilité de la pièce dans son application finale.



Figure V.1: début de l'opération

iii. Résultats de l'opération : Voici des photos illustrant des zones présentant des anomalies sur les surfaces, résultant de l'usure :



Figure V.2: La présence de rayures sur la surface.



Figure V.3: l'usure sur la surface



Figure V.4: Des traces causées par l'usure

V.2.2 Le ressuage

V.2.2.1 Principe

Le ressuage est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération de pénétration. Prolongement logique de l'examen visuel, cette méthode permet donc de détecter les discontinuités débouchant à la surface de la pièce contrôlée sous forme d'indications colorées ou fluorescentes, observées respectivement sur un fond blanc ou sur un fond noir. Le ressuage comporte quatre phases dont la première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré et/ou fluorescent, appelé "pénétrant", est ensuite appliqué sur la surface à contrôler au cours de la deuxième phase. Il pénètre par capillarité à l'intérieur des discontinuités (fissures de corrosion, porosités, piqûres, retassures, gouttes froides, lignes, replis, dédoubleurs, criques de rectification, tapures de traitement thermique, micro-amorces de rupture, etc.), nécessitant une durée de pénétration avant l'étape suivante. Durant la troisième phase, l'excès de pénétrant en surface est éliminé. La surface peut alors être recouverte d'une couche mince de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu

dans les discontinuités, pendant cette quatrième phase, le révélateur fait « ressuer » le pénétrant, à la suite de quoi les indications de discontinuités apparaissent en surface. L'observation des indications s'effectue, selon le type de pénétrant utilisé, soit sous lumière blanche artificielle (ou à la lumière du jour) soit sous rayonnement ultraviolet (UV-A) [25].

V.2.2.2 L'application du ressuage sur le coussinet

Voici un organigramme qui présente les étapes suivies pour effectuer l'opération de ressuage du coussinet :

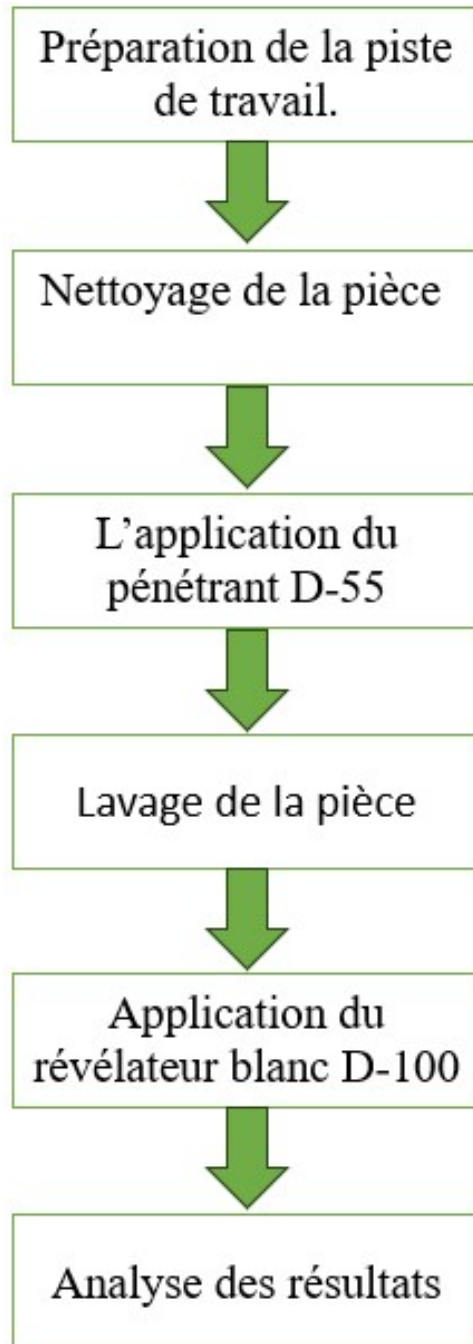


Figure V.5: Les étapes de ressuage

Le ressuage a été réalisé au niveau du laboratoire du département de QHSE.

V.2.2.2.1 Les équipements utilisés

Le dégraissant : Le dégraissant a été spécialement conçu pour le nettoyage des pièces avant contrôle par ressuage. C'est un nettoyant compatible avec les produits de ressuage. Le dégraissant peut remplacer les solvants chlorés en phase vapeur pour préparer les pièces juste avant ressuage.



Figure V.6: Le dégraissant

Le Révélateur blanc D-100 : Révélateur blanc à support organique, utilisé pour la révélation des défauts et l'amplification des indications données par les pénétrants rouges ou fluorescents, dans la gamme de température dite normale (+10°C à +50°C selon ISO 3452).



Figure V.7: Le Révélateur blanc D-100

Le pénétrant DP-55 : Le DP-55 est un pénétrant rouge, type 2, Méthodes A et C, Niveau 2 selon AMS 2644 et ISO 3452-2. - Lavable à l'eau. - Résistance au sur lavage. - Exempt de colorant diazoïque (Azo III A 2 amine) et de rhodamine. Utilisation : - destiné à la recherche de défauts de surface, dans la gamme de température dite normale (+10°C à +50°C selon ISO 3452-2).



Figure V.8: Pénétrant DP-55

V.2.2.2.2 L'application de l'opération

i. Etape 1 : la préparation de la piste de travail : On commence par nettoyer soigneusement la surface de travail pour assurer le succès du test. On prépare ensuite les équipements nécessaires : dégraissant, révélateur blanc et pénétrant. Avant de débiter l'opération, on enfile des gants de protection, des lunettes et un tablier pour garantir la sécurité.



Figure V.9: Espace de travail

ii. Etape 2 : Nettoyage de la pièce : On commence tout d'abord par nettoyer soigneusement la pièce en utilisant le dégraissant. Cette étape est cruciale pour éliminer toute trace de graisse, d'huile ou de saleté qui pourrait interférer avec l'opération de ressuage. On applique le dégraissant uniformément sur la surface de la pièce, puis on frotte avec un chiffon propre ou une brosse pour détacher les contaminants. Ensuite, on rince la pièce à l'eau claire et on la sèche complètement. Ce nettoyage en profondeur garantit que la surface est parfaitement propre, permettant ainsi au pénétrant de pénétrer efficacement dans les défauts et assurant la précision du test de ressuage.



Figure V.10: Nettoyage de la pièce

iii. Etape 3 : L'application du pénétrant D-55 : Pour l'application du pénétrant D-55, on commence par secouer vigoureusement le contenant pour bien mélanger le produit. Ensuite, on applique le pénétrant sur toute la surface de la pièce, en s'assurant qu'il couvre uniformément chaque zone. On prend soin de ne pas oublier les zones difficiles d'accès ou les petites fissures, car une application incomplète pourrait entraîner la non-détection de certains défauts. On utilise un pinceau, un spray ou un autre applicateur approprié pour étendre le pénétrant de manière homogène. Une fois le produit appliqué, on laisse la pièce reposer pendant un temps de pénétration suffisant, généralement indiqué par le fabricant, pour permettre au produit de pénétrer profondément dans tous les défauts de surface. Enfin, on laisse la pièce sécher complètement avant de procéder à l'opération suivante, ce qui garantit que le pénétrant a bien agi et que les défauts seront clairement visibles lors de l'inspection.



Figure V.11: Application du pénétrant D-55

iv. Etape 4 : Lavage de la pièce : Après que la pièce a séché, on procède au lavage pour éliminer tout excès de pénétrant visible à la surface. Ce lavage est crucial pour préparer la pièce à l'application du révélateur blanc. On utilise un solvant ou un nettoyant spécifique pour enlever soigneusement le pénétrant restant tout en évitant de réintroduire des contaminants. Cette étape assure que la surface est parfaitement propre et prête pour la prochaine phase du processus. Le soin apporté à cette opération garantit la précision des résultats lors de l'inspection finale. Une fois le lavage terminé, la pièce est soigneusement examinée pour s'assurer qu'il ne reste aucun résidu de pénétrant.



Figure V.12: Lavage de la pièce

v. Etape 5 : Application du révélateur blanc D-100 : Une fois la pièce propre et sèche, on applique le révélateur blanc de manière uniforme sur toute la surface inspectée. Le révélateur blanc est généralement appliqué sous forme de poudre ou d'aérosol, créant une fine couche qui absorbe le pénétrant restant dans les défauts de surface. Cette étape est essentielle car le révélateur blanc maximise le contraste visuel, permettant ainsi de mettre en évidence clairement les indications de défauts lors de l'inspection ultérieure.



Figure V.13: Application du révélateur blanc D-100

vi. Etape 6 : Analyse des résultats : Après avoir appliqué le révélateur blanc, la pièce est laissée pendant quelques heures pour permettre au révélateur de révéler clairement les indications de défauts. Après ce temps d'attente, on observe l'apparition du pénétrant D-55 dans les zones usées. Les indications visibles comprennent principalement des points rouges, qui indiquent des piqures sur la surface, des traits rouges, révélant une usure due au frottement, et des zones rouges, qui signalent une usure générale de la surface. Ces marques rouges sont cruciales pour évaluer l'étendue et la nature des défauts présents, fournissant ainsi des informations précieuses pour la maintenance et la réparation des pièces mécaniques.

V.2.2.3 Résultats de l'opération

D'après la figure ci-dessous, on observe des taches en couleur rouge, ce qui signifie la présence d'usure superficielle, qui est l'enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

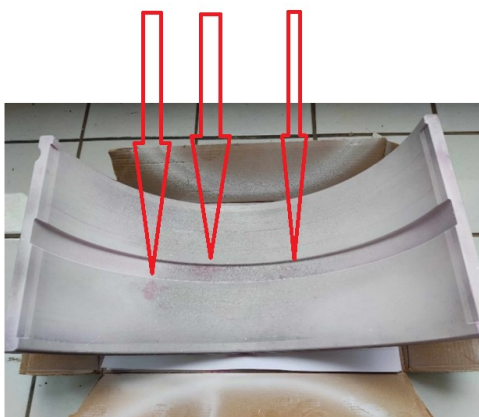


Figure V.14: résultats de l'opération



Figure V.15: la couleur rouge montre les défauts causés par l'usure

V.2.3 Contrôle par ultrason

V.2.3.1 Principe de fonctionnement général

Le contrôle par ultrasons consiste à émettre une onde ultrasonore dans la pièce à inspecter et à analyser l'onde après interaction avec le matériau. Les techniques varient selon qu'elles utilisent la transmission ou la réflexion, le type et l'inclinaison des ondes, et la configuration des dispositifs émetteurs et récepteurs. La méthode la plus courante, en réflexion (ou "pulse echo"), est similaire à l'échographie médicale, où l'émetteur et le récepteur sont du même côté de la pièce. Les échos réfléchis par les défauts ou interfaces sont recueillis par le récepteur. Les transducteurs ultrasonores, basés sur l'effet piézo-électrique, convertissent un signal électrique en vibration mécanique et vice-versa. Les techniques multiéléments utilisent des réseaux de transducteurs pilotés électroniquement, permettant de focaliser ou incliner l'onde en adaptant les retards électroniques appliqués. La fréquence des ondes, variant de 100 kHz à 20 MHz, est choisie en fonction des matériaux et applications, équilibrant résolution spatiale et pouvoir de pénétration. Typiquement, le contrôle d'une pièce en acier utilise des fréquences de 1 à 5 MHz [28].



Figure V.16: appareil de control par ultrason. [64]

V.2.3.2 Mode d'examen

En mode réflexion, l'inspection se fait en déplaçant un transducteur ultrasonore sur la surface de la pièce pour collecter et analyser les signaux reçus. On distingue les contrôles au contact (avec un couplant) et en immersion (dans un liquide comme l'eau), ainsi que les contrôles manuels et automatisés. Le choix du transducteur, de sa fréquence, et des réglages spécifiques influence les caractéristiques du faisceau ultrasonore, déterminant la sensibilité et la résolution du contrôle. La modélisation est utilisée pour estimer ces caractéristiques. Le diagnostic repose sur l'analyse des signaux reçus, où la présence d'un défaut est indiquée par des échos réfléchis. Le temps de vol et l'amplitude des échos fournissent des informations sur la localisation et la détection des défauts. Le contrôle inclut une phase de calibration avec des réflecteurs de référence pour définir les seuils de détection [28].

V.2.3.3 Domaines d'application

Les ultrasons sont largement utilisés dans les méthodes de contrôle non destructif (CND) pour divers matériaux et géométries, détectant des défauts comme fissures, inclusions et porosités. Les applications incluent le contrôle des soudures, des matériaux composites pour l'aéronautique, et la recherche de fissures dans les matériaux métalliques. Outre la détection de défauts, les ultrasons servent à l'analyse dimensionnelle (mesure d'épaisseur), au tri et à la caractérisation des matériaux (identification de nuances d'acier), et à la caractérisation de traitements de surface (comme les traitements thermiques) [29].



Figure V.17: Exemple d'application . [65]

Remarque

Malheureusement, l'opération de contrôle par ultrason n'a pas été effectuée en raison d'un manque de personnel qualifié pour maîtriser la machine.

V.3 Analyse de la matière

V.3.1 Mesure de rugosité

V.3.1.1 Les rugosimètres

Les rugosimètres sont des instruments qui mesurent le caractère lisse (niveau de rugosité) de la surface d'une cible. Les principaux types de rugosimètres exploitent une sonde ou un laser. Les modèles classiques utilisaient une pointe diamant mais ils endommageaient fréquemment les semi-conducteurs et autres objets lors de la mesure et ont donc laissé place à des versions optiques. Certains modèles peuvent mesurer des surfaces planes et courbes. Récemment, des modèles capables d'afficher une modélisation 3D de la forme à partir des données mesurées ont vu le jour. Les rugosimètres sont principalement employés

pour contrôler le niveau d'usure de surfaces métalliques, l'état de surfaces usinées et le fini de surfaces peintes. Les mesures de rugosité ont été effectuées sur les surfaces usées. Trois mesures ont été réalisées pour chacune de ces surfaces, et le résultat final correspond à la moyenne des trois essais. Remarque : la valeur R_a indique la rugosité moyenne de la surface pour la longueur de la mesure effectuée, c'est-à-dire, l'écart moyen entre les pics et les creux. R_z est la distance moyenne entre les pics les plus hauts et les vallées les plus basses. La mesure de la rugosité a été réalisée au niveau du laboratoire métrologie du département de génie mécanique.

Surface 1

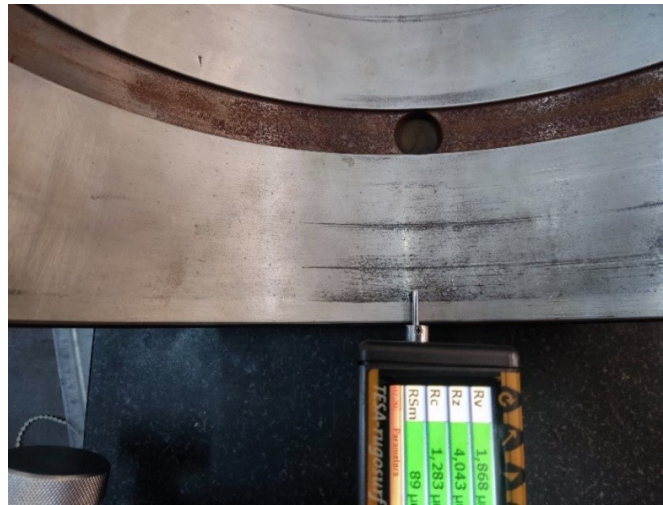
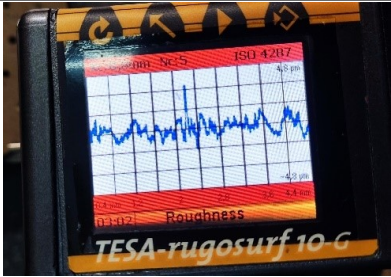

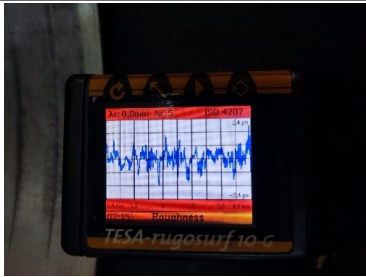


Figure V.18: mesure de rugosité

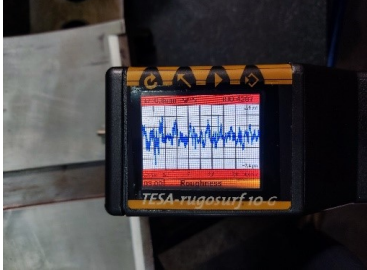
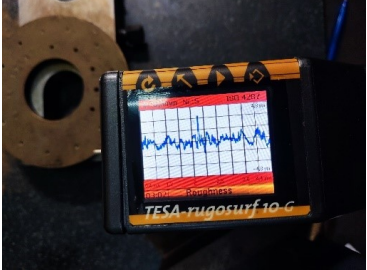
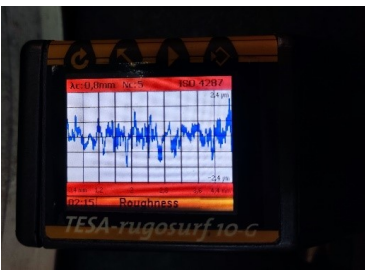
Test 1	Test 2	Test 3
$R_a = 0.352 \mu m$	$R_a = 0.368 \mu m$	$R_a = 0.454 \mu m$
$R_z = 2.387 \mu m$	$R_z = 2.454 \mu m$	$R_z = 2.832 \mu m$
		

La moyenne des trois résultats donne :

$$R_a = 1.391 \mu m$$

$$R_z = 2.557 \mu m$$

Surface 2

Test 1	Test 2	Test 3
$R_a = 1.474 \mu m$ $R_z = 5.688 \mu m$	$R_a = 1.470 \mu m$ $R_z = 8.289 \mu m$	$R_a = 1.282 \mu m$ $R_z = 4.614 \mu m$
		

La moyenne des trois résultats donne :

$$R_a = 1.108 \mu m$$

$$R_z = 6.197 \mu m$$

Comparaison

R_a (réf) selon la norme ISO (μm)	R_a (Surface 1) (μm)	R_a (Surface 2) (μm)
0.8	1.391	1.108

Table V.1: Comparaison des rugosités

On remarque que la rugosité des deux surfaces du coussinet est plus élevée que celle de la référence, selon la norme ISO. Cela démontre les conséquences de l'usure sur l'état de surface.

V.3.2 Le test PMI du coussinet

Pour le traitement chimique, on a utilisé le test PMI pour avoir les nuances du métal blanc (le régule) de notre coussinet.

PMI (Positive Material Identification)

Une analyse PMI, ou « identification positive des matériaux », est une méthode de contrôle non destructif (CND) utilisée pour vérifier la composition chimique des métaux et des alliages.



Figure V.19: l'opération de PMI

Le test PMI a été réalisé gratuitement au niveau du laboratoire Zoyed (Chéraga).

Résultats de l'opération

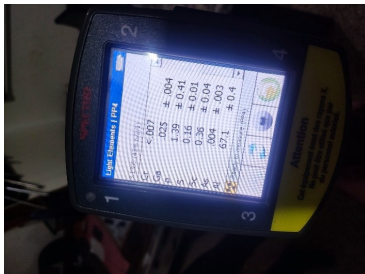


Figure V.20: Page 1

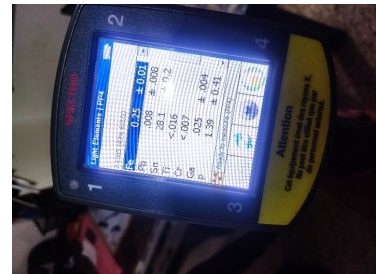


Figure V.21: Page 2



Figure V.22: Page 3

Les résultats du Test

le tableau ci-dessous récapitule les résultats du Test qui montrent le pourcentage de chaque élément dans le métal blanc.

Élément	Pourcentage (%)
Si	1.63
Cu	0.91
Mn	0.01
Mg	0.27
Zn	0.012
Fe	0.25
Pb	0.008
Sn	28.1
Ti	0.016
Cr	0.007
Ga	0.025
P	1.39
S	0.16
Sc	0.36
As	0.004
Al	67.1

Table V.2: Résultats du test PMI

Observation

On remarque que notre régule se compose essentiellement d'aluminium (67.1%) et de l'étain (28.1%).

Conclusion

On peut conclure que notre métal blanc présente une excellente résistance à l'oxydation grâce à la prédominance de l'aluminium, qui forme une couche d'oxyde protectrice en surface. De plus, la présence significative d'étain (28.1%) confère au métal des propriétés anticorrosion supplémentaires, car l'étain est connu pour sa résistance à la corrosion et sa capacité à former des films protecteurs sur les surfaces métalliques. Par conséquent, ce type de métal blanc est particulièrement adapté pour des applications dans des environnements où la résistance à l'oxydation et à la corrosion est cruciale.

V.4 Conclusion

Notre étude approfondie sur l'analyse de la matière et les contrôles non destructifs révèle que ces méthodes sont essentielles pour évaluer la qualité des matériaux utilisés dans les machines tournantes. Nous avons identifié que diverses techniques, telles que le ressuage, la radiographie et les ultrasons, offrent des avantages significatifs en termes de précision et de non-intrusivité, bien que chacune présente des limites spécifiques en termes de profondeur de pénétration ou de résolution. Ces conclusions soulignent l'importance d'intégrer ces technologies dans les pratiques industrielles pour améliorer la fiabilité et la durabilité des équipements. Pour l'avenir, il est crucial d'investir dans la recherche pour surmonter les limitations existantes et explorer de nouvelles applications potentielles, garantissant ainsi une maintenance préventive efficace et une gestion optimale des actifs dans les industries utilisant des machines tournantes.

Business Model canevas

Annexe 01 : BMC

Le Business Model est composé de 9 éléments : 1. Les segments clients 2. La proposition de valeur 3. Les partenaires clés 4. Les activités clés 5. Les ressources clés 6. Les canaux 7. La relation client 8. Les sources de revenu 9. La structure des coûts

1. Segments de clientèle

- Usines et unités de production utilisant des turbines, pompes, moteurs électriques, compresseurs.
- Entreprises ayant des besoins de maintenance et de réparation de machines tournantes.
- Entreprises industrielles cherchant à réduire les coûts en évitant de faire appel à des prestataires étrangers.

2. Proposition de valeur

- Maintenance et Réparation Locales : Offrir des services de maintenance et de réparation de machines tournantes à des coûts réduits grâce à des prestataires locaux.
- Réactivité et Disponibilité : Réduction des délais d'intervention par rapport aux prestataires étrangers.
- Expertise et Qualité : Garantir un niveau élevé de compétence et de qualité dans les services offerts.
- Support et Conseil Personnalisé : Offrir un accompagnement et des conseils adaptés aux besoins spécifiques de chaque client.

3. Partenaires clés

- Fournisseurs de Pièces de Rechange : Partenariats avec des fournisseurs locaux et internationaux pour les pièces de rechange.
- Institutions de Formation : Collaborations avec des écoles techniques et universités pour former et recruter des techniciens qualifiés.
- Associations Industrielles : Coopération avec des associations industrielles pour élargir le réseau de clients potentiels.
- Organismes de Certification : Pour garantir la conformité et la qualité des services offerts.

4. Activités clés

- Maintenance et Réparation : Intervention rapide et efficace sur les machines tournantes.
- Inspection et Diagnostic : Évaluation régulière des équipements pour anticiper les pannes et prolonger leur durée de vie.
- Formation et Développement : Formation continue des techniciens pour maintenir un haut niveau de compétence.
- Gestion des Pièces de Rechange : Gestion des stocks et approvisionnement en pièces de rechange de qualité.

5. Ressources clés

- Techniciens Qualifiés : Une équipe de techniciens spécialisés dans la maintenance des machines tournantes.
- Infrastructure : Ateliers équipés pour la réparation et la maintenance des équipements.
- Réseau de Fournisseurs : Un réseau fiable de fournisseurs de pièces de rechange et d'équipements.
- Système de Gestion : Un système de gestion efficace pour planifier et suivre les interventions de maintenance.

6. Canaux de distribution

- Plateforme en Ligne : Un site web et une application mobile pour faciliter la prise de rendez-vous et le suivi des interventions.
- Représentants Commerciaux : Une équipe de commerciaux pour prospecter et fidéliser les clients industriels.
- Participation à des Salons et Foires Industrielles : Présence lors d'événements pour promouvoir les services.
- Marketing Digital : Utilisation des réseaux sociaux et du marketing digital pour atteindre une large audience.

7. Relation client

- Support en Ligne et Téléphonique : Assistance 24/7 pour répondre aux questions et résoudre les problèmes rapidement.
- Contrats de Maintenance Préventive : Offrir des contrats de maintenance préventive pour assurer un suivi régulier des équipements.
- Visites sur Site : Interventions sur site pour diagnostiquer et réparer les équipements rapidement.
- Feedback et Amélioration Continue : Recueillir les retours des clients pour améliorer constamment les services offerts.

8. Sources de revenu

- Contrats de Maintenance : Revenus réguliers provenant des contrats de maintenance préventive et corrective.
- Interventions Ponctuelles : Facturation des interventions de réparation et de maintenance.
- Vente de Pièces de Rechange : Revenus supplémentaires provenant de la vente de pièces de rechange.
- Formations et Consultations : Offrir des formations et des services de consultation aux entreprises industrielles.

9. Structure des coûts

- Salaires et Avantages Sociaux : Rémunération des techniciens et du personnel administratif.
- Frais d'Infrastructure : Coûts liés aux ateliers de réparation et aux bureaux.
- Achat de Pièces de Rechange : Coûts d'acquisition des pièces de rechange et des équipements.
- Marketing et Publicité : Investissements en marketing pour promouvoir les services.
- Formation et Développement : Coûts liés à la formation continue des techniciens.

				<i>Vers</i>
Business Model Canvas		<i>Conçu pour:</i>	<i>Conçu par:</i>	<i>Date:</i>
<p>Partenaires clés</p> <ul style="list-style-type: none"> · Fournisseurs de pièces de rechange locaux et internationaux. : ✓ Entreprises de fabrication de pièces de rechange. ✓ Fournisseurs d'équipements de maintenance. ✓ Sociétés de logiciels pour solutions de gestion. ✓ Institutions financières pour financement. · Incubateur de l'ENP, Institutions de formation (écoles techniques et universités). · Associations industrielles. · Organismes de certification. <p>MOTIVATIONS POUR DES PARTENARIATS:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Accès à des Ressources Spécialisées : Obtenir des pièces de rechange de haute qualité et des équipements spécifiques. 	<p>Activités Clés</p> <ul style="list-style-type: none"> · Production : Fabrication et fourniture de pièces de rechange. · Résolution de problèmes : Maintenance et réparation des machines tournantes. · Plateforme/Réseau : Développement et maintenance de la plateforme de gestion des interventions. 	<p>Propositions de valeur</p> <p>Nous visons à apporter des réponses aux questions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quelle valeur offrons-nous au client ? • Qualité : Services de maintenance fiables et de haute qualité. • Efficacité : Réduction des temps d'arrêt des machines. • Économie : Coûts réduits par rapport aux prestataires étrangers. • Accessibilité : Accès à des services de maintenance locaux et rapides. • Quels problèmes de clients aidons-nous à résoudre ? • Downtime : Réduction des temps d'arrêt des machines. • Coûts élevés : Diminution des 	<p>Relation Client</p> <ul style="list-style-type: none"> · Relations Client : Établissement de partenariats de confiance avec les usines et unités de production, en offrant une réactivité immédiate et des solutions de maintenance adaptées aux besoins spécifiques de chaque client. · Intégration au Modèle d'Entreprise : Intégration stratégique des relations client à travers des systèmes avancés de CRM pour une gestion efficace des contrats et des interactions, ainsi que des plateformes ERP pour une logistique optimisée et la gestion proactive des stocks de pièces. · Optimisation des Coûts : Focus sur la réduction des coûts à long terme grâce à des stratégies de maintenance prédictive et à des interventions proactives, assurant une rentabilité durable 	<p>Clients</p> <ul style="list-style-type: none"> · Création de Valeur : Nous créons de la valeur pour les usines et unités de production qui dépendent de machines tournantes telles que turbines, pompes, moteurs électriques et compresseurs. Notre valeur réside dans la réduction des temps d'arrêt, l'optimisation des performances et la gestion proactive des équipements. · Clients Importants : Nos clients les plus importants sont les grandes et moyennes entreprises industrielles qui ont besoin de maintenir la fiabilité et l'efficacité de leurs équipements pour soutenir leur production continue. · Segmentation de la Clientèle : Notre clientèle se compose principalement d'un marché de niche dans le secteur industriel. Nous nous concentrons sur des segments spécifiques nécessitant une expertise approfondie en maintenance industrielle, tout en offrant des

<ul style="list-style-type: none"> · Amélioration des Compétences : Formation continue et développement professionnel des techniciens. · Expansion du Réseau : Élargir le réseau de clients et de partenaires grâce aux associations industrielles. · Certification et Conformité : Garantir la qualité et la conformité des services offerts. · Optimisation des Coûts : Réduire les coûts en partageant les ressources et en bénéficiant d'économies d'échelle. · Innovation et Technologie : Accéder aux dernières innovations et technologies dans le domaine de la maintenance industrielle.² 		<p>coûts de maintenance.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Complexité : Simplification de la gestion des services de maintenance. • Fiabilité : Amélioration de la fiabilité des machines tournantes. • Quels ensembles de produits et services offrons-nous à chaque segment de clientèle ? • Usines et unités de production : • Maintenance préventive et corrective des turbines, pompes, moteurs électriques, compresseurs. 	<p>tout en maintenant des normes élevées de service.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Performance et Fiabilité : Engagement inébranlable envers des performances optimales des équipements tournants, visant à minimiser les temps d'arrêt et à garantir une productivité continue et fiable. · Avantage Concurrentiel : Différenciation par des services hautement personnalisés, une réduction significative des risques opérationnels pour les clients et une accessibilité nationale rapide, consolidant ainsi notre position de leader sur le marché national de la sous-traitance industrielle. 	<p>solutions personnalisées adaptées à chaque type d'équipement.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Plateforme Segmentée : Nous avons une approche segmentée, offrant des services différenciés basés sur les besoins spécifiques de chaque type d'équipement et de chaque client. Cela nous permet de répondre de manière précise aux exigences diversifiées du marché industriel. · Avantage Concurrentiel : Notre capacité à fournir des services hautement spécialisés et personnalisés nous distingue sur un marché où la fiabilité et la performance des équipements sont cruciales. Nous nous positionnons comme un partenaire stratégique offrant une valeur ajoutée significative à nos clients industriels.
	<p>Ressources clés</p> <ul style="list-style-type: none"> · Production : Pièces de rechange et équipements de haute qualité. · Résolution de problèmes : Techniciens qualifiés et expérimentés. · Plateforme/Réseau : Infrastructure 	<ul style="list-style-type: none"> • Fourniture de pièces de rechange. • Fournisseurs locaux : • Plateforme pour promouvoir leurs services de maintenance. • Accès à un réseau de 	<p>Canaux</p> <ul style="list-style-type: none"> · Canaux Préférés par nos Clients : Nos clients préfèrent les communications directes telles que les visites sur site pour évaluer les équipements, les appels téléphoniques pour des consultations 	

technologique pour la plateforme en ligne

TYPES DE

RESSOURCES: ·

· **Physiques** : Pièces de rechange et équipements de maintenance.

· **Intellectuelles** : Brevets et licences pour technologies de maintenance.

· **Humaines** : Techniciens qualifiés et spécialisés.

· **Financières** : Investissements pour l'achat d'équipements et le développement de la plateforme.

clients industriels.

- **Techniciens et entreprises de maintenance** :
- Formation continue.
- Outils et technologies de maintenance avancés.
- **Quels sont les besoins des clients que nous satisfaisons ?**
- **Fiabilité** : Besoin de machines fiables et performantes.
- **Coût** : Besoin de solutions de maintenance rentables.
- **Simplicité** : Besoin d'un processus de maintenance simplifié.
- **Support** : Besoin d'un support technique rapide et efficace.

CARACTÉRISTIQUES

:

- **Nouveauté** : Utilisation de

techniques immédiates et les échanges par e-mail pour la gestion des contrats et des rapports de service.

· **Atteindre nos Clients** : Nous atteignons nos clients en maintenant une équipe technique mobile bien formée pour les visites sur site, en offrant un support téléphonique 24/7 pour les urgences et en utilisant des plateformes en ligne pour planifier les services de maintenance et communiquer les mises à jour.

· **Intégration des Canaux** : Nos canaux de communication sont intégrés à travers un système CRM centralisé pour suivre les interactions client, un système de gestion des appels pour traiter rapidement les demandes et une plateforme numérique pour la gestion des services planifiés.

· **Efficacité des Canaux** : Les visites sur site sont cruciales pour évaluer les besoins spécifiques des installations client,

technologies avancées pour la maintenance prédictive et proactive des équipements industriels.

· **Performances :**

Garantie de performances optimales des machines tournantes pour minimiser les temps d'arrêt.

· **Personnalisation :**

Adaptation des services de maintenance aux besoins spécifiques de chaque type d'équipement et de chaque client.

· **Réussir le travail :**

Engagement à assurer un fonctionnement continu et fiable des machines pour soutenir la production industrielle.

· **Design :** Approche innovante dans la conception des stratégies de maintenance et d'intervention.

· **Marque / Statut :**

Établissement d'une réputation solide pour la qualité et la fiabilité des services de maintenance industrielle.

· **Prix :** Tarification compétitive pour attirer les clients tout en assurant une rentabilité pour l'entreprise.

tandis que les appels téléphoniques permettent une communication rapide et directe pour résoudre les problèmes techniques. Cette approche est rentable car elle réduit les temps d'arrêt et optimise la gestion des ressources.

· **Intégration dans les Routines**

Client :

Nous intégrons ces canaux en établissant des calendriers de visites régulières basés sur les contrats de service, en fournissant un support téléphonique accessible à tout moment et en utilisant des outils numériques pour automatiser

· **Réduction des coûts** : Optimisation des coûts de maintenance à long terme grâce à des pratiques efficaces et des interventions préventives.

· **Réduction des risques** : Minimisation des risques d'arrêt non planifié des machines grâce à une maintenance proactive.

· **Accessibilité** : Disponibilité rapide des services de maintenance à travers tout le pays, avec une couverture étendue.

· **Commodité / Facilité d'utilisation** : Processus simplifiés et efficaces pour les clients, de la planification des interventions à la gestion des rapports de maintenance.

les processus de rapport et de gestion des interventions.

Coûts

· **Coûts les Plus Importants :**

- **Ressources Humaines Qualifiées** : Les salaires des techniciens et ingénieurs spécialisés dans la maintenance des équipements tournants représentent un coût significatif.
- **Pièces de Rechange et Matériaux** : Les coûts liés à l'approvisionnement en pièces de rechange de qualité et aux matériaux nécessaires pour les réparations et la maintenance.
- **Technologies et Outils Spécialisés** : Investissements dans des technologies de pointe pour la maintenance prédictive et des outils spécialisés pour les interventions sur site.

Revenus

- **Valeur Perçue** : Les clients valorisent la fiabilité et la performance continue de leurs équipements industriels, prêts à payer pour la maintenance préventive qui minimise les temps d'arrêt et optimise les performances.
- **Mode de Paiement** : Actuellement, les clients paient principalement par contrat de service régulier pour la maintenance préventive et par intervention ponctuelle pour les réparations urgentes.
- **Préférences de Paiement** : Ils préfèrent généralement des contrats de service avec des paiements réguliers prévisibles, couvrant à la fois la maintenance préventive et réactive, offrant ainsi une stabilité budgétaire.

· **Ressources Clés les Plus Chères :**

- **Personnel Technique :** Techniciens et ingénieurs qualifiés pour assurer des services de haute qualité et maintenir la compétence technique.
- **Plateformes Numériques :** Systèmes CRM, ERP et outils de gestion des services pour assurer une coordination efficace et une gestion optimisée des ressources.

· **Activités Clés les Plus Chères :**

- **Maintenance Préventive et Proactive :** Les activités visant à prévenir les pannes et à maximiser la disponibilité des équipements, nécessitant des ressources et des efforts importants.
- **Gestion des Urgences :** Réponse rapide aux appels d'urgence et interventions immédiates, impliquant souvent des coûts supplémentaires en termes de main-d'œuvre et de déplacements.

· **Sources de Revenus :** Les principales sources de revenus incluent les frais d'utilisation pour la maintenance régulière, la vente de pièces de rechange, et des options de location ou de crédit-bail pour les équipements de remplacement.

· **Stratégies de Prix :** Nous utilisons des prix fixes pour les contrats de service, ajustés selon les besoins spécifiques du client, et des approches de négociation dynamique pour des contrats personnalisés et des ajustements basés sur la performance.

Analyse SWOT

Analyse SWOT pour le Projet de Sous-traitance Nationale en Maintenance Industrielle

Forces (Strengths):

- Expertise Technique Spécialisée : Capacité avancée dans la maintenance prédictive et proactive des équipements tournants tels que turbines, pompes, moteurs électriques et compresseurs, assurant une haute disponibilité et fiabilité.
- Approche Préventive : Services axés sur la maintenance préventive pour minimiser les temps d'arrêt et optimiser la performance des machines, répondant ainsi aux besoins critiques des usines et des unités de production.
- Réputation de Qualité : Réputation établie pour la qualité des services, la rapidité d'intervention et la capacité à résoudre efficacement les problèmes techniques complexes.
- Partenariats Nationaux : Large réseau de partenariats avec des entreprises industrielles à travers le pays, fournissant une base solide pour la croissance et l'expansion.

Faiblesses (Weaknesses):

- Dépendance Économique : Sensibilité aux fluctuations économiques qui peuvent influencer les budgets de maintenance des clients et affecter la demande de services.
- Besoin d'Investissements Continus : Nécessité d'investissements constants dans la formation du personnel et l'acquisition de technologies avancées pour maintenir un avantage concurrentiel.

Opportunités (Opportunities):

- Croissance du Marché de la Maintenance : Expansion potentielle dans un marché croissant de la maintenance industrielle préventive, avec une demande accrue pour la fiabilité des équipements.
- Partenariats Stratégiques : Opportunités de partenariats stratégiques avec des fabricants d'équipements pour offrir des services de support spécialisés et à valeur ajoutée.
- Diversification Géographique : Possibilité d'étendre les opérations dans de nouvelles régions géographiques pour capturer de nouveaux marchés et diversifier les risques.

Menaces (Threats):

- Concurrence Accrue : Pression concurrentielle provenant de grandes entreprises établies et de nouveaux entrants dans le secteur de la maintenance industrielle.
- Volatilité des Coûts : Risques associés à la volatilité des prix des matières premières, des pièces de rechange et des équipements, influençant les coûts opérationnels.
- Cadre Réglementaire : Contraintes potentielles liées aux normes de sécurité industrielles et aux réglementations environnementales en évolution, nécessitant une adaptation continue.

Conclusion Générale

Dans ce projet de fin d'étude, et pour réaliser une étude et analyse de l'usure des paliers lisses dans le domaine des machines tournantes :

Tout d'abord, nous avons entrepris une recherche bibliographique sur les machines tournantes et les paliers lisses. Ensuite, nous avons présenté des notions fondamentales sur le traitement mécanique de surface et les contrôles non destructifs dans le deuxième chapitre. Nous avons réalisé la conception par rétro-ingénierie en utilisant le scanner 3D du FABLAB, suivi des calculs et du dimensionnement du palier. La fiabilité a été évaluée à 50 %, la maintenabilité et la disponibilité ont respectivement été calculées, donnant une valeur de 56 %. Dans le chapitre 5, nous avons appliqué des méthodes de contrôle non destructif (CND) pour analyser et évaluer l'état de notre coussinet, notamment le contrôle visuel et le ressuage, permettant de détecter l'usure sur différentes surfaces du régule. Une analyse de matière a également été effectuée en mesurant la rugosité du régule et en réalisant un test PMI, révélant que notre palier est constitué d'un alliage d'aluminium. Pour conclure, nous avons élaboré un business model afin de rendre notre projet plus pratique et utile dans le monde professionnel.

Bibliographie

- [1] KSB Fluid Experts, "Machine tournante: Définition et fonctionnement," <https://www.ksb-fluidexperts.fr/machine-tournante-definition-fonctionnement/> [consulté le 12 avril 2024].
- [2] Wikipedia, "Turbine," <https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine> [consulté le 18 mars 2024].
- [3] HYPOSO, "Handbook," https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/HYPOSO_handbook_French_final.pdf [consulté le 25 mai 2024].
- [4] A. Benkhaoua and A. Bouach, Projet de fin d'études, ENP Repository.
- [5] LEGAT, "Diffusion," HAL Thèses, 2015.
- [6] Djebbari, "Compresseur centrifuge," Université de Naama, 2024.
- [7] DELLALI Emna, Thèse, HAL Thèses.
- [8] FAO, "AH810F07," <https://www.fao.org/4/ah810f/AH810F07.htm> [consulté le 20 avril 2024].
- [9] GGB, "Les paliers," <https://www.ggbearings.com/fr/tribou/internet-bearings/les-paliers> [consulté le 25 avril 2024].
- [10] SKF, "Bearing housings," <https://www.skf.com/africa/fr/products/mounted-bearings/bearing-housings> [consulté le 30 avril 2024].
- [11] Emile Maurin, "Mémento technique," https://fixation.emile-maurin.fr/custom/images/rtf/memento-technique-mau_fix_1-lnew1.pdf [consulté le 5 mai 2024].
- [12] MS Motorservice, "Product group," <https://www.ms-motorservice.com/int/fr/product-group/7404> [consulté le 10 mai 2024].
- [13] SONATS, "Parachèvement de soudure," <https://sonats-et.com/martelage/parachevement-de-soudure/#:~:text=C'est%20un%20traitement%20m%C3%A9canique,des%20contraintes%20r%C3%A9siduelles%20de%20compression> [consulté le 7 avril 2024].
- [14] Chimi Color, "Grenailage," <https://www.chimi-color.fr/grenailage#:~:text=La%20technique%20de%20grenailage%20et,pr%C3%A9parer%20ou%20restaurer%20une%20pi%C3%A8ce> [consulté le 15 mars 2024].

-
- [15] GDD Solutions, "Tribofinition," <http://gdd.solutions/nos-metiers/finition-et-aspect/article/tribofinition.html> [consulté le 9 juin 2024].
- [16] Bodycote, "Boruration," <https://www.bodycote.com/fr/services/traitement-thermique/cementation-suivie-dune-trempe/boruration/> [consulté le 19 avril 2024].
- [17] Wikipedia, "Cémentation (métallurgie)," [https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9mentation_\(m%C3%A9tallurgie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9mentation_(m%C3%A9tallurgie)) [consulté le 3 mai 2024].
- [18] A3TS, "Phosphatation zinc et zinc/calcium sur acier," <https://www.a3ts.org/fiches-procedes/phosphatation-zinc-et-zinc/calcium-sur-acier> [consulté le 29 avril 2024].
- [19] ProLeanTech, "Metallic coating," <https://proleantech.com/fr/metallic-coating/> [consulté le 11 avril 2024].
- [20] Ferros Planes, "Acier dans l'industrie," <https://ferrosplanes.com/fr/acier-dans-industrie/> [consulté le 2 juin 2024].
- [21] Industrie Online, "3D Systems Geomagic Design X," <https://www.industrie-online.com/fr/produits/3d-systems-geomagic-design-x> [consulté le 23 avril 2024].
- [22] Aniwaa, "Shining 3D FreeScan X5," <https://www.aniwaa.com/fr/produit/scanners-3d/shining-3d-freescan-x5/> [consulté le 14 mai 2024].
- [23] Creaform, "Qu'est-ce que la rétro-ingénierie?" <https://www.creaform3d.com/blog/fr/quest-ce-que-la-retro-ingenierie/> [consulté le 6 juin 2024].
- [24] Flying Vision, "CND ultrasons UT/PA," <https://www.flyingvision.fr/produits-cnd/cnd-ultrasons-ut-pa/> [consulté le 28 mai 2024].
- [25] Saidi, "Cours concept FMD".
- [26] COFREND, "Ultrasons UT," https://www.cofrend.com/jcms/uat_128230/fr/ultrasons-ut [consulté le 9 mars 2024].
- [27] Savoy Control, "Contrôle visuel," <https://www.savoycontrol.fr/savoir-faire/controle-visuel/> [consulté le 17 avril 2024].
- [28] COFREND, "Ressuage PT," https://www.cofrend.com/jcms/uat_128227/fr/ressuage-pt [consulté le 22 mars 2024].
- [29] Plastiform, "Contrôle non destructif (CND)," <https://www.plastiform.info/controle-dimension/controle-non-destructif-cnd/> [consulté le 21 juin 2024].
- [30] Cadingenio, "SMED: Réduire les temps," <https://cadingenio.com/smed-reducir-tiempos/> [consulté le 30 mars 2024].
- [31] Wikipedia, "Turbine Pelton," https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_Pelton [consulté le 13 avril 2024].

- [32] Gthec, "Francis turbine," <https://fr.gthec.cn/products/francis-turbine.html> [consulté le 5 mai 2024].
- [33] Energie Plus, "Turbine," <https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/turbine/> [consulté le 9 juin 2024].
- [34] Free3D, "Siemens SST-5000 steam turbine generator," <https://free3d.com/fr/3d-model/siemens-sst-5000-steam-turbine-generator-8185.html> [consulté le 25 mars 2024].
- [35] Pompes Grosclaude, "Pompes volumétriques," https://www.pompes-grosclaude.com/category_pompes/complement-de-gamme/pompes-volumetriques/ [consulté le 12 juin 2024].
- [36] Pompezanni, "Différence entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques," <https://www.pomezanni.it/fr/news-fr/difference-entre-les-pompes-centrifuges-et-les-pompes-volumetriques/> [consulté le 17 mai 2024].
- [37] Babbitting Service, "BSI Products," <https://www.babbitting.com/bsi-products> [consulté le 1er mars 2024].
- [38] Bronze Gleitlager, "Wear resistant alloys for heavy equipment bushing bearing," <https://arabic.bronzegleitlager.com/sale-11480359d-wear-resistant-alloys-for-heavy-equipment-bushing-bearing.html> [consulté le 18 avril 2024].
- [39] Sinda Thermal, "Cooling fan bearing knowledge," <https://ar.sindathermal.com/info/cooling-fan-bearing-knowledge-71549558.html> [consulté le 29 mars 2024].
- [40] Forster Products, "Drill jig bushing sets," <https://www.forsterproducts.com/product/drill-jig-bushing-sets-for-universal-sight-mounting-fixture/> [consulté le 4 avril 2024].
- [41] Wikipedia, "Turbine à vapeur," https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_%C3%A0_vapeur [consulté le 4 avril 2024].
- [42] MS Motorservice, "Dommages sur les coussinets corrosion," <https://www.ms-motorservice.com/int/fr/technipedia/dommages-sur-les-coussinets-corrosion-397> [consulté le 15 mai 2024].
- [43] MS Motorservice, "Dommages sur les coussinets corrosion," <https://www.ms-motorservice.com/int/fr/technipedia/dommages-sur-les-coussinets-corrosion-397> [consulté le 15 mai 2024].
- [44] CWST, "Grenailage de précontrainte contrôlé," <https://cwst.fr/nos-prestations/le-grenailage-de-precontrainte-controle/> [consulté le 22 avril 2024].
- [45] FILAB, "Grenailage traitement surface," <https://filab.fr/nos-prestations/analyse/caracterisation-de-surface/grenailage-traitement-surface/> [consulté le 24 juin 2024].

-
- [46] Acier Marquis, "Services finition," <https://aciermarquis.com/services/finition> [consulté le 7 juin 2024].
- [47] DMP SARL, "Tribofinition," <https://www.dmpsarl.fr/joints-etancheite/production/tribofinition/> [consulté le 27 mai 2024].
- [48] MTEC Technica, "Machine ébavurage polissage par flux," <https://www.mtectechnica.fr/machine-ebavurage-polissage-par-flux/> [consulté le 5 juin 2024].
- [49] HelloPro, "Tribofinition," <https://www.hellopro.fr/tribofinition-2005605-fr-1-feuille.html> [consulté le 14 juin 2024].
- [50] La Radioactivité, "Projet Astrid," https://laradioactivite.com/articles/energie_nucleaire/projet-astrid [consulté le 16 mai 2024].
- [51] La Radioactivité, "Projet Astrid," https://laradioactivite.com/articles/energie_nucleaire/projet-astrid [consulté le 16 mai 2024].
- [52] Centre Expertise, "Article," <https://www.centrexpertise.com/wp-content/uploads/2017/04/article-1.pdf> [consulté le 31 mai 2024].
- [53] Thermetco, "Nitruration," <https://www.thermetco.com/fr/traitements/nitruration/> [consulté le 6 avril 2024].
- [54] La Nitruration, "Traitements," <https://www.lanitruration.be/en/traitements.php> [consulté le 21 avril 2024].
- [55] BST Traitement, "Brunissage," <https://bst-traitement.fr/brunissage/> [consulté le 12 mars 2024].
- [56] Stoca, "Phosphatation au manganèse ou au zinc," <https://stoca.fr/traitements-sur-aciers/phosphatation-au-manganese-ou-au-zinc/> [consulté le 8 juin 2024].
- [57] ProLeanTech, "Metallic coating," <https://proleantech.com/fr/metallic-coating/> [consulté le 1er avril 2024].
- [58] Wikipedia, "Schema projection thermique," https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ec/Schema_projection_thermique.png [consulté le 3 avril 2024].
- [59] Inometa, "Product," <https://www.directindustry.fr/prod/inometa/product-194881-1942299.html> [consulté le 7 mai 2024].
- [60] Lycée Carnot Bruay, "Cours coussinets," http://lpo.lycee-carnot-bruay.com:8080/site.epo/calcul-composant/coussinets/cours_coussinets.pdf [consulté le 15 juin 2024].
- [61] Cambridge, "Wake and thrust deduction," <https://www.cambridge.org/core/books/abs/ship-resistance-and-propulsion/wake-and-thrust-deduction/A98391E8CE40C619AF6C3ADF93EFED43> [consulté le 19 mars 2024].

- [62] Gammapy, "Plot exp cutoff powerlaw," https://docs.gammapy.org/0.18.2/modeling/gallery/spectral/plot_exp_cutoff_powerlaw.html [consulté le 28 mai 2024].
- [63] Waygate Technologies, "Product," <https://www.directindustry.com/pt/prod/waygate-technologies/product-9257-428763.html> [consulté le 14 juin 2024].
- [64] Technologie Pro, "Contrôles non destructif," <https://www.technologiepro.com/cours-genie-mecanique/cours-48-controles-non-destructif/> [consulté le 11 avril 2024].
- [65] Saidi, "Cours concept FMD" .

Annexes

Chapitre 4 : code MATLAB pour le calcul de fiabilité

Voici le code :

```
1 % Liste des valeurs de t
2 t_values = [2.44, 3.92, 8.76, 10.22, 21.9, 25.13, 100.17, 135.27,
3           189.26, ...
4           201.42, 313.56, 335.49, 343.42, 419.25, 460.79, 533.13,
5           ...
6           1176.74, 1217.64, 1557.95, 1605.97, 1654.05, 2635.54];
7
8 % Fonction pour calculer R(t)
9 R = @(t) exp(-(t/430)^0.8);
10
11 % Initialiser un tableau pour les r sultats
12 R_values = zeros(size(t_values));
13
14 % Calculer R(t) pour chaque valeur de t
15 for i = 1:length(t_values)
16     R_values(i) = R(t_values(i));
17 end
18
19 % Calculer la moyenne des r sultats
20 mean_R = mean(R_values);
21
22 % Afficher les r sultats
23 disp('Les valeurs de respectivement sont:')
24 disp(R_values)
25
26 % Afficher la moyenne des valeurs de R(t) en pourcentage
27 fprintf('La fiabilit est : %.2f%%\n', mean_R * 100);
```

Dessin de définition du coussinet

