

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب

Université Ain Témouchent– Belhadj Bouchaib



Faculté des sciences et de Technologie
Département de Genie mécanique



Projet de Fin d'études

Pour obtenir le **diplôme de Master**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

**Application de la maintenance préventive (ou prédictive) des machines
tournantes : Etude de cas d'une turbine à gaz**

Présenté Par:

- Safir Loubna Yasmine
- Bendehnoun Nesrine

Devant le jury compos::é de:

Dr.REMLAOUI Ahmed

MCB UAT.B.B (Ain Temouchent) Président

Dr. GUENDOUZ Bouhleb

MAA UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur

Dr. BELGHOUL Hakima .

MAB UAT .B.B (Ain Temouchent) Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Le grand remerciement revient à Dieu qui nous a donné la force et le courage pour réaliser et terminer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à Madame Belghoul Hakima, d'avoir proposé ce sujet important et pour sa disponibilité dans le suivi de ce travail et pour ses précieux conseils et orientations.

Nous nous remercions également monsieur le président et les membres du jury d'avoir accepté et assumé la lourde tâche d'examiner ce travail.

Nous avons le plaisir à remercier tous nos enseignants, les responsables et personnel du département de génie mécanique.

Nous voudrions aussi remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

A mes chers parents, que dieu les garde et les protège pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes amis pour leur appui et leur encouragement

A mes frères MAHMOUD EL KHALIL qui a décédé trop tôt qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Puisse dieu, le tout puissant l'avoir en sa sainte miséricorde, KAMEL et NOREDDINE.

Mes sœurs CHAHRAZED, INES, HANENE et MAROUA

A toute ma famille pour son soutien tout au long de mon parcours scolaire. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien.

Sans oubliant les petits ISLEM, MOHAMED, SIRINE et RAHMA

Merci infiniment a moi-même d'être toujours là pour moi et de croyant en moi

Non oublier mon binôme et ma chère amie LOUBNA YASMINE pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

NESRINE.

Dédicace

A mes chers parents, que dieu les garde et les protège pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes amis pour leur appui et leur encouragement.

A mon frère ABDELILLAH, mes sœurs NESRINE, FATIMA, AMOURA et BOUCHRA

A toute ma famille surtout SOUMIA pour son soutien tout au long de mon parcours scolaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien.

Merci d'être toujours là pour moi.

Son oublier mon binôme et ma chère amie NESRINE pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Loubna Yasmine

Résumé

Ce travail met en lumière l'importance de la maintenance préventive des machines tournantes, en se basant sur deux techniques clés : l'analyse vibratoire et l'inspection par boroscope qui est un outil utilisé pour inspecter les parties internes des machines tournantes, sans les désassembler. Il permet de détecter les anomalies et les défaillances avant qu'elles ne causent des problèmes.

L'étude met en valeur les techniques d'analyse recensable à la fiabilité de contrôle -maintenabilité- des turbines à gaz.

En intégrant le contrôle non destructif qui est une technique essentielle pour assurer la maintenance préventive des machines tournantes. Elle permet de détecter les défauts internes, d'inspecter les pièces, de contrôler les dimensions par les techniques prédictives de test et d'inspection, l'étude vise à garantir la fonctionnalité des équipements, réduire les coûts de maintenance, et assurer la qualité des produits finis.

Abstract

This work highlights the importance of preventive maintenance of rotating machinery, based on two key techniques: vibration analysis and borescope inspection, which is a tool used to inspect the internal parts of rotating machinery without disassembling them. It allows detecting anomalies and failures before they cause problems.

The study emphasizes the analysis techniques that contribute to the reliability of control-maintainability of gas turbines.

By integrating non-destructive testing, which is an essential technique for ensuring preventive maintenance of rotating machinery, the study aims to guarantee the functionality of equipment, reduce maintenance costs, and ensure the quality of finished products. Non-destructive

Résumé

testing allows detecting internal defects, inspecting parts, and controlling dimensions using predictive testing and inspection techniques.

ملخص

هذا العمل يسلط الضوء على الأهمية الحاسمة للصيانة الوقائية للآلات الدوارة، استناداً إلى تقنيتين رئيسيتين: تحليل الاهتزازات والفحص بالبورسكوب.

البوروسكوب هو أداة تستخدم لمراقبة الأجزاء الداخلية لماكينات الدوران ، دون تفكيكها. يسمح ذلك بالكشف عن الأعطال قبل أن تسبب مشاكل.

تؤكد الدراسة على تحسين موثوقية - قابلية الصيانة - في التوربينات الغازية. من خلال دمج الاختبار غير المدمر وهو أسلوب أساسي لضمان الصيانة الوقائية للآلات الدوارة. فهو يسمح باكتشاف العيوب الداخلية وفحص الأجزاء وفحص الأبعاد عن طريق تقنيات والفحص التنبؤية، حيث تهدف الدراسة إلى ضمان موثوقية المعدات، وخفض تكاليف الصيانة، وضمان جودة المنتجات النهائية.

Sommaire

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
I.1.INTRODUCTION.....	2
I.2.DEFINITION DE LA MAINTENANCE:	3
I.2.1 Notions sur la maintenance	3
I.2.2. Le rôle et l'objectif de la maintenance:	3
I.3.LES TYPES DE MAINTENANCE :.....	4
I.3.1. Maintenance préventive	4
I.3.1.1. Les différents types de maintenance préventive:	4
I.3.1.2. Les objectifs visés par la maintenance préventive.....	7
I.4. ORGANIGRAMME DU SERVICE MAINTENANCE.....	9
I.5. LES FONCTIONS DE LA MAINTENANCE :	9
I.5.1. La fonction méthode	10
I.5.1.1. Le rôle de bureau étude et méthode :	10
I.5.2. La fonction ordonnancement :.....	11
I.5.2.1. Le rôle de la planification de maintenance préventive	11
I.5.3. La fonction réalisation :.....	12
I.6 LES OPERATIONS DE LA MAINTENANCE.....	12
I.6.1. Le dépannage :	12
I.6.2. La réparation :	13
I.6.3. La surveillance :	13

Sommaire

I.6.4. Les révisions :	13
I.7. LA MESURE VIBRATOIRE :	14
I.7.1. Notions fondamentales :	14
I.7.2. Vibration et forces internes :	16
I.7.2.1. Mesure de l'état générale d'une machine: le niveau global	17
I.7.2.2. L'analyse spectrale	18
I.8. LES OUTILS DE MESURE	19
I.8.1. La chaîne de mesure	19
I.8.2. Capteurs de vibration	20
I.8.2.1. Accéléromètre	21
I.8.2.2. Vélocimétrie	22
I.8.2.3. Capteur de déplacement :	22
I.8.2.4. Capteurs de proximité	23
I.8.3. Critères de choix des capteurs	24
I.8.4. Collecteurs de données portables	25
I.8.5. Logiciels de traitement	25
I.8.6. Mesure globale	25
I.8.6.1 L'appareillage	25
I.8.6.2. La procédure	26
I.8.6.3. Définition	26
I.8.7. Seuil de jugement de l'intensité vibratoire	26
I.8.7.1. Valeurs des seuils	27
I.9. MESURE DES CHOCS	28
I.9.1 La mesure du BCU	29
I.9.2 Seuil de jugement pour le BCU	30
I.10. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES STRUCTURES	30
I.10.1. Définition du terme 'degré de liberté'	30
I.10.1.1. Système à un degré de liberté	30
I.10.1.2. Système à deux degrés de liberté	31
I.10.1.3. Système à N degrés de liberté	31

Sommaire

I.10.2. Systèmes continus.....	32
I.10.3. Dynamique des rotors.....	33
I.11. THEORIE DE CHOC	33
I.11.1. Théorie de choc périodique (chocs à la rotation)	33
I.11.1.1. Application d'un choc périodique à une structure.....	34
I.11.1.2. La réponse des structures à nombre fini de degré de liberté :	35
I.11.1.3. Réponse d'un système linéaire a une entrée de type impulsionnel périodise dans le temps	35
I.12. APPLICATION DU TRAITEMENT D'UN SIGNAL A LA RECONNAISSANCE DES PANNES	36
I.13. CONCLUSION	37
II.2. LA REPRESENTATION D'UN SIGNAL EN FONCTION DE TEMPS.....	39
II.3. LA REPRESENTATION D'UN SIGNAL EN FONCTION DE FREQUENCE	40
II.4. L'INTERET PRATIQUE DE L'ANALYSE SPECTRALE	40
II.5. CALCUL DE SPECTRE	41
II.5.1. Le pré spectre.....	41
II.5.2. la transformée de Fourier	42
II.5.2.1 Définition	42
II.5.2.2. Propriétés.....	42
II.5.2.3. Les types de la transformée	43
II.5.2.4. La représentation spectrale et la transformée de Fourier	43
II.6. LES DEFAUTS OBSERVES DANS LES MACHINES ROTATIVES	44
II.6.1. Le balourd	44
II.6.1.1 Définition	45
II.6.1.2. Valeur du balourd.....	45
II.6.1.3. Causes du déséquilibre	45
II.6.1.4. Déséquilibre statique	48
II.6.1.5. Déséquilibre dynamique.....	49
II.6.1.6. Déséquilibre de couple.....	50
II.6.1.7. Mesure : [16]	50

Sommaire

II.6.1.8. Signal vibratoire.....	51
II.6.2. Défaut d'alignement	52
II.6.2.1. Désalignement d'arbres accouplés	52
II.6.2.2. Désalignement des paliers	54
II.6.3.2. Durée de vie des roulements	55
II.6.3.3. Causes des défauts	55
II.6.3.4. Processus de dégradation d'un roulement	59
II.6.3.5. Fréquences caractéristiques.....	60
II.6.4 Défauts des paliers.....	62
II.7. CONCLUSION.....	62
III.1. INTRODUCTION:	84
III.2.DEFINITION, MOYENS ET UTILISATIONS DU CONTROLE NON DESTRUCTIF : [61]	84
III.2.1. Définition : [61]	84
III.2.2. Moyens	84
III.2.3. Utilisations	84
III.3. LES STADES DE CONTROLE.....	85
III.3.1. Le contrôle de réception	85
III.3.2. Le contrôle en cours de fabrication.....	85
III.3.3. Le contrôle de produit fini	85
III.4. LES TYPES DE CONTROLE ET LEUR OBJECTIF	86
III.5. TECHNIQUES DE CONTROLE	87
III.6. ORIGINES ET CLASSIFICATIONS DES DEFAUTS.....	87
III.6.1. Origines de défauts	87
III.6.2. Classification des défauts	87
a. Défauts dus au soudage	87
a. Défauts dus au forgeage	91
b. Défauts dus aux traitements thermiques.....	91

Sommaire

III.7. L'EXAMEN VISUEL.....	91
III.7.1. Introduction.....	91
III.7.2. Compétences nécessaires	91
III.7.3. Equipements	91
III.7.3.1 Le boroscope	91
III.8. LE RESSUAGE.....	98
III.8.1. Introduction.....	98
III.8.2. Définition	99
III.8.3. Domaines d'application:.....	99
III.8.5. Principe de ressuage	100
III.8.6. Types et significations des indications	102
III.8.6.1. Types d'indications.....	102
III.8.6.2. Significations des indications	103
III.8.7. Types de pénétrant et de révélateurs	103
III.8.7.1. Pénétrants	103
III.8.7.2. Révélateurs.....	103
III.9. CONCLUSION :	104
IV.1 INTRODUCTION.....	106
IV.2 DEFINITION DE MEDGAZ.....	106
IV.2.1 Le rôle de Medgaz	107
IV.2.2 L'organigramme de Medgaz.....	107
IV.2.3 Description général de la station.....	108
IV.2.3.1 Filtration.....	108
IV.2.3.2 Analyse du gaz :	109
IV.2.3.3 Les compresseurs d'air :	110
IV.2.3.4 Unité de la génération du nitrogène gaz :	110
IV.2.3.4 La torche :	111
IV.2.3.5 Skid Gaz :	112
IV.2.3.6 Les turbocompresseurs (1-TK10/20/30/40)	112
IV.2.3.7 Source d'énergie électrique de la station :	113

Sommaire

IV.2.4 Politique de la maintenance du MEDGAZ	117
IV.3. L'APPLICATION DE L'INSPECTION BOROSCOPIQUE :	118
IV.3.1 La partie étudiée.....	118
IV.3.2. Les informations.....	119
IV.3.2.1 Les informations sur l'inspection boroscopique.....	119
IV.3.2. Sur le moteur :	119
IV.3.3 Liste de vérification.....	121
IV.3.4 Les résultats de l'inspection boroscopique	122
IV.3.5 Interpretation	127
IV.4 CONCLUSION.....	128
CONCLUSION GENERALE.....	130
BIBLIOGRAPHIE	132
LISTE DES ABREVEATIONS.....	137
LISTE DES SYMBOLES	139
ANNEXE	

Liste des figures

Figure I. 1: Les objectifs de la maintenance	3
Figure I. 2: Maintenance préventive.....	4
Figure I. 3: Les différents types de maintenance.....	8
Figure I. 4: Exemple de structure d'une entreprise.....	9
Figure I. 5: Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance.	10
Figure I. 6: Signal périodique.....	14
Figure I. 7: Illustration d'une vibration.....	16
Figure I. 8: Signaux vibratoires en mode déplacement, vitesse et accélération.....	18
Figure I. 9: Matériel de mesure et d'analyse des vibrations.....	20
Figure I. 10: Accéléromètre piézoélectrique.....	21
Figure I. 11: Constituants d'un capteur piézoélectrique.....	22
Figure I. 12: Capteur électrodynamique.....	23
Figure I. 13: Capteur de déplacement.....	24
Figure I.14: Exemples de limites vibratoires proposées par les normes.....	28
Figure I.15: vibration de type impulsionnel.....	29
Figure I. 16: Illustration spectrale d'un choc périodique.....	34
Figure I. 17: Graphique représentant la réponse impulsionnelle.....	36
Figure II.1: Représentation temporelle d'un signal.....	38
Figure II.2: représentation fréquentielle d'un signal.....	39
Figure II.3: signal périodique complexe.....	43
Figure II.4: Décomposition en série de Fourier de la fonction $F(t)$	44
Figure II.5: Valeur du balourd.....	45
Figure II.6: Soufflure de fonte.....	46
Figure II.7: Rattrapage du jeu de tolérance.....	46
Figure II.8 : Exemples de défauts induisant un balourd.....	47
Figure II.9: Le déséquilibre statique.....	48
Figure II.10: Déséquilibre dynamique.....	49
Figure II.11: Déséquilibre de couple.....	49
Figure II.12: Points de mesure pour un défaut de balourd.....	50

Liste des figures

Figure II.13: Points de mesure pour un défaut de balourd sur rotor en porte-à-faux.	51
Figure II.14: Signal vibratoire généré par un balourd.	51
Figure II.15: Spectre théorique d'un défaut de balourd.....	52
Figure II.16 : Défauts d'alignement d'arbres.	52
Figure II.17 : Signal temporel d'un défaut d'alignement.	53
Figure II.18: Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial.....	53
Figure II.19: Images vibratoires d'un défaut d'alignement angulaire.	54
Figure II.20: Désalignement de paliers traduisant par une flexion de l'arbre.	54
Figure II.21: Architecture d'un roulement rigide à billes.....	55
Figure II.22: Défaut de roulement – usure.	56
Figure II.23: Défaut de roulement – dentelure.	57
Figure II.24: Défaut de roulement – bavure.	56
Figure II.25: Défaut de roulement – écaillage.....	56
Figure II.26: Défaut de roulement – corrosion.	57
Figure II.27: Défaut de roulement – cassure.	57
Figure II.28: Défaut de roulement – choc électrique.....	57
Figure II.29: Schéma bruits de fond d'un roulement.....	58
Figure II.30: Schéma du début d'usure d'un roulement.	58
Figure II.31: Schéma du début d'endommagement d'un roulement.	58
Figure II.32: Les caractéristiques des fréquences des défauts de roulement.....	59
Figure II.33: Les lois pour calculer Les caractéristiques des fréquences des défauts de roulement	59
Figure III.1 : Le schéma des stades de contrôle.	85
Figure III.2 : Schéma représentant es étapes de contrôle de produit fini.	85
Figure III.3 : Schéma représentant les types de contrôle et leur objectif.	86
Figure III.4 : Défauts de Soufflures.....	66
Figure III.5 : Défauts de Fissurations.	66
Figure III.6 : Le boroscope.	71
Figure III.7 : Guides du boroscope.....	93
Figure III.8: Vue schématique d'un boroscope.....	94
Figure III.9 : Boroscope rigide.	75
Figure III.10 : Utilisation d'un boroscope flexible (fibroscope) pour inspecter une cavité.	75

Liste des figures

Figure III.11 : Le videoscope industriel.	76
Figure III.12 : Introduction du pénétrant dans les discontinuités par capillarité.....	78
Figure III.13 : Phénomène de ressuage après élimination de l'excès de pénétrant.	78
Figure III.14 : Exemple d'une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par ressuage.	80
Figure III.15 : Exemples de pièces contrôlées par ressuage.....	81
Figure III.16 : Les pénétrants.	83
Figure IV.1: MEDGAZ	86
Figure IV.2 : L'organigramme de Medgaz	87
Figure IV.3 : Les trois filtres principaux	88
Figure IV.4 : Les analyseurs.....	88
Figure IV. 5 : Les compresseurs d'air	89
Figure IV.6 : Unité de la génération du nitrogène gaz	111
Figure IV.7 : La Torche.....	111
Figure IV.8 : Système Skid gaz	112
Figure IV.9 : Les turbocompresseurs	113
Figure IV. 10 : Les turbogénérateurs.....	114
Figure IV.11: Schéma de turbogénérateur.....	115
Figure IV.12 : Turbine à gaz centaur 40.....	115
Figure IV.13 : Générateur diésel	96
Figure IV.14 : Photo Boroscope Olympus	97
Figure IV. 15 : Turbine à gaz et la boîte de vitesse	98
Figure IV.16: Les lieux de l'inspection boroscopique	99
Figure IV.17 : Aubes d'admission et de compresseur	122
Figure IV.18: Aubes du 11 ^{ème} étage	123
Figure IV.19 : Aube directrice GV	123
Figure IV.20 : Injecteur	124
Figure IV.21 : Intérieur de la chambre de combustion.....	125
Figure IV.22 : Tube de torche	125
Figure IV.23 : Aube de turbine 1 ^{er} étage	126
Figure IV.24 : Trois ^{ème} aube et buse de turbine	126
Figure IV.25 : VGV	127

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires	17
Tableau I.2 : Les différents types de vibrations.....	19
Tableau III.1 : Techniques de contrôle.....	69
Tableau III.2 : Tableau montrant les causes et les moyens de prévention des fissuration.	88
Tableau III.3 : Tableau descriptive des types d'inclusion.	73
Tableau III.4 : La description , l'origine et les remèdes des différents défauts.....	74
Tableau III.5:Comparaison des principales caractéristiques des boroscopes rigides, des fibroscopes et des vidéoscopes.	82
Tableau III.6 : Avantages et inconvénients de ressuage.....	84
Tableau III.7 : Les étapes de ressuage.....	85
Tableau IV.1: Liste de verification.....	100

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance préventive des machines tournantes, comme les turbines à gaz, est cruciale pour assurer leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie. Elle vise à anticiper les pannes en surveillant de près l'état de ces machines pour détecter les signes de défaillance potentielle avant qu'ils ne deviennent critiques .

Les défauts courants tels que le balourd, le désalignement, les défauts de roulement ou d'engrenage peuvent être détectés grâce à l'analyse vibratoire, qui permet de mesurer et de surveiller les vibrations émises par les machines en fonctionnement pour identifier les problèmes et planifier les interventions de maintenance.

En complément de l'analyse vibratoire, l'inspection boroscopique fait partie des techniques de CND 'Contrôle non destructif ' est une technique essentielle pour examiner les parties internes des turbines à gaz sans les démonter. Cette méthode permet d'inspecter les zones critiques, comme la chambre de combustion et les aubes de turbine, pour détecter les dommages, l'usure ou d'autres problèmes potentiels qui pourraient affecter les performances du moteur.

L'association de l'analyse vibratoire et de l'inspection boroscopique dans la maintenance préventive des turbines à gaz permet de surveiller de manière proactive l'état de ces machines complexes, d'anticiper les pannes et de planifier les interventions nécessaires pour assurer un fonctionnement fiable et optimal.

L'objectif principal de notre travail porte sur la maintenance préventive par l'inspection boroscopique d'un moteur centaur 40 d'une turbine à gaz.

Pour atteindre notre objectif, nous avons divisé notre travail en quatre (04) chapitres. Dans le premier chapitre nous avons présenté la maintenance d'une façon générale et quelques notions de base sur les vibrations qui sont nécessaires pour l'analyse vibratoire, le deuxième chapitre est consacré à l'analyse vibratoire des défauts. Pour le troisième, il consacre au contrôle non destructif afin de présenter le maximum des défauts mécaniques les plus diagnostiqués, pour le dernier chapitre il se divise en deux parties : une description générale sur la station du MEDGAZ et une étude sur l'inspection boroscopique dans un moteur dans une turbine à gaz .

Enfin on clôture notre étude par une conclusion générale, qui démontre et met en évidence les résultats trouvés .

Chapitre I

Généralités sur la maintenance

Et l'analyse vibratoire

Chapitre I

Généralités sur la maintenance Et l'analyse vibratoire

I.1.Introduction

Selon la définition de l'AFNOR 'Association Française de normalisation', la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé.

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage, de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements. Un service de maintenance peut également être amené à participer à des études d'amélioration du processus industriel, et doit, comme d'autres services de l'entreprise, prendre en considération de nombreuses contraintes comme la qualité, la sécurité, l'environnement, le coût, etc. La maintenance est devenue une véritable source de productivité pour les entreprises.

Les actions correctives et préventives sont maintenant intégrées dans des méthodes et des outils performants afin de garantir la sûreté, la pérennité et la productivité d'une entreprise.

Un complexe d'hydrocarbures possède un parc d'équipements très important qu'il faudrait le maintenir en très bon état de fonctionnement. En d'autres termes, la maintenance est l'ensemble des activités (organisation et gestion) visant à donner un service qui peut garantir en conformité avec les stratégies et les objectifs de production, la disponibilité du complexe [1].

D'autre part l'analyse vibratoire est un élément clé de la maintenance prédictive moderne, offrant aux entreprises la possibilité d'améliorer leur efficacité opérationnelle, de minimiser les temps d'arrêt non planifiés et d'optimiser la durée de vie de leurs équipements industriels réduire les coûts de maintenance grâce à une approche proactive basée sur la surveillance continue des vibrations et l'analyse avancée des données.

I.2. Définition de la maintenance:

I.2.1 Notions sur la maintenance: [1]

En 1994, une première définition normative de la maintenance fût donnée par AFNOR (norme NFX60-010).

En 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. »

I.2.2. Le rôle et l'objectif de la maintenance:

Le rôle principal d'un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leurs valeurs patrimoniales.

Ces capacités opérationnelles sont nécessaires pour servir une commande non pas lorsque l'entreprise peut l'honorer, mais au moment où le client la demande. La valeur patrimoniale peut s'envisager comme l'allongement de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui repousse ou annule la nécessité d'un nouvel investissement, ou en facilite la revente. [2]

L'objectif de la maintenance est ainsi de maintenir les outils de production en état de fonctionner en toute sécurité tout en réduisant les coûts de production. Pour répondre aux enjeux économique croissants, elle est une source d'optimisation voire de profits. [3]

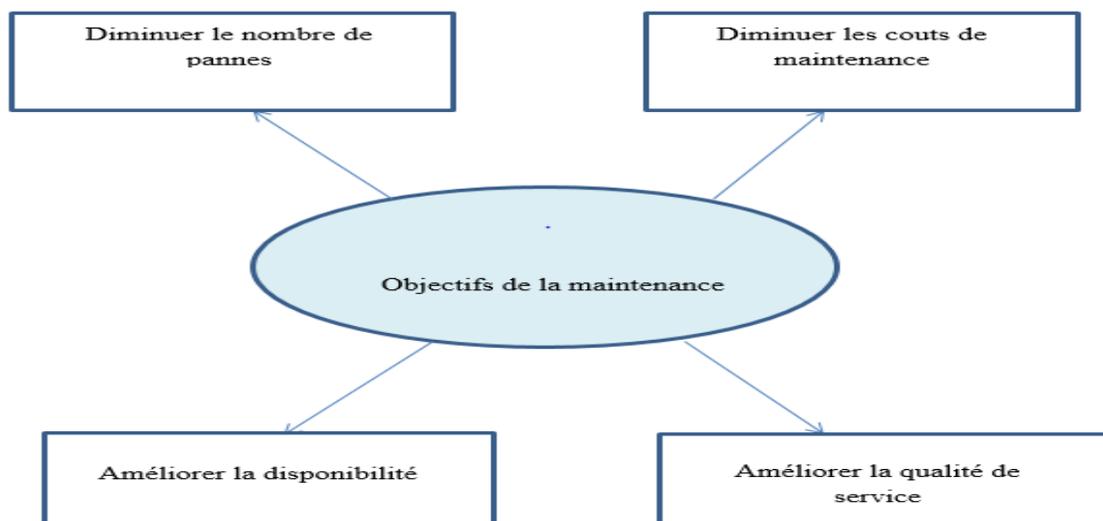


FIGURE I.1: LES OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE.[3]

I.3. Les types de maintenance :

I.3.1. Maintenance préventive : [4]

Dans la définition de la maintenance préventive, on inclue l'ensemble des contrôles, visites et interventions de maintenance effectuées préventivement.

La maintenance préventive s'oppose en cela à la maintenance corrective déclenchée par des perturbations ou par les événements, et donc subie par la maintenance.

La maintenance préventive comprend.

- les contrôles ou visites systématiques.
- les expertises, les actions et les remplacements effectués à la suite de contrôles ou de visites.
- les remplacements systématiques
- la maintenance conditionnelle ou les contrôles non destructifs.

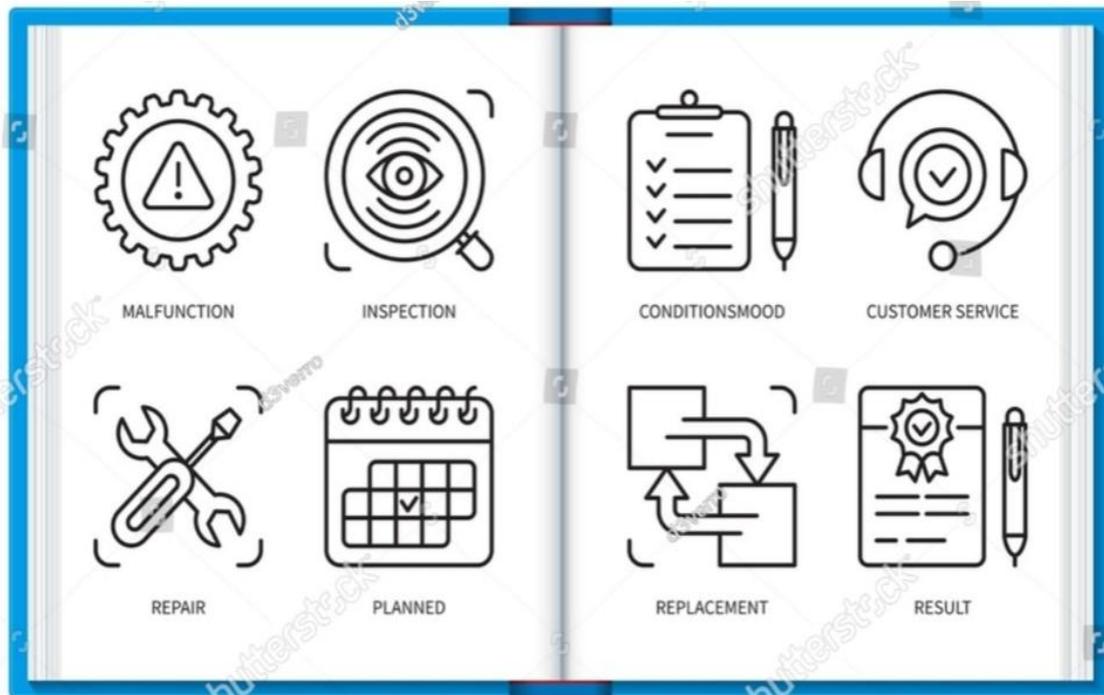


FIGURE I. 2: MAINTENANCE PREVENTIVE.[4]

I.3.1.1. Les différents types de maintenance préventive:

a- Maintenance préventive systématique : [4]

La maintenance systématique est une opération de maintenance réalisée par un technicien de manière régulière selon un certain cycle de temps.

○ **Visites systématiques :**

Les visites sont effectuées selon un échancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage. À chaque visite, on détermine l'état de l'organe qui sera exprimé soit par une valeur de mesure (épaisseur, température, intensité, etc.), soit par une appréciation visuelle. Et on pourra interpréter l'évolution de l'état d'un organe par les degrés d'appréciation: Rien à signaler, Début de dégradation, Dégradation avancée et danger.

Par principe, la maintenance préventive systématique est effectuée en fonction de conditions qui reflètent l'état d'évolution d'une défaillance. L'intervention peut être programmée juste à temps avant l'apparition de la panne.

○ **Remplacements systématiques :**

Selon un échancier défini, on remplace systématiquement un composant, un organe ou un sous-ensemble complet (il s'agit d'un échange standard). Dans la mise en place d'une maintenance préventive, il vaut toujours mieux commencer par des visites systématiques, plutôt que par des remplacements systématiques, sauf dans les cas suivants :

- lorsque des raisons de sécurité s'imposent.
- lorsque le coût de l'arrêt de production est disproportionné par rapport au coût de remplacement.
- lorsque le coût de la pièce concernée est si faible qu'il ne justifie pas de visites systématiques.
- lorsque la durée de vie est connue avec exactitude par l'expérience.

Le risque de remplacement systématique est de changer des éléments encore capables d'assumer le bon fonctionnement pendant un temps non négligeable.

La visite systématique permet tout d'abord de capitaliser les expériences sur le comportement des organes soumis aux conditions d'utilisation réelle.

○ **Ronde ou visite en marche :**

La visite systématique effectuée pendant le fonctionnement permet d'optimiser l'arrêt machine. Pour ce type de maintenance, on suit l'effet de la dégradation ou de l'usure pour éviter le

démontage indésirable. Les contrôles sont simples à réaliser lecture des valeurs des paramètres, examens sensoriels... Les valeurs des paramètres pour un fonctionnement normal sont connues à l'avance. Tout en respectant les règles de sécurité, une surveillance quotidienne en marche permet de détecter rapidement le début d'une dégradation. La durée et la fréquence de ces opérations sont courtes.

Dans la mesure du possible, cette maintenance de premier niveau est confiée aux opérateurs pour les machines de production et aux exploitants pour les utilités. Ce sont eux qui sont le mieux placés pour constater les conditions de l'apparition des pannes.

b- Maintenance préventive conditionnelle : [4]

D'après la définition Afnor, il s'agit de la maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure...)

La maintenance conditionnelle permet d'assurer le suivi continu du matériel en service et la décision d'intervention est prise lorsqu'il y a une évidence expérimentale de défaut imminent ou d'un seuil de dégradation prédéterminé. Cela concerne certains types de défaut, de pannes arrivant progressivement ou par dérive. L'étude des dérives dans le cadre des interventions de maintenance préventive permet de déceler les seuils d'alerte, tant dans les technologies relevant de la mécanique que celles de l'électronique.

Au cours de la conception d'une installation, on définit des tolérances pour certains paramètres. La variation progressive d'un paramètre n'implique pas la défaillance d'un organe. Mais lorsqu'un paramètre sort de la tolérance, le fonctionnement peut être complètement perturbé.

Le suivi de l'évolution des paramètres permet de préciser la nature et la date des interventions. Le paramètre suivi peut être :

- Une mesure électrique (tension, intensité...).
- Une mesure de température.
- Un pourcentage de particules dans l'huile.
- Un niveau de vibration.

On choisit comme paramètre à suivre celui qui caractérise le mieux la dégradation des composants ou la cause de la perturbation de fonctionnement. [4]

c- Maintenance préventive prévisionnelle :

La maintenance prévisionnelle, ou maintenance anticipée est une « maintenance conditionnelle exécutée suite à une prévision obtenue grâce à une analyse répétée ou à des caractéristiques connues et à une évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien ».

Le principe de la maintenance prévisionnelle est le suivant : tout élément manifeste des signes, visibles ou non, de dégradation qui en annoncent la défaillance. Le tout est de savoir reconnaître ces signes précurseurs. Des appareils permettent de mesurer cette dégradation, laquelle peut être une variation de température, de vibration, de pression, de dimension, de position, de bruit, etc. Ces dégradations peuvent donc être d'ordre physique, chimique, comportemental, électrique ou autre. Le but de cette maintenance est d'agir sur l'élément défaillant au plus près de sa période de dysfonctionnement.

Elle permet aussi de suivre une dégradation dans le cas d'une durée de vie variable d'un élément. Toutes ces actions permettent donc de réduire la fréquence des pannes tout en optimisant la fréquence des interventions préventives. [5]

I.3.1.2. Les objectifs visés par la maintenance préventive : [6]

Les objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants :

- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service

réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité.

- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement.
- Améliorer l'ordonnement des travaux, donc les relations avec la production.
- Réduire et régulariser la charge de travail.
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues).
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses).

Plus globalement, en réduisant la part « d'imprévu », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension).

I.3.2. Maintenance corrective :

La maintenance corrective est souvent perçue comme la forme primaire de la maintenance car l'intervention a lieu « en urgence » une fois la défaillance survenue. La logique de cette politique de maintenance est assez simple : lorsqu'une machine est défectueuse, il faut la réparer, ce qui sous-entend que si elle fonctionne, on n'y « touche » pas.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus [7] [8].

I.3.2.1. Les différents types de maintenance corrective :

a- Maintenance palliative :

Opération destinée à remettre un équipement dans un état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises. L'intervention a un caractère provisoire dans le sens où elle nécessitera forcément une intervention ultérieure [7].

b-Maintenance curative: Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Elle se caractérise par la recherche des causes initiales d'une défaillance en vue de réparer l'équipement.

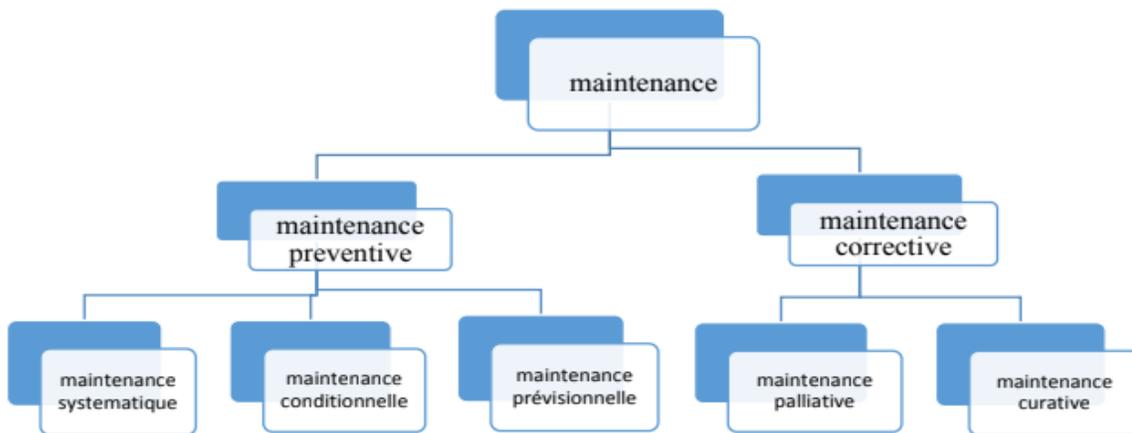


FIGURE I. 3: LES DIFFERENTS TYPES DE MAINTENANCE.[7]

I.4. Organigramme du service maintenance

Il s'agit d'une représentation schématique de la structure d'une entreprise (d'un service) mettant en évidence les domaines de responsabilité de chaque élément composant [10].

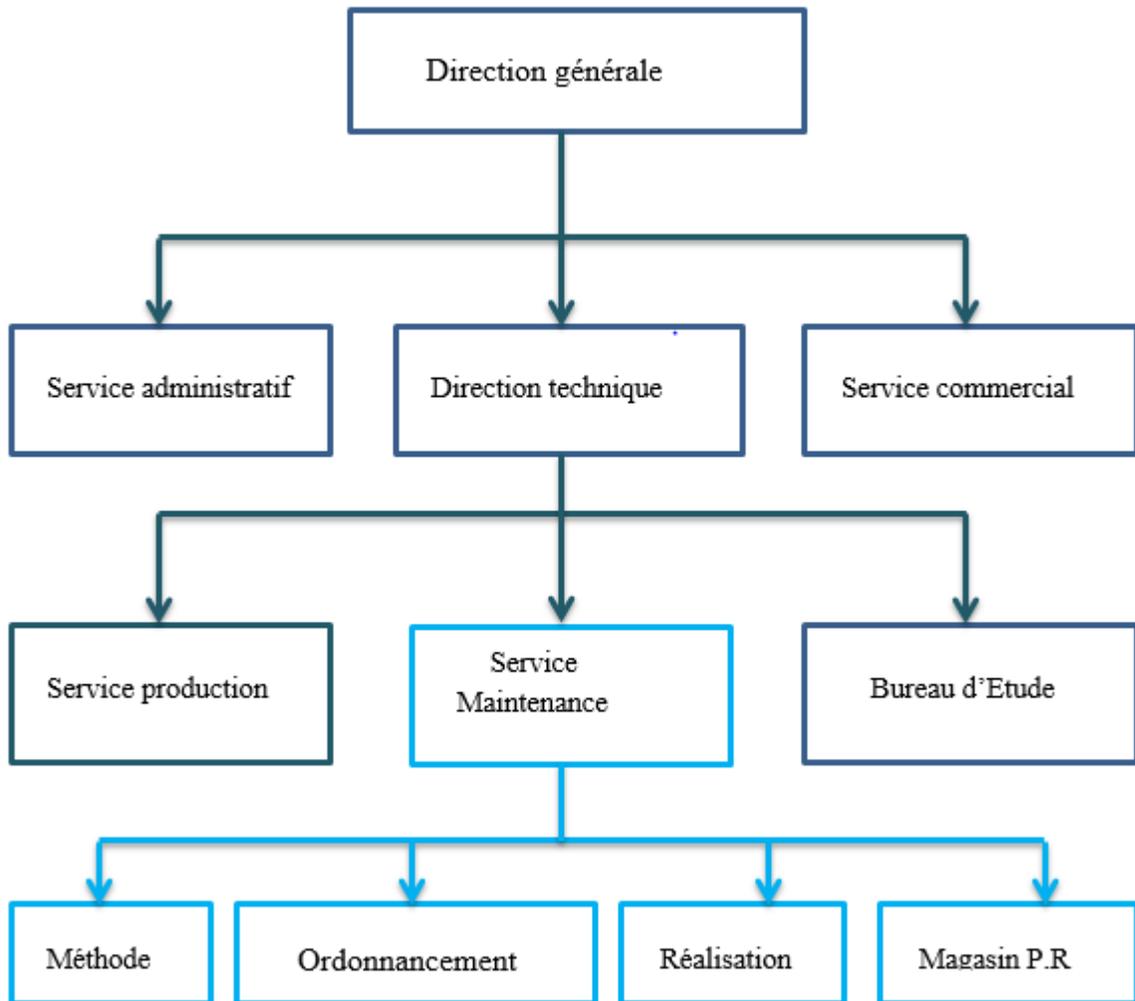


FIGURE I. 4: EXEMPLE DE STRUCTURE D'UNE ENTREPRISE.[10]

Remarque

Magasin P.R : Magasin pièce rechange

I.5. Les fonctions de la maintenance :

Selon la (norme FD X60-000) La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production.

C'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée.

Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise [11].

La figure suivante représente les principales fonctions de la maintenance :

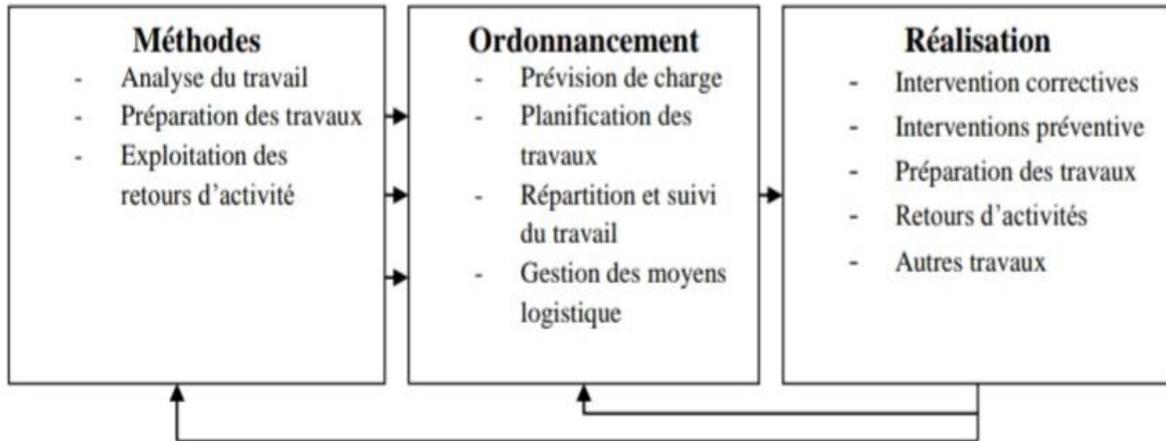


FIGURE I. 5: LES TROIS FONCTIONS OPERATIONNELLES DE LA MAINTENANCE.[6]

I.5.1. La fonction méthode : [11]

La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser. Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis « d'accompagner » le prestataire lors de ces travaux sur site.

Les agents méthodes doivent être en phase avec le terrain et doivent également prendre du recul par rapport à l'évènement instantané, qui était seul pris en compte au temps de l'entretien.

I.5.1.1. Le rôle de bureau étude et méthode :

L'agent des méthodes doit remplir un triple rôle :

- Gestion technique des équipements.
- Préparation des interventions curatives et préventives.
- Analyses des coûts et optimisation des méthodes et moyens. [6]

I.5.2. La fonction ordonnancement :

Est le chef d'orchestre de la maintenance. Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées.

Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux, l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux. Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir à l'instant t et un endroit x où un personnel p muni d'un outillage o et des matières m exécutera la tâche M en harmonie avec les autres travaux connexes. La difficulté principale de l'ordonnancement vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer les dépannages à un planning.

La fonction ordonnancement planifie cette « tâche », c'est-à-dire l'heure H et le jour J où elle doit débuter, et où elle doit finir (début et fin de la tâche) [11]

La mission de l'ordonnancement consiste donc à :

- Prévoir la chronologie du déroulement des tâches
- Optimisation l'utilisation des moyens nécessaires, et les rendre disponibles
- Lancer les travaux au moment choisi

I.5.2.1. Le rôle de la planification de maintenance préventive : [12]

➤ **Nettoyer à fond les équipements :**

En peignant des machines, nous pouvons détecter des problèmes que nous n'avons pas vus sous la saleté.

➤ **Mettre en valeur les équipements :**

Pour le point culminant, il est recommandé d'installer des éléments visuels (affiches, illustrations) qui mettent en évidence les principales caractéristiques de l'équipement à prendre à l'aide de certains dispositifs.

➤ **Évaluer la criticité des équipements :**

Toutes les machines devraient normalement avoir un plan de maintenance minimal à réaliser à intervalles fixes. Chaque machine n'a cependant pas la même importance critique, ou criticité.

➤ **Définir un plan de maintenance :**

Une fois identifiés les équipements les plus critiques, on définit le plan de maintenance préventive.

➤ **Gérer les pièces de rechange :**

Il faut d'abord s'assurer d'entreposer les pièces dans un lieu adéquat. On doit toujours prendre garde de ne pas surcharger l'entrepôt de pièces de maintenance, car cela prend de l'espace précieux.

➤ **Améliorer le niveau de maintenance :**

Tout système de maintenance passe principalement par l'utilisateur de l'équipement, qui est le mieux placé pour détecter les défaillances. Mais l'amélioration de l'entretien passe aussi par le fabricant.

I.5.3. La fonction réalisation :

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement [6].

I.6 Les opérations de la maintenance : [6]

I.6.1. Le dépannage :

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement. Compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires (maintenance palliative) avec des conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

I.6.2. La réparation :

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance.

L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

N.B : la réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. Tous les équipements sont concernés.

I.6.3. La surveillance :

(Contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage, cette opération appartient à la maintenance préventive.

- **Les inspections** : activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.
- **Les visites** : opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective.
- **Les contrôles** : vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement. Le contrôle peut :
 - ✓ Comporter une activité d'information.
 - ✓ Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement.
 - ✓ Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

I.6.4. Les révisions :

Ensemble des actions d'exams, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné.

Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles.

Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, Inspections.

I.7. La mesure vibratoire :

I.7.1. Notions fondamentales :

- *Origine des vibrations* : [15]

Toute machine en fonctionnement est le siège de forces internes variables dans le temps de différentes natures :

- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces périodiques (balourd)
- Forces aléatoires (frottements)

Ces forces sont transmises par les composantes de la machine et induisent des déformations de la surface de la structure (vibrations).

- *L'amplitude* : [4]

L'amplitude d'une onde est la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre. On définit

L'amplitude de crête A: l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre.

L'amplitude de crête à crête A : l'amplitude double.

L'amplitude efficace A: le niveau efficace ou le RMS (Root Mean Square).

$$A_{rms} = \frac{A_c \sqrt{2}}{2} = 0.707 A_c \quad (I.1)$$

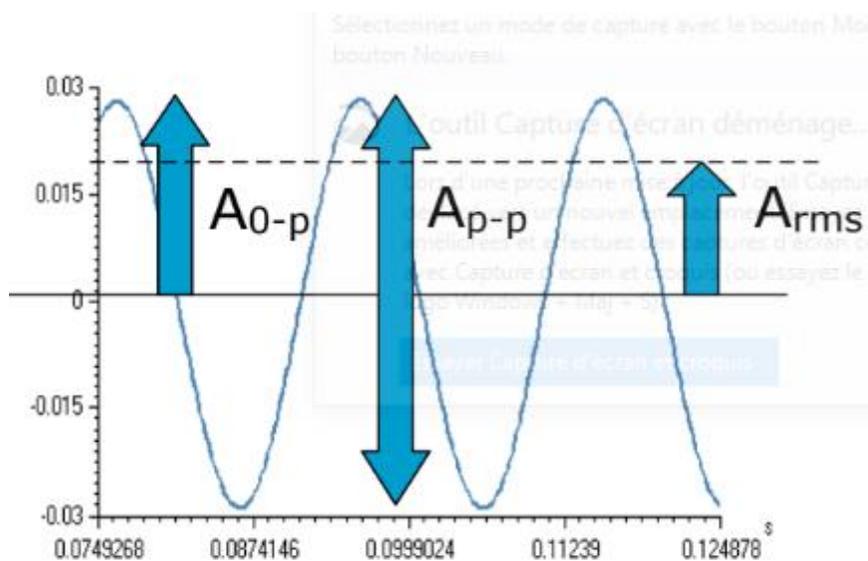


FIGURE I. 6: SIGNAL PERIODIQUE.

- **La fréquence : [15]**

La fréquence F d'un phénomène est le nombre de répétitions (périodes) de ce phénomène en une unité de temps.

La fréquence s'exprime en Hertz.

Hz: nombre de cycles par seconde.

CPM: nombre de cycles par minute.

RPM: nombre de rotations par minute.

Ordre : nombre de cycles par révolution.

- **La période : [15]**

La période T d'un phénomène est l'intervalle de temps séparant deux passages successifs une même position et dans le même sens.

La période s'exprime en secondes (s).

$$T = \frac{1}{F} \quad (\text{I.2})$$

Dans le cas des machines tournantes, la période correspond souvent la durée d'un tour d'arbre.

- **Le déplacement : [15]**

Le déplacement quantifie l'amplitude maximale du signal vibratoire. Historiquement, c'est la grandeur qui fut utilisée en premier car cette mesure était la seule possible avec les moyens de l'époque.

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$d(t) = D \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \varphi) \quad (\text{I.3})$$

L'unité utilisée pour la mesure des déplacements est le micron μm .

- **La Vitesse : [15]**

La vitesse d'un mobile correspond la variation de sa position par unit de temps. Mathématiquement, la vitesse s'exprime comme la dérivée du déplacement par rapport au temps :

$$V(t) = \frac{d[d(t)]}{dt} \quad (\text{I.4})$$

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$V(t) = v \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + \varphi) \quad (\text{I.5})$$

L'unité utilisée est le mm/s .

- **L'Accélération : [15]**

L'Accélération d'un mobile correspond à la variation de sa vitesse par unité de temps. Mathématiquement, l'accélération s'exprime comme la dérivée de la vitesse par rapport au temps.

$$A(t) = \frac{d[v(t)]}{dt} \quad (\text{I.6})$$

Un signal vibratoire sinusoïdal généré par un balourd simple s'exprimera par la relation :

$$A(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t + \varphi) \quad (\text{I.7})$$

L'unité utilisée est le g.

Remarque : Par accord international : $1g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

I.7.2. Vibration et forces internes :

On définit la vibration en tant qu'un phénomène physique oscillatoire d'un corps en mouvement autour de sa position d'équilibre. [13]

Les phénomènes vibratoires sont des phénomènes périodiques aperiodiques plus ou moins complexes. [15]

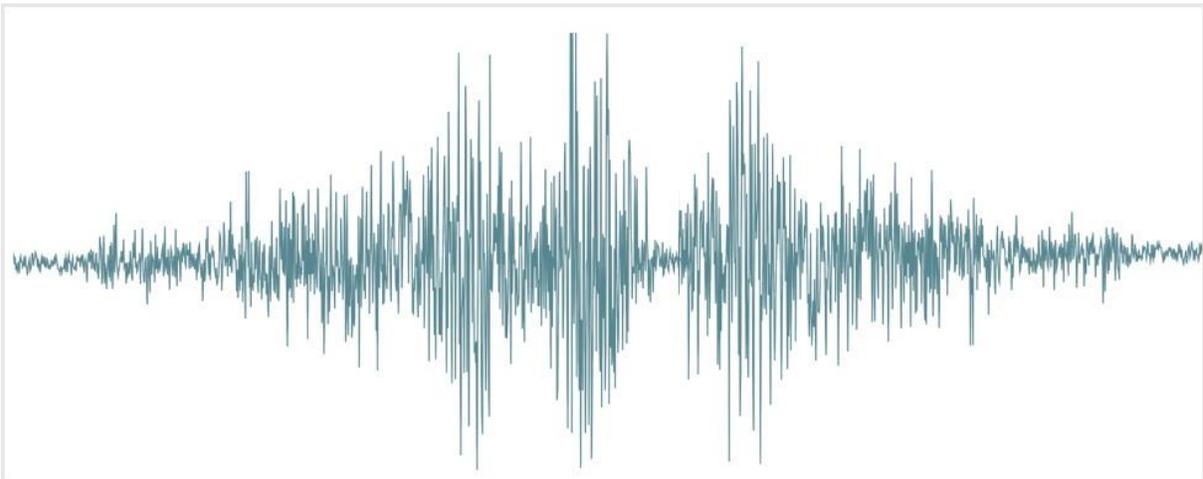


FIGURE I. 7: ILLUSTRATION D'UNE VIBRATION.

D'un autre côté les forces internes agissent entre différentes parties d'une même structure. Il existe quatre types de forces internes différentes : la tension, la compression, la torsion et le cisaillement. [14]

On déduit donc que les vibrations d'une machine peuvent être considérées comme une manifestation extérieure des forces internes. En effet l'analyse de leurs signaux donne des informations sur les processus de dégradations internes.

Il existe deux niveaux d'investigation :

- La mesure de niveau global permet de qualifier un état général par comparaison à des normes ou à des mesures précédentes.
- L'analyse spectrale permet de diagnostiquer l'origine des défauts et de suivre l'évolution en fonction du temps. [4]

I.7.2.1. Mesure de l'état générale d'une machine: le niveau global : [16]

- **Principe**

La mesure des vibrations en niveau global permet de qualifier l'état général d'une machine par comparaison à des normes ou des mesures précédentes. Cette stratégie de surveillance consiste en un suivi de l'évolution dans le temps d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération). Les vibrations mécaniques sont détectées par un capteur de vibrations, monté sur le palier de la machine, qui convertit le signal mécanique en un signal électrique qui sera acheminé à un mesureur de vibrations pour l'analyser et afficher la valeur globale.

Le suivi se fait de deux façons différentes : continu, ou en ligne, ou périodique sous forme de rondes plus ou moins espacées dans le temps. La périodicité des mesures est adaptée en fonction de l'évolution des indicateurs. Plus une augmentation est rapide, plus les contrôles doivent être rapprochés.

Il est obligatoire que les conditions de fonctionnement de la machine ainsi que les conditions de mesure (vitesse, charge, températures etc.) doivent être rigoureusement identiques d'une mesure à l'autre.

- **Choix de la grandeur à mesurer :** Le choix de la grandeur à mesurer (déplacement, vitesse ou accélération) pour la surveillance d'une machine tournante dépend essentiellement du défaut recherché et la plage de fréquences dans laquelle il est susceptible de s'exprimer. La grandeur retenue est appelée paramètre ou indicateur de surveillance.

Indicateur (Niveau global)	Domaine de surveillance
Déplacement ($\mu\text{m c/c}$)	Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz] : balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
Vitesse (mm/s)	Moyennes fréquences [1 000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passage d'aubes, engrènement etc.
Accélération (g)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20 000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...)

Tableau I.1 : Domaine e surveillance des indicateurs vibratoire [16]

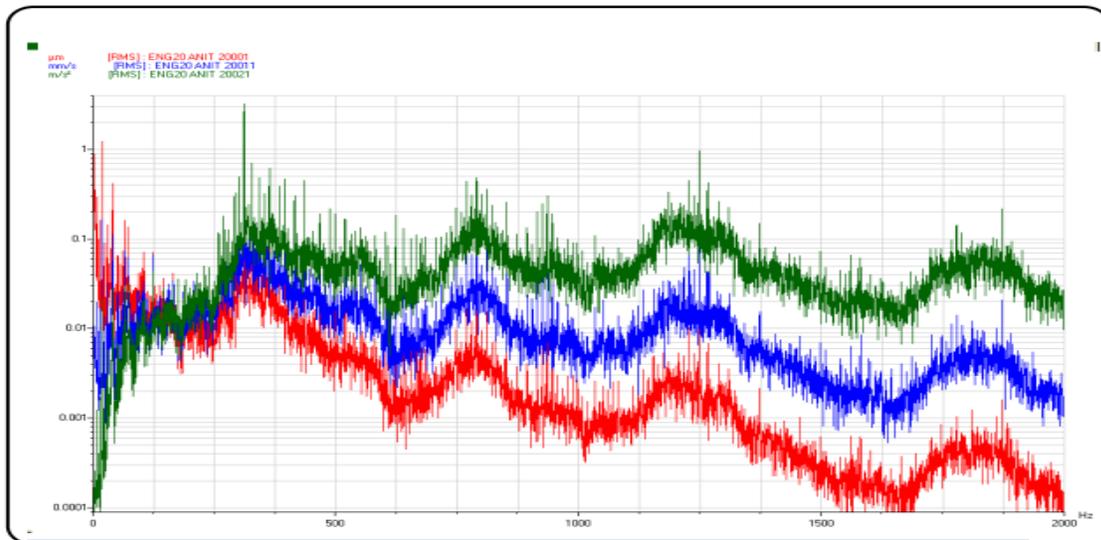


FIGURE I. 8: SIGNAUX VIBRATOIRES EN MODE DEPLACEMENT, VITESSE ET ACCELERATION. [16]

I.7.2.2. L'analyse spectrale :

L'idée d'analyse spectrale fut imaginée par Joseph Fourier (1768-1830) préfet de l'Isère sous Napoléon Ier. Il postula en 1807 qu'un signal périodique peut s'écrire comme une somme de sinusoides. [17]

L'analyse spectrale est une méthode utilisée en physique pour déterminer les caractéristiques d'un phénomène observé. Elle consiste en la décomposition d'un signal en une somme de sinusoides, ce qui permet d'identifier les fréquences et les amplitudes des sinusoides associées, donnant ainsi un spectre de Fourier. Ce spectre est une représentation graphique des fréquences en abscisses et des amplitudes en ordonnées. L'analyse spectrale est largement utilisée dans le domaine des ondes sonores, notamment en musique, pour la détermination de la hauteur et du timbre d'un son. Elle repose sur la transformée de Fourier, qui permet de passer d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle du signal. En pratique, on peut visualiser le spectre d'un signal à l'aide d'instruments tels que l'analyseur à balayage et l'analyseur numérique. [17] [18] [19]

Pour réaliser une analyse spectrale, on peut utiliser la transformée de Fourier, qui permet de passer d'une représentation temporelle à une représentation fréquentielle du signal. En pratique, on peut visualiser le spectre d'un signal à l'aide d'instruments tels que l'analyseur à balayage et l'analyseur numérique. [17] [18] [19]

Selon la nature du signal vibratoire, on obtient un spectre de raies discrètes ou un spectre continu. [4]

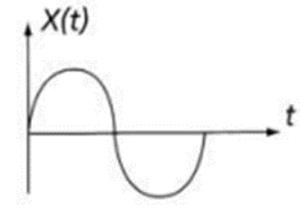
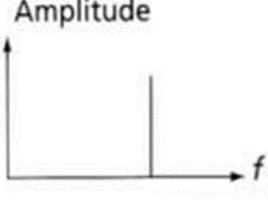
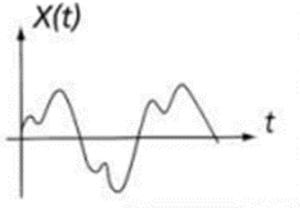
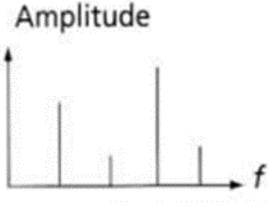
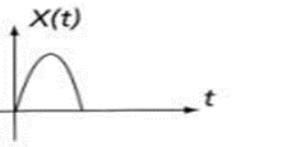
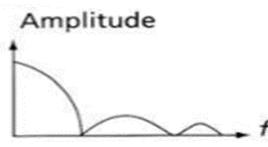
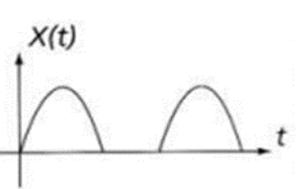
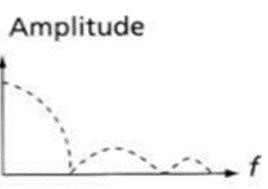
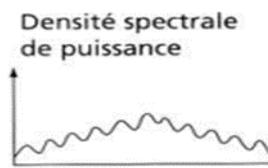
nature de vibration	forme temporelle	forme spectrale	phénomène générateur
Sinusoïdale			Balourd
Sinusoïdale complexe			effort dynamique d'engrènement
Transitoire			explosions, marteaux-pilons, laminoirs
Transitoire périodique			presse automatique, cames
Aléatoire			oscillations de pression exercées sur une structure baignant dans un fluide en écoulement

Tableau I.2 : Les différents types de vibrations [4]

I.8. Les outils de mesure : [4]

I.8.1. La chaîne de mesure :

L'ensemble des éléments indispensables pour obtenir une représentation numérique d'une grandeur physique est appelé chaîne de mesure. Un capteur, un conditionneur, un convertisseur

analogique-numérique, un système de calcul numérique et un dispositif d'affichage sont les éléments essentiels d'une chaîne de mesure.

- Capteur : Convertit une mesure physique en mesure électrique.
- Le conditionneur est un dispositif qui transforme le signal électrique du capteur afin de le rendre exploitable, par exemple en l'amplifiant.
- Le convertisseur analogique-numérique (CAN) permet de convertir le signal analogique en signal numérique afin d'être utilisé par le système de calcul numérique.
- Les opérations nécessaires pour déterminer la valeur de la grandeur physique liée au signal électrique sont réalisées par le système numérique de calcul.
- Dispositif de visualisation : Expose la mesure électronique de la grandeur physique.

De cette manière, une chaîne de mesure permet de transformer des mesures physiques en données numériques utilisables, ce qui facilite leur traitement et leur affichage.

(pour avoir plus des détails vérifier Annexe 1)



FIGURE I.9: MATERIEL DE MESURE ET D'ANALYSE DES VIBRATIONS. [4]

I.8.2. Capteurs de vibration :

Les capteurs de vibration sont des dispositifs utilisés pour mesurer et évaluer les vibrations dans les machines et les installations. Ils sont essentiels pour contrôler la stabilité et la sécurité des machines. Les principaux types de capteurs de vibration sont les analyseurs de vibration et les vibromètres. Les analyseurs de vibration mesurent la vitesse, l'accélération et le déplacement des vibrations, tandis que les vibromètres mesurent également ces paramètres et peuvent être équipés d'une fonction d'analyse de fréquence. [20] [21]

Ces outils sont utilisés pour détecter les bruits des machines, superviser les vibrations et identifier les sources d'erreur potentielles avant qu'une panne ne se produise. [21]

En revanche, les capteurs de proximité sont des dispositifs utilisés pour détecter la présence d'objets ou de conditions spécifiques à proximité, et sont utilisés dans divers domaines tels que l'automobile, l'industrie, la robotique et la sécurité. [21]

I.8.2.1. Accéléromètre :

- Un accéléromètre est un capteur qui mesure l'accélération non gravitationnelle linéaire d'un objet ou d'une structure. [22]

Les différents types d'accéléromètres sont destinés :

- Aux mesures axiales;
- À la surveillance continue;
- À l'utilisation à haute température;
- À la mesure de chocs de fortes intensités... [4]

- L'accéléromètre piézoélectrique fonctionne grâce à l'effet piézoélectrique Il est constitué principalement d'un matériau piézo-électrique (habituellement une céramique ferroélectrique artificiellement polarisée). Lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique, en extension, compression ou cisaillement, il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée. Le capteur piézo-électrique ou l'accéléromètre sont les plus utilisés en raison de leur large gamme de fréquences d'utilisation. [4]



FIGURE I.10: ACCELEROMETRE PIEZOELECTRIQUE.

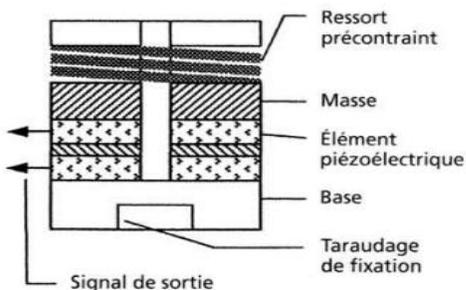


FIGURE I.11: CONSTITUANTS D'UN CAPTEUR PIEZOELECTRIQUE.

I.8.2.2. Vélocimétrie :

C'est un capteur électrodynamique, auto-générateur d'une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine. Le mouvement de la pièce métallique dans les spires provoque une variation du flux, donc une induction de courant dans la bobine.

Citons ses avantages :

- Pas d'amplificateur à haute impédance, ni d'électronique d'excitation.
- Signal de sortie de haut niveau et de faible impédance.

Et ses inconvénients :

- Pièce métallique en mouvement (usure).
- Sensibilité latérale.
- Faible bande passante (10 à 1000 Hz). [4]

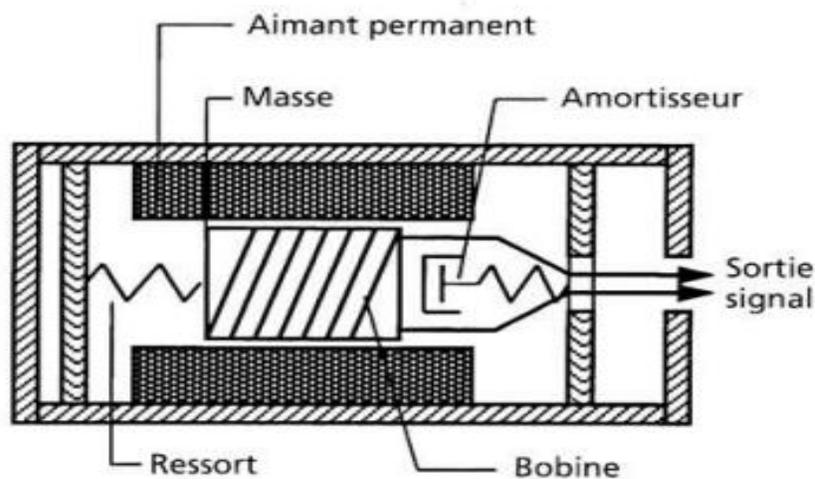


FIGURE I.12: CAPTEUR ELECTRODYNAMIQUE. [4]

I.8.2.3. Capteur de déplacement :

Un capteur de déplacement permet de transformer un déplacement mesuré en signal électrique proportionnel. [23]

Le pont d'impédance est alimenté par un oscillateur de fréquence supérieure à 100 kHz. La partie variable du pont est constituée par un self.

Le pont est équilibré lorsqu'il n'y a pas de tension aux bornes du démodulateur. Dès qu'il y a une modification de l'impédance de la bobine, il y a un déséquilibre du pont, donc une tension aux bornes du démodulateur à la fréquence de l'oscillateur. Cette tension est proportionnelle à la distance entre la cible et la bobine. [4]

Avantages :

- Mesure sans contact.
- Mesure en continu (il existe un signal pour une fréquence nulle).
- Mesure réelle du déplacement de l'axe dans son logement. [4]

Inconvénients:

- Sensible aux hautes fréquences.
- Qualité de mesure dépendant de la qualité de surface.
- Phase relative des vibrations de l'arbre et du palier influençant la mesure, implantation difficile. [4]

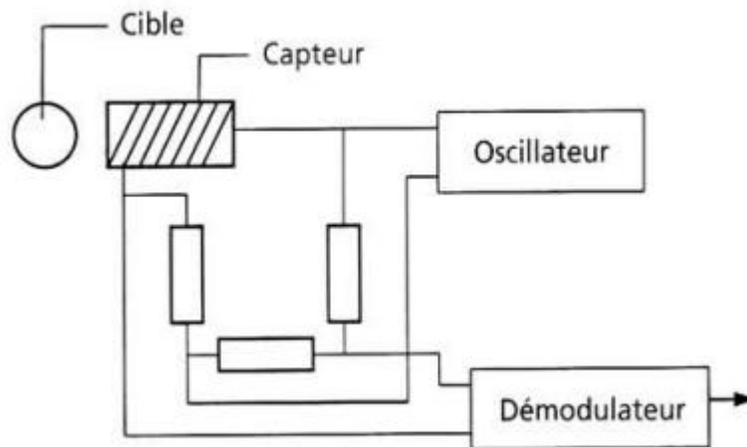


FIGURE I.13: CAPTEUR DE DEPLACEMENT. [4]

I.8.2.4. Capteurs de proximité :

Les capteurs de proximité sont des dispositifs électroniques spécialement conçus pour identifier et détecter la présence ou la proximité d'objets, souvent réalisés sans aucune interaction physique directe.

Ces capteurs sont utilisés pour des applications telles que le suivi de l'état de remplissage d'un réservoir, la détection de la présence d'un objet dans une zone, la surveillance de la sécurité, etc. Les capteurs de proximité sont disponibles en différentes technologies, telles que les capteurs

potentiométriques, les capteurs à courant de Foucault, les capteurs LVDT (Linéaire Variable Différentiel Transformer), les capteurs inductifs et les capteurs à câble. [24]

Cinq grandes technologies occupent les premières places du classement du marché actuel de la détection de présence sans contact : l'optique, l'inductif, le capacitif, le magnétique et l'ultrasonique. [25]

I.8.3. Critères de choix des capteurs:

Pour choisir un capteur adapté à vos besoins, plusieurs critères doivent être pris en compte :

1. Caractéristiques mécaniques : [26]

- La géométrie du capteur (linéaire, rotatif, curviligne, 3D).
- L'échelle de mesure (nombre de degrés, de mm, fréquence).

2. Type de capteur : [26]

- Capteurs à contact (requérant un contact direct avec l'objet) ou capteurs de proximité (sans contact physique avec la cible).
- Différents types de capteurs courants incluent les capteurs optiques, de déplacement, Reed, à fuite, etc.

3. Paramètres de distance : [27]

- Évaluer la distance entre le capteur et l'objet à détecter pour choisir le bon capteur.

4. Sensibilité et précision : [27]

- Considérer la sensibilité, la précision, la rapidité et le niveau d'erreur toléré du capteur.

5. Environnement d'utilisation : [27]

- Tenir compte de l'environnement dans lequel le capteur sera utilisé, car cela peut influencer sa performance.

6. Protection et maintenance : [28]

- Assurer que les capteurs sont protégés et choisir des capteurs nécessitant peu de maintenance pour des performances constantes.

7. Gamme de pression : [28]

- Pour les capteurs de pression, déterminer la gamme de pression nécessaire en fonction des besoins spécifiques.

8. Type de mesure : [29]

- Pour les capteurs de niveau, choisir entre détecteurs (pour des alertes) et capteurs (mesure continue) en fonction des besoins.

I.8.4. Collecteurs de données portables: [4]

Ces appareils présentent l'ensemble des mesures : déplacement, vitesse et accélération. Ils contiennent une mémoire interne importante pour stocker les données et permettent une communication facile avec un ordinateur.

Les paramètres de choix sont essentiellement les fonctions de gestion des circuits de mesure, le dialogue avec l'opérateur, l'ergonomie et le poids.

Certains appareils proposent des fonctions correctives supplémentaires comme l'équilibrage sur site ou le lignage d'arbre au laser.

I.8.5. Logiciels de traitement: [4]

Les logiciels associés aux électroniques de mesure assurent le stockage des données, la mise à jour des historiques, la configuration des appareils, l'établissement des courbes de tendance, l'élaboration de rapports, gestion des alarmes l'aident aux diagnostics.

Et Par ailleurs, ils possèdent aussi les fonctions nécessaires à leur intégration dans le système de communication existant (Ethernet, Modbus, Profibus...).

I.8.6. Mesure globale: [30]

Selon la norme AFNOR E 90-300 : <<L'intensité vibratoire (la mesure globale) est une grandeur caractérisant, de façon simple et globale, l'état vibratoire d'une machine >>.

Dans le jargon de la vibration, l'intensité vibratoire a pour synonymes : sévérité vibratoire, mesure globale, tranquillité de marche. Tout cela montre que cette mesure permet de porter un jugement simple mais grossier sur l'état d'une machine, sans préjuger de l'origine des éventuels défauts.

La mesure la plus facile de l'intensité vibratoire d'une machine consiste à poser la main sur un palier pour en apprécier le comportement.

Dans ce type de mesure, nous allons appréhender les vibrations apparaissant à la surface de la machine, et plus particulièrement.

I.8.6.1 L'appareillage: [30] (par exemple: vibrostor 41, vibrotest 61)

Afin de pouvoir procéder à des mesurages comparatifs, il convient de définir les caractéristiques de l'appareillage.

La norme française **AFNOR E 90-100** décrit précisément ces caractéristiques. Cette norme française présente une large concordance avec la norme internationale **ISO 2954** et la norme allemande **DIN 45 666**.

Le point le plus important de ces normes est le suivant :

**La grandeur de mesure de l'intensité vibratoire est
la vitesse vibratoire efficace**

Elle est définie par les équations suivantes :

$$v_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (I.8)$$

$$v_{eff} = \sqrt{1/2 \cdot (v_{1\ eff}^2 + v_{2\ eff}^2 + \dots + v_{n\ eff}^2)} \quad (I.9)$$

Où n_{eff} : est la vitesse vibratoire efficace de la composante à la fréquence f_n .

La gamme de fréquence de l'appareillage doit être comprise entre **10** et **1000 [HZ.]**

I.8.6.2. La procédure : [30]

Après s'être assuré que l'appareillage dont on dispose est bien normalisé, on mesurera l'intensité vibratoire d'une machine selon la procédure décrite dans la norme française **AFNOR E 90-300**. Cette norme présente une large concordance avec la norme internationale **ISO 2372**, La norme allemande **VDI2056** et la norme britannique **BS 4675**.

I.8.6.3. Définition: [30]

Selon cette norme, l'intensité vibratoire est<<la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace, dans la gamme de fréquence 10-1000 HZ, sur chaque palier, support et bride, dans trois directions perpendiculaires entre elles>> (en général horizontale, verticale, axiale).

I.8.7. Seuil de jugement de l'intensité vibratoire: [30]

Cette norme distingue six groupes de machines. Les critères de distinction sont la puissance, les fondations et la présence d'effet de masse alternative non compensable (par exemple pour les machines à piston). Ces groupes sont définis comme suit:

- **Groupe I** : élément de moteur ou de machines qui, dans leurs conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaire de l'ensemble d'une machine (par exemple moteur électrique produit en série, puissance jusqu'à 15kw).
- **Groupe II** : Machines de taille moyenne (en particulier moteur électrique de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.
- **Groupe III** : moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations lourds et relativement rigides dans la direction des vibrations.
- **Groupe IV** : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

- **Groupe V** : Machines et dispositifs mécanique d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces) montés sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.
- **Groupe VI** : Machines et dispositifs mécaniques d'entraînement avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations. Machine avec masses tournantes accouplées souplement (par exemple arbre de broyeurs). Machines telles que centrifugeuses avec déséquilibre variable, capable de fonctionner isolément, sans l'aide d'élément de liaison, machines à tester la fatigue dynamique et génératrice de vibrations pour les industries de transformation.
- **(Pour avoir plus des détails vérifier Annexe 3)**

I.8.7.1. Valeurs des seuils: [30]

La norme AFNOR E90-300 ou ISO 2372 propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui détermine les domaines suivants figure ... :

- Bon.
- Admissible.
- Encore admissible.
- Inadmissible.

Ces seuils ne sont qu'une proposition basée sur une statique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être modifiés à la hausse.

La norme ne propose aucun seuil de jugement pour les machines des groupes V et VI, car ils comportent les machines alternatives, présente des comportements très variable en fonction du nombre de cylindres, de l'angle entre ces cylindres et du calage des manetons.

Ces groupes comprennent également des machines à balourd variable ou des machines construites spécialement pour vibrer. Les seuils de jugement pour les machines V et VI ne pourront donc être déterminés que par le constructeur ou l'utilisateur.

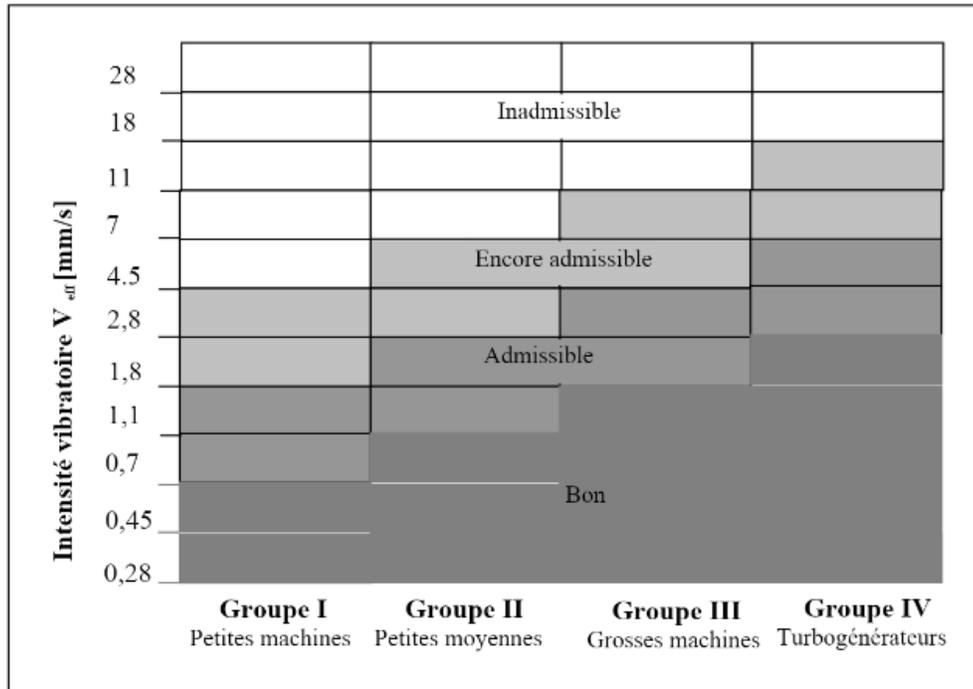


FIGURE I.14: EXEMPLES DE LIMITES VIBRATOIRES PROPOSEES PAR LES NORMES. [30]

I.9. Mesure des chocs : (des roulements par exemple)

L'expérience montre que les défaillances de roulements sont une des préoccupations prioritaires des ingénieurs de maintenance. Ces défaillances sont cependant souvent des épiphénomènes consécutifs à des contraintes anormales dues par exemple à une tension de courroie trop importante, à un défaut d'alignement ou encore à un balourd excessif.

Ces défauts peuvent être détectés suffisamment tôt grâce à un suivi correct de l'intensité vibratoire.

Il reste toutefois de nombreux cas où la cause est directement liée au roulement lui-même : par exemple défaut de lubrification, polluants, plus rarement défaut de fabrication.

Le jugement de l'état d'un roulement au début de sa dégradation présente une difficulté de taille : les très faibles chocs qu'il émet alors sont négligeables en intensité par rapport aux autres vibrations émises par la machine. Ils peuvent par contre être très néfastes pour le roulement et, par voie de conséquence, pour la machine elle-même.

Les vibrations de type pulsionnel figure (I.15) dans les machines tournantes sont généralement engendrées par des chocs (en présence des défauts de type piqûre, strie écaillage dans les roulements) qui induisent des vibrations ou « ondes de chocs » ; de très courte durée, d'amplitude crête importante et se manifestent généralement jusqu'à la haute fréquence. [31]

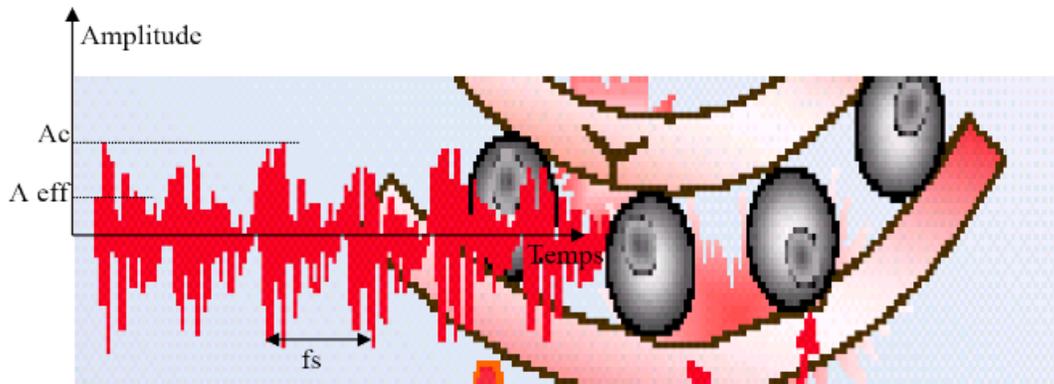


FIGURE I.15: VIBRATION DE TYPE IMPULSIONNEL [31].

Parmi les indicateurs utilisant ces propriétés pour affecter une valeur à l'état de roulement c'est la mesure effectuée dans la plage de résonance du capteur.

Quelques constructeurs des équipements de mesure des vibrations des machines tournantes (par exemple : SCHENCK) donnent une appellation à ce type de mesure comme le BCU (bearing condition unit).

I.9.1 La mesure du BCU: [31] (pour avoir plus des détails vérifier Annexe 2)

Afin de pallier cette difficulté, on doit traiter de deux façons le signal émis par la machine :

- Filtrer les fréquences basses et moyennes.
- Amplifier les hautes fréquences.

Un détecteur spécial (bearing condition detector) n'acquiert que la bande de 13 à 64 kHz.

Ce détecteur tient compte également d'autres paramètres caractéristiques, tel que :

- Valeur crête du signal.
- Fréquence avec laquelle les chocs apparaissent (par exemple : f_s figure (I.14)).

L'unité utilisée est le **BCU**.

Remarque 1: Il faut noter que l'équation mathématique avec laquelle on calcule le BCU en fonction des autres paramètres cités ci-dessus et l'unité de mesure de ce type d'indicateur de l'état de roulement reste propre à chaque constructeur par exemple:

- **BCU:** constructeur SCHENCK.
- **HFD:** (high frequency detector) pour le constructeur SKF.

Mais ce qui est tenu en compte par la majorité des constructeurs dans leurs instruments de mesure de ce type d'indicateurs c'est qu'ils sont définis en fonction des amplitudes crête, efficace du signal, la fréquence d'apparition des chocs (f_s) et le contenu énergétique du signal

dans une bande de fréquence étroite et centrée par la fréquence de résonance du capteur à fin d'amplifier les amplitudes et aussi un filtre qui supprime les basse fréquences.

- La fréquence de résonance des capteurs usuels est environ **13 kHz**.

Remarque 2 : les valeurs de ces indicateurs ne doivent généralement pas être considérées comme des valeurs absolues de dégradation, mais comme des valeurs de base dont l'évolution dans le temps, par rapport à des seuils, sera significative de la dégradation.

I.9.2 Seuil de jugement pour le BCU: [31]

L'acquisition d'un signal de haute fréquence dépend aussi de la manière dont il est transmis. Il dépend donc tout particulièrement de la fixation du capteur (vis, aimant, pointe de touche), mais aussi du nombre d'interface existant entre le défaut et le capteur.

Les chocs émis dépendent eux-mêmes d'autres paramètres, tel que le type de roulement, les matériaux employés, la charge ou la vitesse de rotation de la machine.

Il n'existe donc pas actuellement aucune norme proposant des seuils de jugement pour l'état des roulements. On fait dans la pratique ces seuils seront déterminés par l'exploitant sur la base de mesure qu'il affectera à intervalles de temps régulier dans des conditions de fonctionnement stationnaires et reproductibles.

Par exemple pour le parc des pompes du complexe gazier de HASSI R'MEL et d'après l'expérience acquise dans ce domaine un (BCU =1) suffit pour s'inquiéter de l'état du roulement.

I.10. Comportement dynamique des structures :

I.10.1. Définition du terme 'degré de liberté':

En mécanique, en physique, en statistiques, en robotique et en informatique, le terme "degré de liberté" (DDL) est utilisé. Le nombre de paramètres indépendants ou de mouvements possibles qu'un objet ou un système peut avoir est représenté par ce nombre.

I.10.1.1. Système à un degré de liberté :

Le système physique le plus simple est le système à un seul degré de liberté. En pratique, les systèmes sont beaucoup plus complexes que ce modèle simple. Cependant, pour obtenir une idée approximative des caractéristiques de vibration. [32]

Dans certains cas tels que les effets sismiques, ce modèle est suffisant pour l'étude nécessaire. Les systèmes à un degré de liberté peuvent subir une translation ou une rotation. Les problèmes de rotation liés à la vibration en torsion des systèmes élastiques ont une importance considérable. [32]

Les équations différentielles ordinaires du deuxième ordre sont fréquemment utilisées pour modéliser mathématiquement des systèmes à un degré de liberté. L'équation différentielle suivante donne généralement l'équation du mouvement :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0 \quad (\text{I.10})$$

m : la masse.

k : la constante de raideur.

x : la position.

t : le temps.

I.10.1.2. Système à deux degrés de liberté :

Le comportement vibratoire des systèmes à deux degrés de liberté est étudié en dynamique des systèmes mécaniques. Ces systèmes comportent deux variables indépendantes nécessaires pour décrire complètement leur mouvement. L'analyse de ces systèmes permet de comprendre comment ils se comportent en réponse à des excitations externes, notamment en comparaison avec des systèmes à un seul degré de liberté. [33] [34]

Les vibrations dans ces systèmes peuvent être analysées dans le domaine temporel pour comprendre leur comportement dynamique et leur réponse aux forces d'excitation. [34]

Les principes de la dynamique newtonienne et du formalisme lagrangien peuvent être utilisés pour déterminer les équations de mouvement pour ce système. Ils se présentent sous la forme d'un ensemble d'équations différentielles combinées :

$$m_1 x_1'' + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (\text{I.11})$$

$$m_2 x_2'' - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad (\text{I.12})$$

Où x_1' et x_2' représentent les accélérations des masses m_1 et m_2 , respectivement.

Ce système est appliqué pour ce qui suit :

- 1) **Dynamique des Structures** : Pour simuler le comportement de structures complexes telles que les bâtiments et les ponts, des systèmes mécaniques à deux degrés de liberté sont fréquemment utilisés.
- 2) **Vibrations mécaniques** : comprendre le comportement vibratoire des systèmes à deux degrés de liberté est essentiel dans la conception de machines et d'équipements.
- 3) **Contrôle de Mouvement** : Dans le domaine du contrôle, ces systèmes sont utilisés pour développer des systèmes de contrôle qui stabilisent et régulent le mouvement.
- 4) **Diagnostics et maintenance** : L'analyse des vibrations peut être utilisée pour diagnostiquer des problèmes potentiels de machines et d'équipements, permettant une maintenance préventive.

I.10.1.3. Système à N degrés de liberté :

Un système mécanique à N degrés de liberté est un système dont l'état peut être complètement décrit par N variables indépendantes. Ce système possède N fréquences propres et N modes

propres associés, qui constituent une base pour analyser son comportement vibratoire. Les équations d'équilibre dynamique pour un tel système sont généralement exprimées sous forme matricielle, avec des matrices de masse, de rigidité et de charge. Les systèmes à N degrés de liberté sont étudiés en dynamique des systèmes mécaniques pour comprendre leur comportement vibratoire en réponse à des excitations externes. [35]

On cite quelques caractéristiques de ce système :

- 1) **Coordonnées Généralisées** : sont généralement utilisées pour décrire la configuration d'un système à N degrés de liberté. Ces coordonnées peuvent représenter les positions, les angles, les déplacements ou d'autres paramètres système pertinents.
- 2) **Équations du Mouvement** : Souvent, pour un système à N degrés de liberté, les équations de mouvement sont dérivées de la dynamique newtonienne ou du formalisme lagrangien. Les évolutions des coordonnées généralisées du système au fil du temps sont illustrées par ces équations différentielles.
- 3) **Modes Propres et Fréquences Naturelles** : Les modes du système sont des configurations indépendantes qui oscillent indépendamment sur ses niveaux de liberté N, avec des fréquences naturelles influencées par les caractéristiques du système telles que les masses, les raideurs et les coefficients d'amortissement.
- 4) **Analyse Modale** : Le comportement vibratoire d'un système à N degrés de liberté est souvent étudié à l'aide de l'analyse modale. Il s'agit de déterminer les modes propres, les fréquences naturelles et les formes modales correspondantes.
- 5) **Applications Pratiques** : Les structures complexes, les machines et d'autres systèmes mécaniques utilisent fréquemment des systèmes à N degrés de liberté. Leurs connaissances sont essentielles à la conception, à l'analyse et au contrôle de diverses applications industrielles.

Les équations de mouvement pour ce système :

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad (\text{I.13})$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad (\text{I.14})$$

$$M_N \ddot{x}_N + k_{N-1}(x_{N-2} - x_{N-1}) - k_N x_N = 0 \quad (\text{I.15})$$

Ces équations décrivent le mouvement des N masses et N ressorts interconnectés.

I.10.2. Systèmes continus :

Un système continu est un système où les variations des grandeurs physiques qui le caractérisent sont des fonctions continues. Contrairement aux systèmes discrets, les systèmes continus ont des variations de grandeurs physiques qui varient de manière continue au fil du temps. Ils sont couramment utilisés dans les sciences industrielles et les ingénieries pour modéliser des phénomènes naturels et technologiques. Les systèmes linéaires continus sont

particulièrement importants car ils peuvent être représentés par des équations différentielles à coefficients constants. [36] [37]

I.10.3. Dynamique des rotors:

La dynamique des rotors est un domaine spécialisé de la dynamique des structures, se concentrant sur le comportement vibratoire et dynamique des rotors. Les rotors sont des composants essentiels dans diverses applications telles que les moteurs d'avion, les pompes, les alternateurs, etc. L'étude de la dynamique des rotors est cruciale pour garantir leur bon fonctionnement, leur efficacité et leur sécurité. [38]

Les rotors peuvent être soumis à divers phénomènes vibratoires, tels que les vibrations de flexion qui peuvent être déclenchées par différentes causes. L'analyse du comportement dynamique des arbres et des rotors met en lumière l'importance des vibrations de flexion et d'autres phénomènes liés à la rotation. [39]

La modélisation des rotors par éléments finis est une approche courante pour étudier leur comportement dynamique. Cette méthode permet de représenter de manière précise les différents organes constituant les rotors, tels que les disques, l'arbre, les paliers, etc. De plus, l'utilisation de modèles non linéaires complexes est nécessaire pour capturer avec précision le comportement dynamique des rotors comportant des roulements. [40]

I.11. Théorie de choc :

Peut faire référence à l'étude des chocs émis par les défauts dans les machines tournantes. Ces chocs ne génèrent pas d'accélération importantes, mais ils peuvent être détectés et traités à l'aide de techniques d'analyse vibratoire. [41]

I.11.1. Théorie de choc périodique (chocs à la rotation) :

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine :

- Origine des chocs périodiques externes :
 - Défaut de fixation
 - D'une autre machine (alternative, presse, ...)
- Origine des chocs périodiques internes
 - Dégradation de roulement
 - Dégradation d'engrèvements
 - Jeux excessifs

➤ Typologie des chocs périodiques :

La manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques est un peigne de raies.

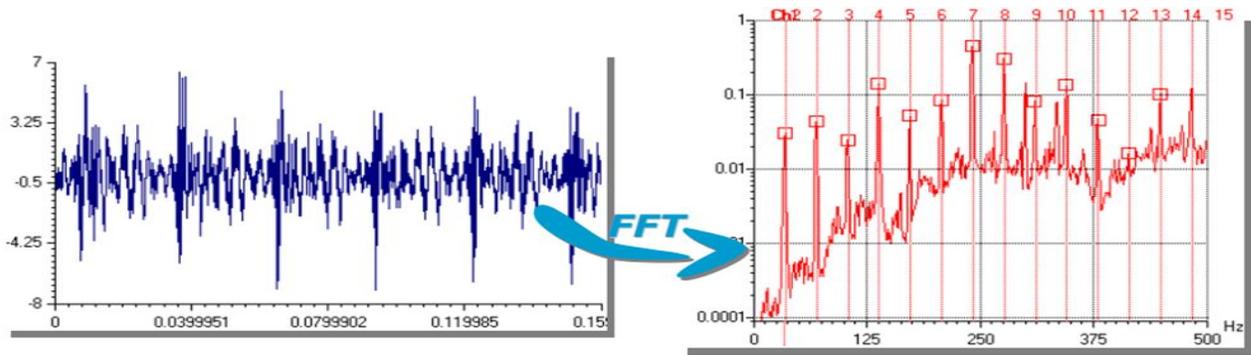


FIGURE I.16: ILLUSTRATION SPECTRALE D'UN CHOC PERIODIQUE.[42]

➤ **Ambiguïtés de diagnostic**

Un peigne de raies peut être généré par des phénomènes autres que les chocs périodiques :

- Balourd important
- Fort délignage
- Phénomènes de modulation
- Amplification par une résonance

La détermination de l'origine exacte de l'allure du spectre constatée (peigne de raies) est souvent délicate. [42]

I.11.1.1. Application d'un choc périodique à une structure:

Pour appliquer un choc périodique vibratoire à une structure, il est nécessaire de comprendre les sources de vibrations et les caractéristiques de la structure. Les chocs périodiques vibratoires peuvent être causés par des sources externes ou par des sources internes telles que des processus de production ou des mouvements de fluides. Les caractéristiques de la structure, telles que sa rigidité, sa masse et sa fréquence naturelle, peuvent influencer la manière dont les vibrations se propagent dans la structure. [43] [44]

Il est possible d'utiliser des équipements de test tels que des vibreurs électromécaniques ou hydrauliques. Ces équipements peuvent générer des vibrations périodiques à des fréquences et des amplitudes spécifiques pour simuler les conditions de fonctionnement réelles de la structure. Les vibrations peuvent être mesurées à l'aide de capteurs de vibration tels que des accéléromètres pour évaluer les effets des vibrations sur la structure. [44] [45]

Il est important de noter que les chocs périodiques vibratoires peuvent être nuisibles pour la structure et peuvent causer des dommages ou des défaillances si elles ne sont pas correctement surveillées et traitées. Les techniques de mesure de vibration peuvent être utilisées pour surveiller les vibrations périodiques et identifier les sources de vibrations indésirables. Des mesures

correctives telles que l'isolation des vibrations, la modification de la structure ou la modification des processus de production peuvent être nécessaires pour réduire les effets des vibrations sur la structure.

I.11.1.2. La réponse des structures à nombre fini de degré de liberté :

La réponse des structures à un nombre fini de degrés de liberté signifie que la dynamique de la structure est décrite par un nombre limité de mouvements principaux, qui peuvent être représentés par le déplacement d'un nombre fini de points ou par l'introduction de coordonnées généralisées [46][47]. Ce type de description est valable pour les structures continues lorsqu'elles sont modélisées par des méthodes numériques telles que les méthodes des éléments finis (MEF) [48], où chaque élément fini est caractérisé par un nombre fini de degrés de liberté[49].

La réponse des structures à un nombre fini de degrés de liberté peut être approximative, car elle ignore certains aspects de la dynamique de la structure, tels que les interactions complexes entre les degrés de liberté [46]. Cependant, cette approximation est souvent suffisante pour obtenir des solutions rapides et pratiques pour la plupart des applications pratiques.

I.11.1.3. Réponse d'un système linéaire a une entrée de type impulsionnel périodise dans le temps :**➤ Réponse impulsionnelle :**

Une brève impulsion, injectée à l'entrée d'un système causal, linéaire, continu et invariant donne en sortie un signal de durée finie appelée réponse impulsionnelle.

Lorsqu'un système linéaire est soumis à une entrée de type impulsionnel périodique, sa réponse est généralement un signe périodique, bien qu'elle puisse ne pas être purement impulsionnelle ni purement périodique. Selon le principe de superposition, la réponse totale du système est la somme des réponses individuelles aux impulsions constituant la séquence périodique.

Si le système est linéaire et invariant temporel (LTI), son comportement est déterminé par sa réponse impulsionnelle unitaire $h(t)$.

La réponse à une entrée périodique peut être trouvée en convolant la réponse impulsionnelle unitaire avec la série de Dirac définissant l'entrée périodique.

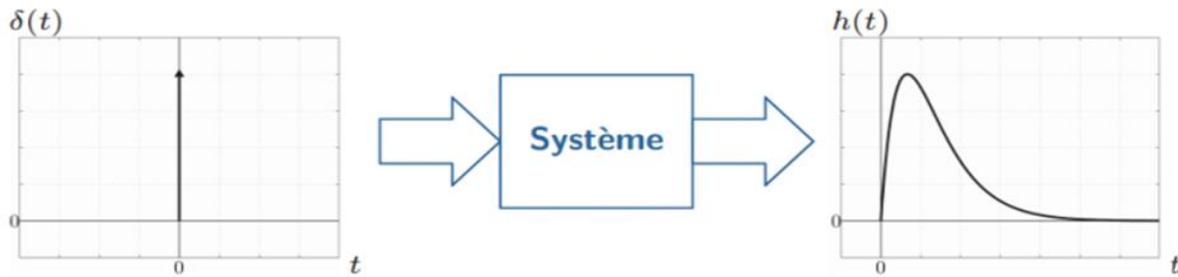


FIGURE I. 17: GRAPHIQUE REPRESENTANT LA REPOSE IMPULSIONNELLE.

[50]

Par exemple, supposons une entrée périodique de la forme $e(t) = E \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kt)$ (I.16), où $\delta(t)$ est la distribution de Dirac et E est l'amplitude de l'impulsion. Alors, la réponse du système sera donnée par : $y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(t - kt)$ (I.17)

Cette expression montre que la réponse du système à une entrée périodique est une combinaison linéaire de ses réponses impulsionnelles unitaire décalées dans le temps [50] [51] [52].

- Avantages de la réponse impulsionnelle :

- caractérisation complète du système (sa fonction de transfert).
- permet de calculer la sortie du système LTI pour d'autres signaux d'entrée [51].

I.12. Application du traitement d'un signal à la reconnaissance des pannes :

Le traitement du signal est une approche utile pour la reconnaissance de pannes dans les systèmes mécaniques, car il permet d'extraire et d'analyser des informations pertinentes contenues dans les signaux collectés.

- Acquisition de données : Capture de signaux provenant de sources variées, comme les vibrations, les forces, les pressions, etc., via des capteurs appropriés.
- Analyse temporelle : Examen des variations du signal dans le temps, permettant de détecter des changements caractéristiques liés aux pannes.
- Transformée de Fourier : Passer du domaine temporel au domaine fréquentiel pour identifier les fréquences dominantes et les harmoniques, qui peuvent être associées à des défauts spécifiques.
- Classification automatisée : Utilisation d'algorithmes de classement pour distinguer les signatures de fonctionnement normales des signatures anormales liées aux pannes. Par exemple, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique, comme les arbres de décision ou les algorithmes de fouineuse d'insectes artificiels.
- Prétraitement du signal : Filtrage, normalisation, segmentation et autres opérations préliminaires pour améliorer la qualité et la robustesse du traitement ultérieur.

- Visualisation et affichage : Présentation graphique des résultats du traitement du signal pour faciliter l'interprétation humaine et la validation des résultats.

Le traitement du signal joue un rôle crucial dans la reconnaissance de pannes en offrant des outils et des techniques pour extraire et analyser les informations contenues dans les signaux collectés.

I.13. Conclusion :

La maintenance et l'analyse vibratoire sont liées de manière étroite et complémentaire. Dans le cadre de la maintenance préventive, l'analyse vibratoire est une technique de surveillance utilisée pour évaluer l'état de santé des équipements tournants.

En conclusion, l'analyse vibratoire est un outil puissant pour la maintenance préventive qui permet aux équipes de maintenance de prendre des décisions éclairées pour assurer la fiabilité et l'efficacité opérationnelle des équipements. Les deux travaillent ensemble pour réduire les dépenses, réduire les interruptions et prolonger la durée de vie des actifs industriels.

Analyse vibratoire des défauts

Chapitre II

Analyse vibratoire des défauts

II.1. Introduction

La méthode d'inspection et de diagnostic fréquemment employée dans les secteurs de l'ingénierie, de la maintenance préventive et de la fiabilité des machines est l'analyse vibratoire des défauts. Son principe repose sur le fait que les problèmes mécaniques dans les équipements génèrent des vibrations spécifiques qui peuvent être repérées, mesurées et analysées afin de déterminer la nature et la gravité des problèmes. L'approche consiste à recueillir des informations vibratoires en utilisant des capteurs spécifiques installés sur les machines ou les structures à surveiller. Après avoir enregistré les vibrations, on les analyse afin d'obtenir des données sur les fréquences, les amplitudes et les formes d'onde. Ces informations permettent de détecter la présence de défauts tels que les déséquilibres, les désalignements, les jeux excessifs, les défauts de roulement, les fissures, etc.

L'étude des défauts par vibration permet non seulement de repérer les problèmes présents, mais également de prédire leur évolution à venir. En surveillant de manière régulière les vibrations d'une machine, il est envisageable de repérer les signes de défaillance et de prévoir des interventions de maintenance préventive afin d'éviter les interruptions imprévues et les dommages coûteux.

II.2. La représentation d'un signal en fonction de temps :

Dans cette représentation, le temps est mis en abscisse et l'amplitude du signal en ordonnée. C'est la représentation la plus naturelle mais qui, dans le cas de signaux audio par exemple, ne correspond pas à notre perception du phénomène. La figure ci-dessous illustre ceci pour un fragment de signal musical. Pour obtenir ce genre de représentation, on utilise le plus souvent un appareil appelé oscilloscope. [53]

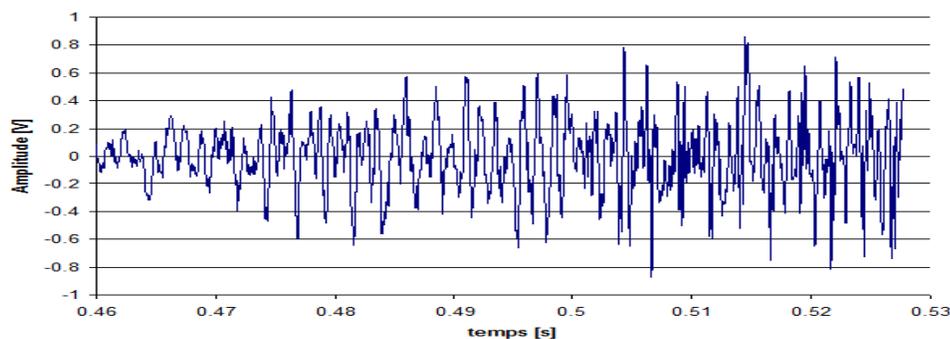


FIGURE II.1:REPRESENTATION TEMPORELLE D'UN SIGNAL. [53]

Une première façon de connaître un signal est d'observer son allure en fonction du temps donnée par l'oscillogramme. L'oscillogramme nous renseigne sur l'amplitude, la valeur crête, la valeur moyenne ... mais pas sur les fréquences contenues dans le signal. [54]

II.3. La représentation d'un signal en fonction de fréquence : [53]

Dans cette représentation, la fréquence est mise en abscisse et l'amplitude du signal en ordonnée. Cette représentation correspond mieux à notre perception des phénomènes audio et vidéo. La figure ci-dessous illustre ceci pour un fragment de signal musical. Pour obtenir ce genre de représentation, on utilise le plus souvent un appareil appelé analyseur de spectre.

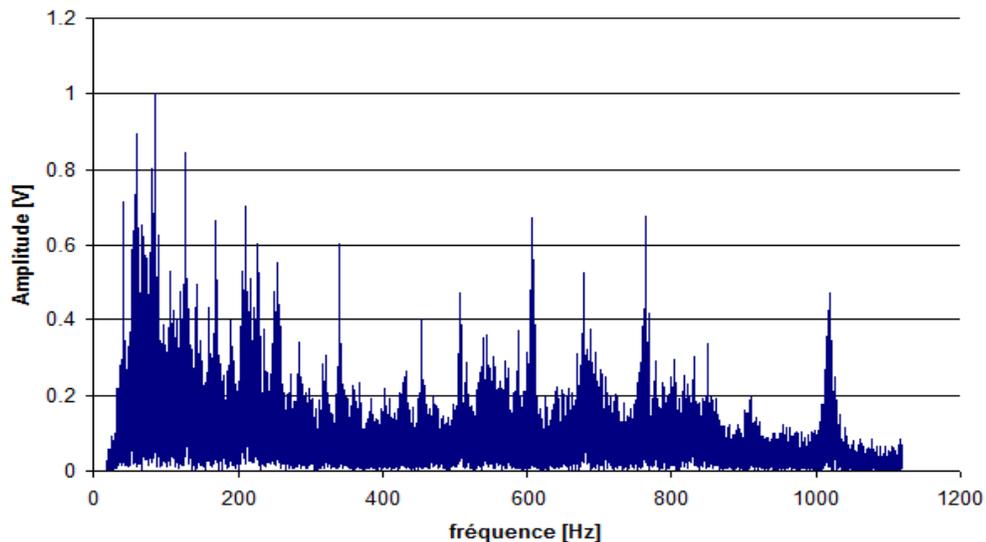


FIGURE II.2: REPRESENTATION FREQUENTIELLE D'UN SIGNAL. [53]

II.4. L'intérêt pratique de l'analyse spectrale :

L'analyse spectrale peut être utilisée dans différents domaines industriels et scientifiques, allant de la surveillance et du diagnostic des équipements à la caractérisation des matériaux et à l'analyse des phénomènes physiques. Cela contribue à améliorer la fiabilité, les performances et la qualité des systèmes. Voici quelques-uns des principaux avantages pratiques de l'analyse spectrale :

- **Diagnostic des problèmes de machines et de structures :**

Les problèmes mécaniques dans les machines et les structures peuvent être détectés et diagnostiqués grâce à l'analyse spectrale des vibrations. En repérant les fréquences, les harmoniques et les modes de vibration, elle permet de repérer les imperfections comme les déséquilibres, les désalignements, les défauts de roulement et les fissures.

- **Optimisation des performances des équipements :**

En examinant attentivement les propriétés spectrales des vibrations, il est envisageable d'améliorer les performances des équipements en repérant les conditions de fonctionnement optimales, en diminuant les vibrations indésirables et en réduisant les risques de défaillance.

- **Prédiction des défaillances :**

Il est possible de repérer les signes de défaillance en observant les variations des caractéristiques spectrales des vibrations. Cela permet de prévoir les éventuelles pannes et de prévoir des interventions de maintenance préventive afin d'éviter les interruptions coûteuses.

- **Contrôle de la qualité des produits :**

C'est employé dans les secteurs de la fabrication afin de surveiller la qualité des produits en repérant les imperfections de fabrication, comme les irrégularités de surface ou les variations dimensionnelles, en se basant sur les caractéristiques spectrales des signaux mesurés.

- **Caractérisation des matériaux et des phénomènes physiques :**

L'analyse spectrale est employée dans les domaines des sciences des matériaux et de la physique afin de caractériser les matériaux, d'analyser les caractéristiques physiques des substances et d'explorer les phénomènes naturels tels que les ondes sismiques, les phénomènes acoustiques et les spectres électromagnétiques.

- **Traitement du signal et des données :**

Elle est utilisée dans le domaine du traitement du signal et des données afin d'obtenir des données pertinentes à partir de signaux complexes. Elle permet de décomposer les signaux en composantes fréquentielles pour compresser les données, détecter des motifs ou classer les signaux.

II.5. Calcul de spectre :

II.5.1. Le pré spectre :

Le terme "pré spectre" désigne une étape initiale du processus d'analyse spectrale où les données sont préparées, modifiées ou extraites afin de faciliter l'analyse spectrale suivante ou de mettre en évidence des caractéristiques essentielles des données. Citons quelques significations possibles de ce terme :

- **Prétraitement des données :** Avant d'effectuer une analyse spectrale, il est souvent nécessaire de prétraiter les données pour éliminer le bruit indésirable, corriger les artefacts ou mettre en forme les données de manière appropriée.
- **Transformée préliminaire :** Dans certaines situations, il est possible de modifier les données avant de les analyser spectralement afin de mettre en évidence certaines caractéristiques ou de simplifier l'analyse. Avant d'être analysées, il est possible de

convertir les données temporelles en données fréquentielles en utilisant des techniques comme la transformée de Fourier ou la transformée en ondelettes.

- **Sélection des caractéristiques :** Le pré spectre peut aussi désigner une étape où les données sont extraites pour extraire les caractéristiques les plus importantes ou les plus pertinentes avant d'être analysées spectralement. Il peut s'agir de choisir des variables, de diminuer la dimensionnalité ou d'extraire des caractéristiques afin de faciliter l'analyse et d'améliorer les performances du modèle.

II.5.2. la transformée de Fourier:

Les vibrations réelles sont infiniment complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres. Néanmoins, ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de composantes élémentaires purement sinusoïdales représentées chacune par leur amplitude A_i et leur fréquence F_i La transformée de Fourier est un des outils utilisés à cet effet. [16]

II.5.2.1 Définition:

La transformée de Fourier est une opération mathématique qui permet de représenter en fréquence des signaux qui ne sont pas périodiques. Elle est l'analogue des séries de Fourier pour les fonctions périodiques, mais s'applique aux fonctions non périodiques considérées comme ayant une période infinie. Cette transformation permet de caractériser un signal par son spectre de fréquence, mettant en évidence l'importance de l'harmonique fondamental et la décroissance des harmoniques de rang plus élevé. De plus, la transformée de Fourier permet d'inverser le processus, c'est-à-dire retrouver la fonction originale à partir de sa représentation en fréquence. [55] [56]

La transformée de Fourier d'un signal $f(t)$, notée $F(\omega)$, est définie comme suit :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (II.1)$$

Où ω est la fréquence angulaire en radians par unité de temps et i est l'unité imaginaire. Cette équation donne la contribution de chaque fréquence ω au signal $f(t)$.

II.5.2.2. Propriétés :

- 1. Linéarité :** La transformation de Fourier est linéaire, ce qui implique que la transformation d'une combinaison linéaire de signaux est égale à la transformation linéaire des transformées individuelles de ces signaux.
- 2. Symétrie :** La transformée de Fourier présente une symétrie complexe conjuguée pour un signal réel, c'est-à-dire $F(-\omega) = F^*(\omega)$, où F^* représente le complexe conjugué de F .

- 3. Transformée de Fourier Inverse :** Grâce à la transformée de Fourier inverse, il est possible de récupérer le signal initial à partir de sa bande passante. Son définition est la suivante : $f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega$ (II.2)

II.5.2.3. Les types de la transformée :

- **Transformée de Fourier Discrète (TFD) :** On utilise la transformée discrète de Fourier pour étudier les signaux discrets, comme les séquences échantillonnées. On la désigne comme suit :

$$\mathbf{X(k)} = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x(n)} \cdot \mathbf{e^{-i2\pi kn/N}} \quad (\text{II.3})$$

Où $\mathbf{x(n)}$ est l'échantillon du signal à l'instant \mathbf{n} , \mathbf{N} est la longueur de la séquence, et \mathbf{k} est l'index de fréquence.

- **Transformée de Fourier Rapide (FFT) :** La transformée rapide de Fourier est un algorithme performant pour évaluer la transformée discrète de Fourier. La séquence est subdivisée en sous-séquences plus petites et elle utilise des propriétés algébriques afin de diminuer le nombre d'opérations requis. La FFT est couramment employée dans le domaine du traitement du signal grâce à sa capacité de calcul rapide.
- **Transformée de Fourier de Temps Court (TFCT) :** On utilise la transformée de Fourier de temps court pour étudier les signaux non stationnaires, c'est-à-dire ceux dont les caractéristiques évoluent au fil du temps. La TFCT subdivise le signal en segments temporels plus petits et calcule-la transformée de Fourier pour chaque segment. Cela permet d'observer comment le spectre fréquentiel évolue au fil du temps.

II.5.2.4. La représentation spectrale et la transformée de Fourier :

Le deuxième type de représentation est la représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme amplitude–fréquence appelé spectre : représentation spectrale. Le signal complexe $F(t)$ difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoïdales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences. [16]

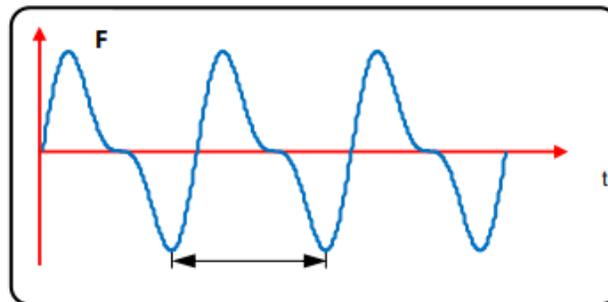


FIGURE II.3: SIGNAL PERIODIQUE COMPLEXE. [16]

L'outil mathématique utilisé est la décomposition en série de Fourier. [16]

Une fonction périodique $f(t)$ de période T peut, sous certaines conditions mathématiques qui seront toujours réalisées dans la pratique en physique, se décomposer en une somme de fonctions sinusoïdales de la forme : (décomposition en séries de Fourier). [57]

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (n \text{ entier et } \omega = \frac{2\pi}{T}) \quad \text{(II.4)}$$

Les coefficients a_0 , a_n et b_n sont indépendants du temps et sont donnés par les intégrales suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt$$

(II.5) (II.6) (II.7)

On remarque que a_0 est la valeur moyenne de la fonction $f(t)$: est donc nul si la fonction $f(t)$ est alternative. [58]

Deux cas particuliers :

- Si la courbe représentative de la fonction $f(t)$ admet un centre de symétrie situé sur l'axe Ox , alors, en choisissant ce point comme origine des temps :

$$f(-t) = -f(t) \quad \text{(II.8)}$$

La fonction $f(t)$ est une fonction impaire ; son développement en séries de Fourier ne comportera que des termes en sinus (les coefficients a_n sont nuls).

- Si la courbe représentative de la fonction $f(t)$ admet l'axe des ordonnées comme axe de symétrie, alors $f(-t) = f(t)$ (fonction paire). Le développement en séries de Fourier ne contient alors que des termes en cosinus ((les coefficients b_n sont nuls). [57]

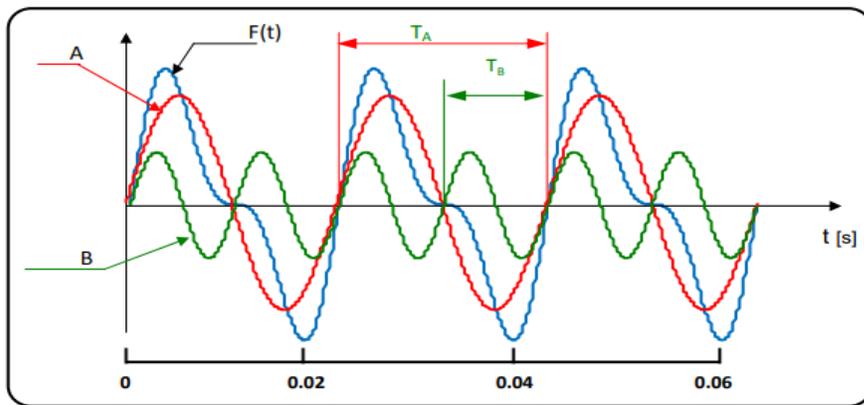


FIGURE II.4: DECOMPOSITION EN SERIE DE FOURIER DE LA FONCTION F(T).[57]

II.6. Les défauts observés dans les machines rotatives :

II.6.1. Le balourd :

II.6.1.1 Définition :

Le déséquilibre, aussi appelé balourd, est l'un des problèmes les plus fréquemment rencontrés dans les machines rotatives. Cela survient lorsqu'il y a une inégalité de distribution de la masse d'un rotor autour de son axe de rotation. Cela engendre un déséquilibre de la force centrifuge, ce qui entraîne des vibrations excessives et peut causer des dommages aux éléments mécaniques et à la structure de la machine.

II.6.1.2. Valeur du balourd : [58]

La mesure quantitative du balourd d'un rotor est obtenue en faisant le produit de la masse de déséquilibre m par la distance r qui la sépare de l'axe de l'arbre (dans le cas de paliers rigides, l'axe de rotation est l'axe de l'arbre). La valeur ainsi calculée est appelée valeur du balourd U où $U = mr$. Les unités de valeur du balourd sont les grammes millimètres ($g \cdot mm$) et les onces pouces.

Une valeur du balourd de $200 \text{ g} \cdot mm$ indique que la "partie lourde" du rotor est équivalente, par exemple, à une masse de 10 grammes à un rayon de 20 millimètres de l'axe de l'arbre ou à une masse de 20 grammes à un rayon de 10 millimètres, comme il est montré à la figure suivante.

De même, la valeur du balourd produit par une masse donnée varie en fonction de sa distance par rapport à l'axe de l'arbre.

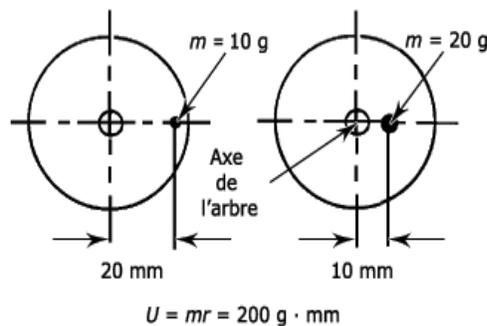


FIGURE II.5: VALEUR DU BALOURD. [58]

II.6.1.3. Causes du déséquilibre : [58]

Il existe différents éléments, voire même une combinaison de différents éléments, qui peuvent expliquer la présence d'un rotor sur une machine. Les principales raisons sont la disparité des matériaux, les variations de fabrication et d'assemblage, ainsi que les changements physiques du rotor en fonctionnement.

a. Non-homogénéité des matériaux :

Il existe parfois des cavités dans les rotors de fonte tels les rotors de pompe ou les poulies de grandes dimensions. Ces cavités, appelées "soufflures de fonte" ou "trous de sable", se forment lors du procédé de moulage.

Un tel défaut ne peut être détecté par une simple inspection visuelle de la pièce. Il constitue néanmoins une source potentielle de déséquilibre.

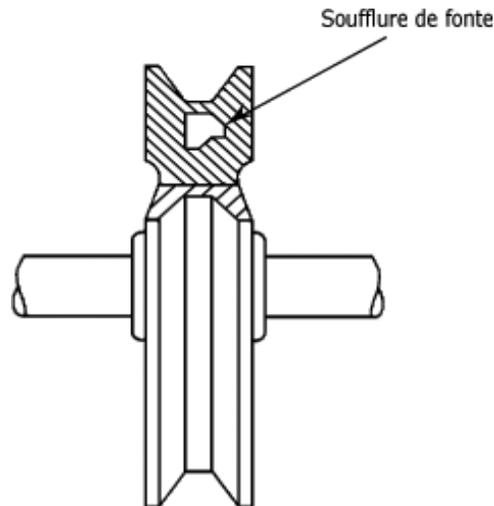


FIGURE II.6: SOUFFLURE DE FONTE. [58]

b. Tolérances de fabrication et d'assemblage :

Une des sources courantes de déséquilibre est l'amoncellement de tolérances de jeu possibles dans le montage d'une machine. L'exemple de la figure suivante est typique de la façon dont les tolérances pour différentes pièces s'accroissent pour produire un déséquilibre.

L'ajustage de la poulie est nécessairement plus grand que le diamètre de l'arbre et, lorsqu'une clavette ou une vis d'arrêt est employée, le rattrapage de jeu cause un déplacement de poids de la poulie vers un côté de l'axe de rotation de l'arbre.

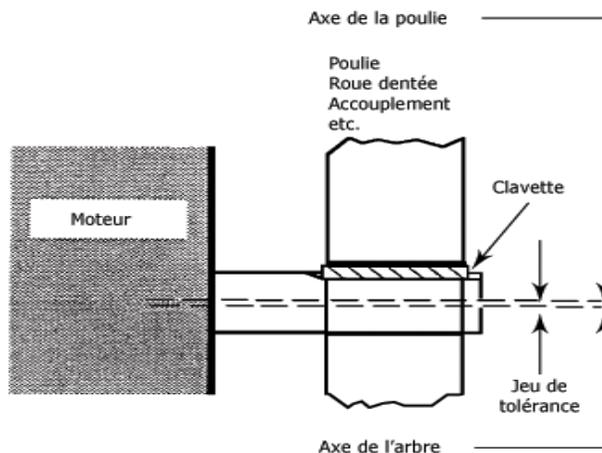


FIGURE II.7: RATTRAPAGE DU JEU DE TOLERANCE. [58]

c. Modification du rotor en opération :

Même si une pièce est raisonnablement bien équilibrée lors de sa fabrication, la déformation thermique, la corrosion et l'usure ou encore l'encrassement du rotor sont susceptibles d'en modifier l'équilibre original.

➤ **Déformation thermique**

On appelle "déformation thermique" la déformation d'un rotor qui se produit à cause d'un changement de température. Il s'agit d'une notion avec laquelle vous devriez être maintenant familier ou familière.

Le métal se dilate naturellement lorsqu'il est chauffé. Toutefois, il arrive qu'un rotor, à cause d'imperfections mineures et d'un chauffage non uniforme, se dilate inégalement. Il s'ensuit une déformation thermique du rotor. Ce phénomène est plutôt fréquent dans les moteurs électriques, les compresseurs et les turbomachines qui fonctionnent à des températures élevées. La déformation thermique peut exiger que le rotor soit équilibré à sa température normale de fonctionnement même s'il a été bien équilibré à la température ambiante.

➤ **Corrosion et usure**

Les rotors utilisés dans la manutention de produits sont sujets à la corrosion, à l'abrasion ou à l'usure. Le déséquilibre apparaît quand l'effet de la corrosion ou de l'usure n'est pas uniforme sur toute la surface du rotor.

➤ **Encrassement**

Les rotors peuvent devenir déséquilibrés à cause de dépôts inégaux de sédiments sur leurs pales (ventilateurs) ou leurs aubes (pompes). L'accumulation graduelle de sédiments augmente le déséquilibre et la vibration qui en résulte peut rapidement devenir excessive. Il arrive que l'encrassement du rotor soit plutôt uniforme. Les problèmes de vibration surgissent alors quand une partie des dépôts se détache.

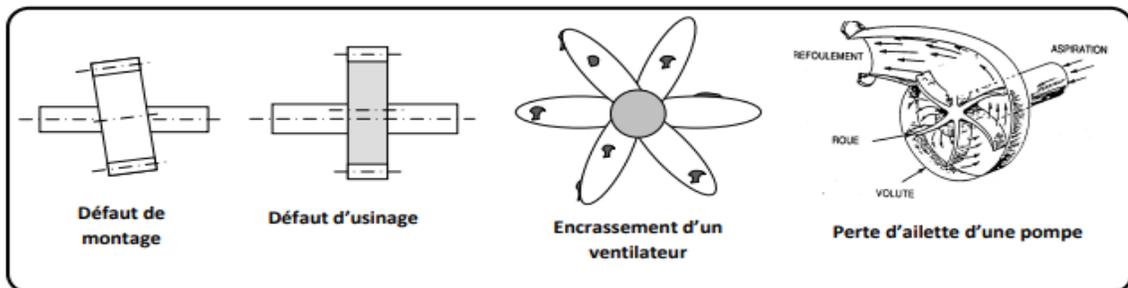


FIGURE II.8 : EXEMPLES DE DEFAUTS INDUISANT UN BALOURD. [58]

d. Forces de déséquilibre :

Pour comprendre comment corriger le balourd, il faut d'abord se familiariser avec les forces qui sont en jeu. La nature de ces forces dépend essentiellement du type de déséquilibre auquel vous avez à faire face. Le déséquilibre peut être statique, de couple ou dynamique : C_g , A.P.I. et ω .

Il est pratiquement impossible de parler de forces de déséquilibre sans inclure les notions de *centre de gravité* (C_g), d'*axe principal d'inertie* (API) et de *vitesse angulaire* (ω). En effet, la définition même des différents types de déséquilibre est fonction de la position du C_g et de l'axe principal d'inertie par rapport à l'axe de l'arbre du rotor. Tout objet matériel quel qu'il soit (un crayon, une voiture ou encore un avion) possède un point par lequel, s'il est suspendu dans n'importe quelle direction, il demeurera en position d'équilibre. On appelle ce point le centre de gravité (C_g).

Le centre de gravité d'une pièce tournante est localisé sur un axe où la masse du rotor est également distribuée de chaque côté. On appelle cet axe l'axe principal d'inertie (API). Dans un rotor équilibré, l'axe principal d'inertie se confond avec l'axe de l'arbre. La vitesse angulaire (ω) d'une pièce tournante quelconque est obtenue en multipliant sa vitesse exprimée en Hz par un facteur 2π qui correspond à une rotation complète du rotor (360°). Aussi, $\omega = 2\pi f$ avec comme unité de mesure le radian par seconde (rad/s).

II.6.1.4. Déséquilibre statique :

Le cas le plus simple de balourd devrait maintenant être familier. En effet, il s'applique à un disque mince d'épaisseur uniforme et de masse M (kg) parfaitement équilibré auquel on fixe une petite masse m (g) à une distance r (mm) de son axe de rotation dans le but de créer un balourd $U = mr$ (g • mm).

Il est possible de constater à la figure ci-après que ce balourd a pour effet de déplacer le centre de gravité C_g d'une distance e par rapport à l'axe de l'arbre. Le déséquilibre statique est justement défini comme étant la condition dans laquelle se trouve un rotor dont l'axe principal d'inertie est déplacé parallèlement à l'axe de l'arbre.

Lorsque le disque de la figure tourne à une vitesse, la force centrifuge F (N) produite par la rotation de la masse de déséquilibre m est donnée par l'équation :

$$F = mr\omega^2 \quad (\text{II.8})$$

Cette force centrifuge équivaut à la force produite par le déplacement e du centre de gravité du disque par rapport à l'axe de rotation.

Elle est donnée par l'équation :

$$F = Me\omega^2 \quad (\text{II.9})$$

Il découle de ces deux équations que $e = \frac{mr}{M}$ et, comme $U = mr$, on obtient finalement l'expression $e = \frac{U}{M}$ où le déplacement e du centre de gravité représente aussi le balourd spécifique, soit le balourd par unité de masse du rotor ($g \cdot \text{mm/kg}$ ou μm).

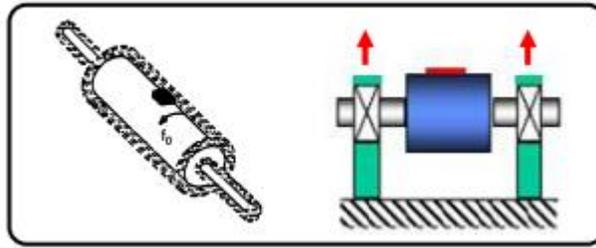


FIGURE II.9: LE DESEQUILIBRE STATIQUE. [58]

Pour corriger un déséquilibre statique, Il faut ramener le centre de gravité sur l'axe de l'arbre du rotor. Cette opération est réalisée en plaçant une masse appropriée en un point diamétralement opposé au balourd et à une même distance radiale.

Quand le balourd est suffisamment important, on peut corriger le déséquilibre statique sans avoir à faire tourner le rotor. En effet, il suffit de poser le disque sur une paire de couteaux parallèles pour que la "partie lourde" du rotor se trouve dans la même position que dans l'exemple montré à la figure II.8.

Par ailleurs, le déséquilibre statique peut être mesuré avec une plus grande précision en faisant tourner le rotor à sa vitesse normale de fonctionnement. La mesure du balourd et sa correction sont alors réalisées à l'aide de machines à équilibrer.

II.6.1.5. Déséquilibre dynamique: [58]

Le déséquilibre dynamique est la condition dans laquelle se trouve un rotor dont l'axe principal d'inertie n'est ni parallèle ni ne coupe l'axe de l'arbre. Le déséquilibre dynamique est montré comme une combinaison d'un déséquilibre statique et d'un déséquilibre de couple ; c'est le type de déséquilibre le plus courant dans les rotors.

Pour corriger le déséquilibre dynamique, il faut mesurer les vibrations pendant que le rotor tourne, puis compenser le balourd dans les deux plans.

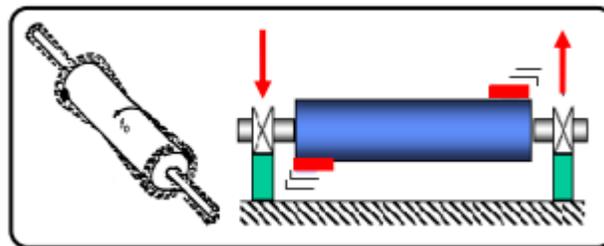


FIGURE II.10: DESEQUILIBRE DYNAMIQUE. [58]

II.6.1.6. Déséquilibre de couple: [58]

Le rotor cylindrique montré à la figure suivante possède un balourd causé par deux masses m_1 et m_2 de valeur égale, placées de façon symétrique par rapport au centre de gravité, mais dans des positions diamétralement opposées l'une de l'autre. Le rotor est en équilibre statique, c'est-à-dire que le centre de gravité se trouve sur l'axe de l'arbre.

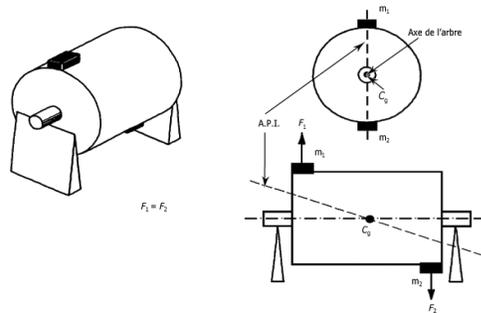


FIGURE II.11: DESEQUILIBRE DE COUPLE. [58]

II.6.1.7. Mesure : [16]

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement (souvent dans la direction radiale horizontale), excepté pour les rotors en porte-à-faux pour lesquels on peut constater également une vibration dans la direction axiale.

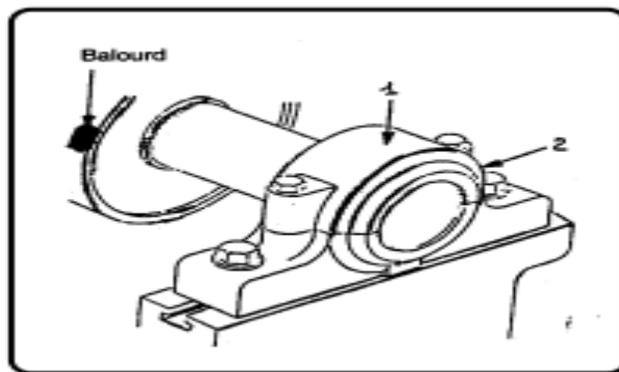


FIGURE II.12: POINTS DE MESURE POUR UN DEFAUT DE BALOURD. [16]

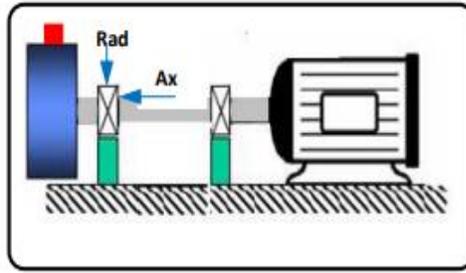


FIGURE II.13: POINTS DE MESURE POUR UN DEFAUT DE BALOURD SUR ROTOR EN PORTE-A-FAUX.

II.6.1.8. Signal vibratoire: [16]

Si on mesure l'amplitude du signal vibratoire délivré par un capteur placé sur le palier supportant un rotor déséquilibré, on remarque que l'amplitude sera maximale lorsque la masse sera en haut du rotor et elle sera minimale lorsqu'elle sera en bas, et ainsi de suite, à chaque tour du rotor. Le signal vibratoire est périodique de période 1 tour, donc de fréquence égale à la fréquence de rotation du rotor.

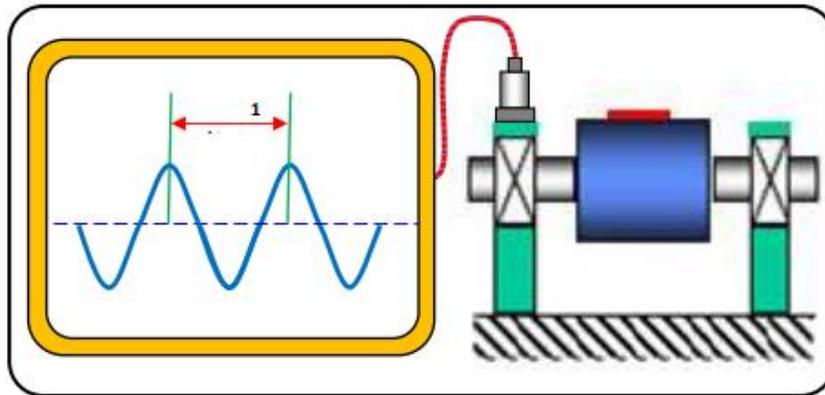


FIGURE II.14: SIGNAL VIBRATOIRE GENERE PAR UN BALOURD [16] .

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont le spectre présente une composante dont la fréquence de base correspond à la fréquence de rotation F_r . Elle représente alors le pic le plus élevé avec des pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de F_r . La bande de mesure est conçue de façon à prendre en compte de légères variations autour de la vitesse de rotation affichée par le constructeur.

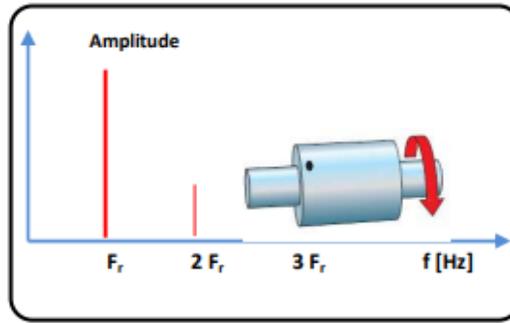


FIGURE II.15: SPECTRE THEORIQUE D'UN DEFAUT DE BALOURD [16].

II.6.2. Défaut d'alignement : [16]

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.

II.6.2.1. Désalignement d'arbres accouplés : [16]

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux.

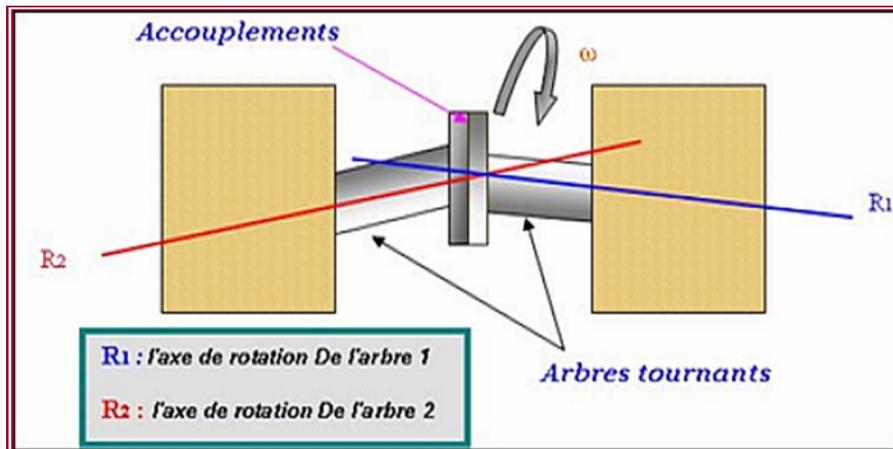


FIGURE II.16 : DEFATS D'ALIGNEMENT D'ARBRES. [16]

a. Désalignement radial

Le signal temporel d'un défaut de désalignement à l'allure de la figure II.17. On retrouve un phénomène périodique à la fréquence de rotation (période = 1 tour), mais également des phénomènes se répétant chaque 1/2 tour et 1/3 tour. Cela se traduira le plus souvent par la présence des composantes de l'ordre 2, 3 ou même 4 fois la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles de la composante d'ordre 1. Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante à, généralement, 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des

amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1. Le même phénomène se manifeste dans la direction axiale.

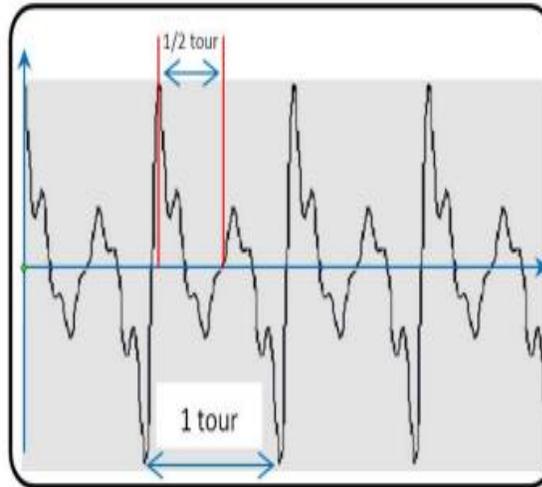


FIGURE II.17 : SIGNAL TEMPOREL D'UN DEFAUT D'ALIGNEMENT [16].

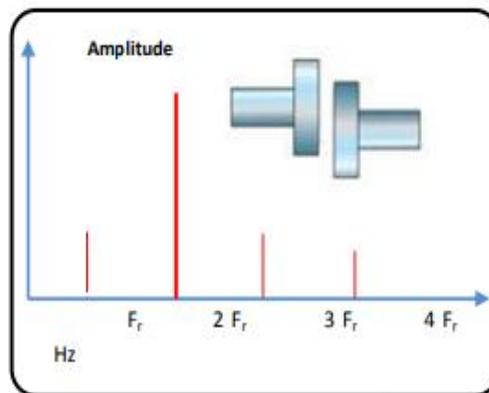


FIGURE II.18: IMAGE VIBRATOIRE D'UN DEFAUT D'ALIGNEMENT RADIAL.

b. Désalignement angulaire

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordre 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes.

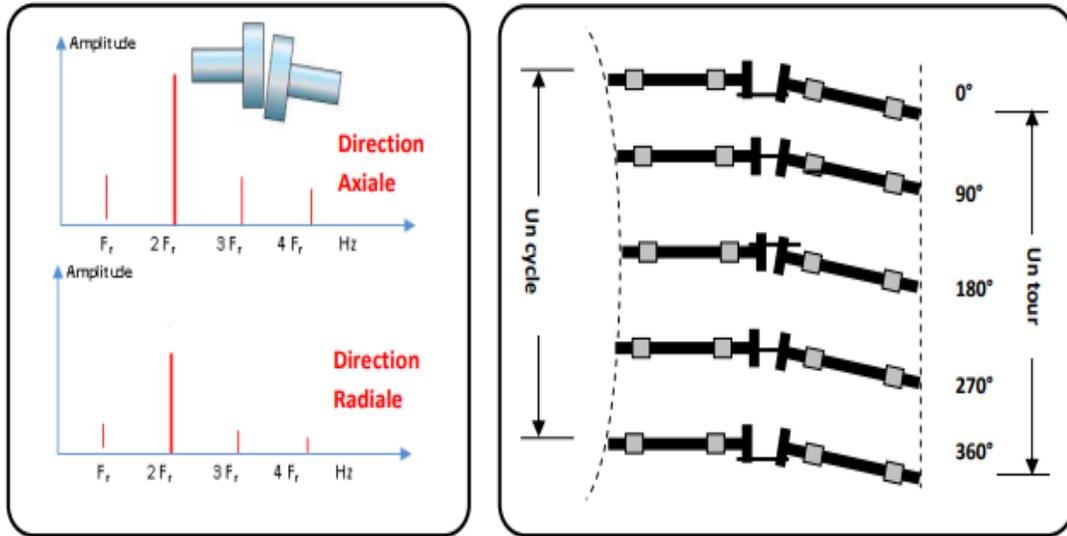


FIGURE II.19: IMAGES VIBRATOIRES D'UN DEFAUT D'ALIGNEMENT ANGULAIRE.

II.6.2.2. Désalignement des paliers : [16]

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques. Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor. La manifestation spectrale de ce type de désalignement est identique à celle du désalignement angulaire.

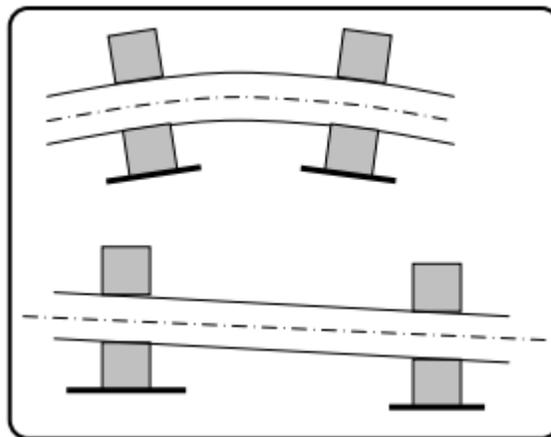


FIGURE II.20: DESALIGNEMENT DE PALIERS TRADUISANT PAR UNE FLEXION DE L'ARBRE.

II.6.3. Défauts spécifiques aux roulements :

II.6.3.1. Architecture des roulements : [59]

Un roulement est un corps formé par deux bagues coaxiales appelées bague interne et bague externe, entre lesquelles existent des corps roulants uniformément espacés par une cage et tournants sur un chemin. Le corps roulant peut être une bille, un rouleau cylindrique ou trapézoïdal. Certains roulements possèdent de plus une flasque qui est une couverture latérale, couvrant l'espace entre les deux bagues externe et interne.

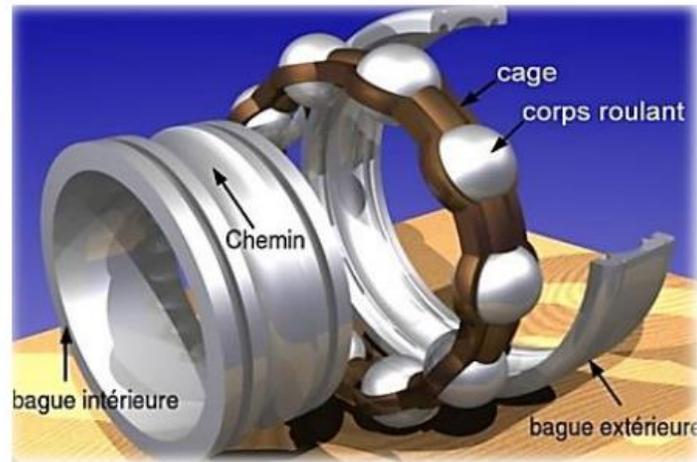


FIGURE II.21: ARCHITECTURE D'UN ROULEMENT RIGIDE A BILLES.

II.6.3.2. Durée de vie des roulements : [60]

La durée de vie théorique des roulements est donnée par la formule suivante :

$$L_{10} = (C / P)^p \quad \text{tours} \quad (\text{II.10})$$

L_{10} = durée de vie en 10^6 tours.

C: charge nominale (donnée constructeur).

P: charge dynamique appliquée au roulement.

$p = 3$ pour les roulements à billes, 3.33 pour les roulements à rouleaux.

La durée de vie d'un roulement sera fortement réduite en fonction des efforts dynamiques auxquels il sera soumis. C'est pour cette raison qu'il est important de corriger les problèmes tels que le délignage, le balourd, le serrage, etc. qui conduisent à une augmentation très forte des efforts dynamiques.

II.6.3.3. Causes des défauts : [59]

Parmi les nombreux défauts qui peuvent se trouver dans un roulement, citons les plus fréquentes entre eux :

1) Usure

L'usure généralement provient de trois causes principales :

- L'usure peut provenir à cause de particules qui pénètrent entre le corps roulant, et les bagues interne et externe. Cela se manifeste généralement lorsqu'il y a un manque de propreté lors de l'assemblage du roulement, ou si le lubrifiant est contaminé par des particules. Une légère dentelure apparaît alors sur les bagues externe et interne, et sur le corps roulant. **(a)**
- L'usure peut encore se montrer à cause d'une lubrification légère ou manquante. Dans une telle situation, le lubrifiant n'est pas capable d'atteindre l'intérieur du roulement, on a besoin d'une ré-lubrification fréquente. Le roulement possède les différentes parties usées et de surface réfléchissante comme un miroir. **(b)**
- La dernière cause qui est responsable d'une telle usure provient d'une vibration excessive qui atteint le roulement sans que celui-ci ne tourne. Généralement, ce type de défaut apparaît lors du transport des machines, sous forme de creux rectangulaires sur le chemin de la bague interne, et circulaires sur le chemin de la bague externe. Plusieurs mesures peuvent être prises pour éviter ce type de défaut. Un pré chargement radial des roulements durant le transport peut résoudre ce problème. Un support amortisseur de vibration peut encore réduire les détériorations. **(c)**

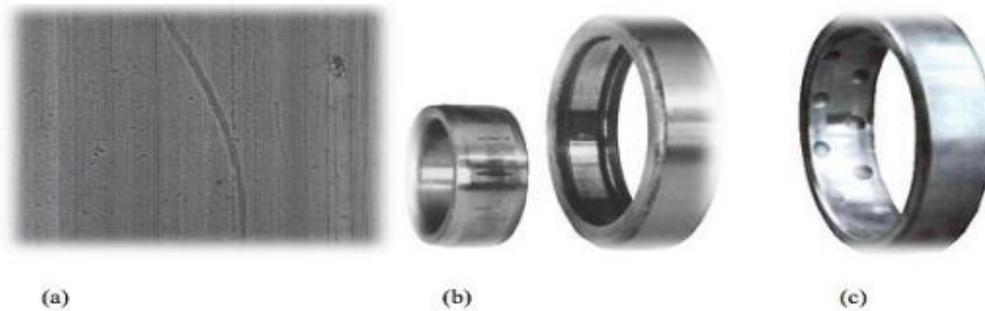


FIGURE II.22: DÉFAUT DE ROULEMENT – USURE. [59]

2) Dentelure

La dentelure apparaît généralement lorsque le roulement n'est pas correctement monté, ou lorsque le roulement est soumis à une grande charge lorsqu'il est immobile. Une dentelure alors apparaît dont la distance entre les fissures est égale à la distance entre les corps roulants.

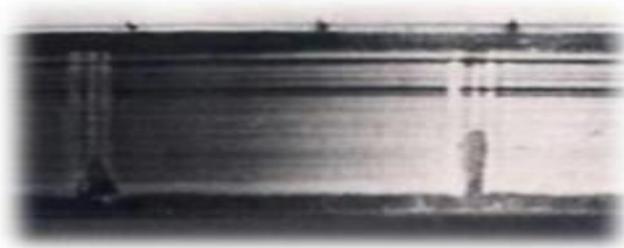


FIGURE II.23: DEFAUT DE ROULEMENT – DENTELURE. [59]

3) Bavure

Le phénomène de bavure apparaît sous forme d'un transfert de la matière d'une surface à une autre. Cela peut être causé par plusieurs facteurs : un manque de lubrification, pénétration du corps roulant dans la zone chargée, une charge légère par rapport à la vitesse de rotation et d'autres... Chaque cas doit être traité de façon à éliminer la cause. Le développement de la bavure conduit à une cassure totale de la bague ou du corps roulant.



FIGURE II.24: DEFAUT DE ROULEMENT – BAVURE. [59]

4) Ecaillage

L'écaillage apparaît normalement à cause du vieillissement du roulement, mais ce n'est pas la raison unique pour que cet écaillage apparaisse, celui-ci peut arriver à cause d'une grande différence de température entre la bague interne et externe, de même, si le boîtier qui porte le roulement possède la forme ovale, on obtient le même résultat, il faut changer le boîtier immédiatement. D'autres causes peuvent être : un montage incorrect du roulement, ou une liberté axiale légère qui n'est pas suffisante pour le mouvement de la dilatation.



FIGURE II.25: DEFAUT DE ROULEMENT – ECAILLAGE. [59]

5) Corrosion

Elle apparait après la présence de l'eau ou de l'humidité pour une longue période dans le roulement. La corrosion peut entraîner à la cassure d'une bague ou du corps roulant. Pour la corriger, il faut utiliser un meilleur lubrifiant antirouille.

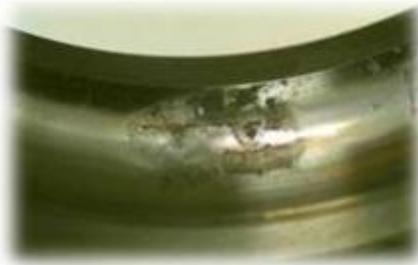


FIGURE II.26: DEFAUT DE ROULEMENT – CORROSION. [59]

6) Cassure

La cassure provient dans la plupart des cas d'une mauvaise manipulation du roulement, par exemple lui donner un coup de marteau au temps de montage. la cassure peut encore provenir d'une corrosion ou d'une bavure.

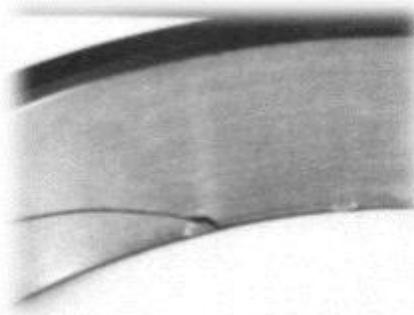


FIGURE II.27: DEFAUT DE ROULEMENT – CASSURE. [59]

7) Choc électrique

Le passage d'un courant électrique dans un roulement en rotation ou non, peut endommager ces différentes parties.



FIGURE II.28: DEFAUT DE ROULEMENT – CHOC ELECTRIQUE. [59]

II.6.3.4. Processus de dégradation d'un roulement : [60]

Lorsqu'un roulement tourne, les contacts métalliques entre les éléments roulants et les cages émettent des bruits de fond aléatoires. Ce bruit de fond créé un spectre plat.

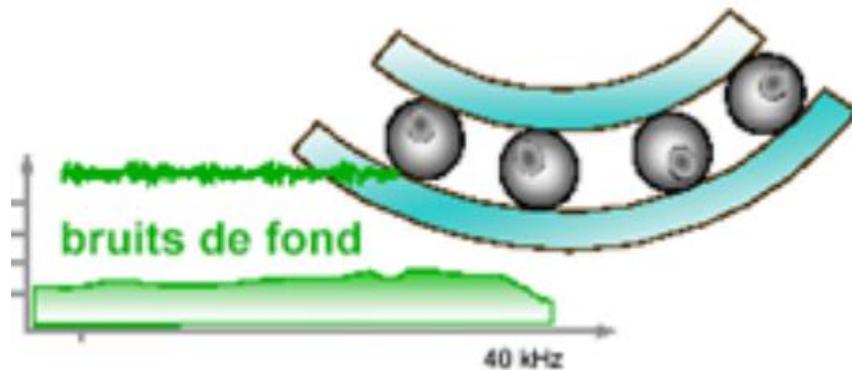


FIGURE II.29: SCHEMA BRUITS DE FOND D'UN ROULEMENT. [60]

La plupart des usures de roulements débutent par une fêlure qui se transforme en craquelure. Et la craquelure va produire des impacts énergétiques en haute fréquence.

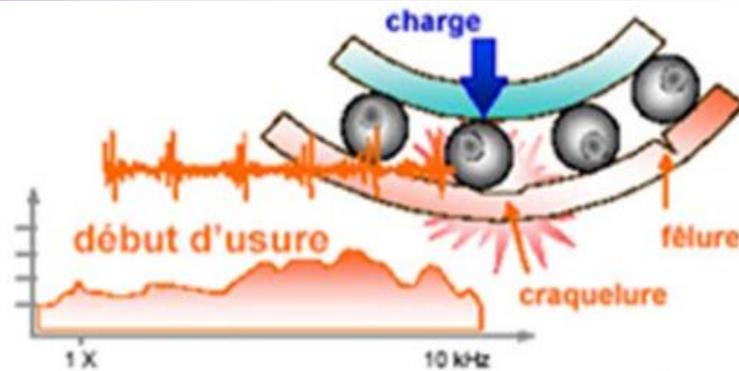


FIGURE II.30: SCHEMA DU DEBUT D'USURE D'UN ROULEMENT. [60]

Au fur et à mesure que l'usure progresse:

- Les défauts tendent à se lisser ;
- Il y a moins d'impacts;
- Le bruit de fond de la bonne piste devient modulé;

Dès que le défaut est significatif, les billes vont éroder la cage interne en sautant.

(pour avoir plus des détails vérifier Annexe 3)

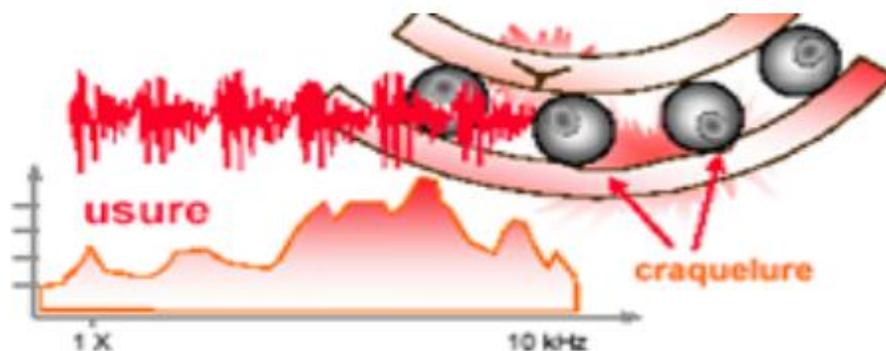
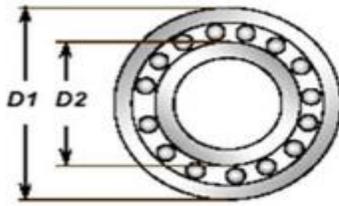


FIGURE II.31: SCHEMA DU DEBUT D'ENDOMMAGEMENT D'UN ROULEMENT. [60]

II.6.3.5. Fréquences caractéristiques : [60]

Pour chaque type de roulement, et en fonction de ses cotes de fabrication, on peut considérer 4 fréquences caractéristiques.



$$DR = \frac{D1 + D2}{2}$$

n = nombre de billes ou de rouleaux
 f_r = fréquence de rotation
 vitesse relative en tr/s entre les pistes intérieure et extérieure.

Figure II.32: Les caractéristiques des fréquences des défauts de roulement

-Défaut sur bague externe: $f_e = \frac{n.N}{2.60} \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right)$

-Défaut sur bague interne: $f_i = \frac{n.N}{2.60} \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos(\beta) \right)$

-Défaut sur bille: $f_b = \frac{D.N}{d.60} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cdot \cos(\beta) \right)$

n : nombre de billes
 N : nombre de rotation

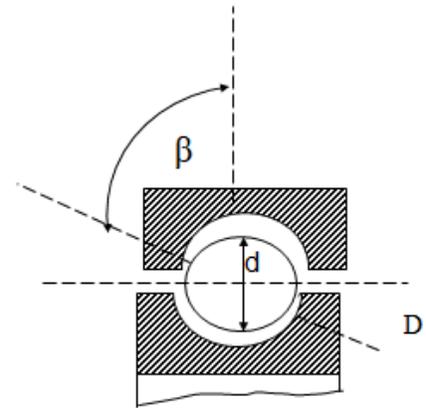


Figure II.33: Les lois pour calculer les caractéristiques des fréquences des défauts de roulement

BPFO = Ball Pas Fréquence Outre Race = fréquence de passage d’une bille sur un défaut de piste externe.

BPMI = Ball Pas Fréquence Inné Race = fréquence de passage d’une bille sur un défaut de piste interne.

FTF = Fondamental 1 train Fréquence = fréquence de passage d’un défaut de cage.

BSF = Ball Spin fréquence = fréquence de passage d’un défaut de bille sur la bague interne ou externe.

Remarque : FTF dépend du montage des roulements. Si la bague externe est fixe et que la bague interne tourne, la formule de FTF est celle vue précédemment. Si la bague interne est fixe et la bague externe tourne, la fréquence de rotation de la cage est :

$$FTF = 0.5 \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{DB}{DR} \cdot \cos\beta \right) \quad (II.11)$$

II.6.4 Défauts des paliers :

Sont des problèmes mécaniques courants qui peuvent compromettre le bon fonctionnement des machines industrielles. L'analyse vibratoire et la détection précoce de ces défauts sont essentielles pour prévenir les défaillances majeures et assurer la fiabilité des équipements industriels.

➤ **Désalignement:**

Le désalignement des paliers se produit lorsque les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques. Cela peut résulter d'un défaut de montage, d'un mauvais calage des pattes de fixation, ou d'une déformation du châssis, entraînant une flexion de l'arbre du rotor. Ce désalignement peut se manifester par des vibrations axiales et radiales, avec des amplitudes significatives [1].

➤ **Balourd**

➤ **Défauts de serrage:**

Un mauvais serrage de la structure de la machine peut générer des vibrations et du bruit. Les spectres typiques mesurés sur des machines présentant un jeu contiennent souvent de nombreux pics à des fréquences multiples de la fréquence de rotation. Ces défauts peuvent être détectés par l'analyse vibratoire et nécessitent une attention particulière pour éviter des dommages plus importants [3].

Outre le désalignement et le balourd, d'autres défauts peuvent affecter les paliers, tels que les défauts de roulements, d'engrenages, de courroies, les vibrations d'axe flexible, les défauts électromagnétiques, et les problèmes spécifiques aux paliers lisses. Ces défauts peuvent être diagnostiqués à l'aide d'outils d'analyse vibratoire et de bancs d'essais dédiés à l'étude des vibrations mécaniques [3].

II.7. Conclusion:

L'analyse vibratoire des défauts est un processus essentiel pour diagnostiquer les problèmes mécaniques des machines industrielles.

En se basant sur les sources fournies, on peut conclure que cette méthode permet d'identifier avec précision les défauts, tels que le déséquilibre des rotors, les défauts de roulements, ou les problèmes de balourd, en analysant les vibrations générées par ces anomalies. En utilisant des techniques avancées d'analyse en fréquences et des outils spécifiques comme les analyseurs de vibrations, il est possible de détecter les défauts mécaniques, de mesurer leur évolution, et d'intégrer ces données dans des programmes de maintenance préventive.

Ainsi, l'analyse vibratoire des défauts offre une approche proactive pour assurer le bon fonctionnement des machines industrielles, prévenir les pannes coûteuses, et prolonger la durée de vie opérationnelle des équipements.

Chapitre III

Contrôle non destructif

Chapitre III

Contrôle non destructif

III.1. Introduction:

Le contrôle non destructif (CND) joue un rôle crucial dans différentes industries afin d'évaluer des produits et des composants sans compromettre leur intégrité. Cette méthode permet de repérer des imperfections ou des défauts sans causer de dommages aux matériaux examinés, ce qui revêt une importance capitale pour assurer la qualité et la sécurité des produits. Les boroscopes, aussi appelés endoscopes industriels, jouent un rôle essentiel dans le domaine du CND. Ces dispositifs de vision à distance, qu'ils soient solides ou souples, envoient des images capturées à un écran, ce qui rend l'examen de zones difficiles d'accès plus facile. Les vidéoscopes, un type de boroscopes avec des caractéristiques vidéo avancées, sont couramment employés dans des domaines tels que l'aviation, l'automobile, la production d'énergie et la maintenance d'éoliennes afin de réaliser des inspections précises et non destructives.

III.2. Définition, moyens et utilisations du contrôle non destructif : [61]

III.2.1. Définition : [61]

Contrôle Non Destructif (CND) : Méthodes de diagnostic de produits, afin de détecter, localiser, dimensionner et caractériser, d'éventuels défauts dans ceux-ci.

III.2.2. Moyens : [61]

Utilisation de capteurs dont le fonctionnement est basé sur les principes de la physique (électromagnétisme, rayonnements, propagation, électricité...)

III.2.3. Utilisations : [61]

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- L'aérospatiale et l'armée.
- L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- L'industrie navale (contrôle des coques).
- L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, ...).
- L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage...).
- Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- L'inspection alimentaire...

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...).
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (nucléaire, canalisation de gaz...).

III.3. Les stades de contrôle : [61]

On peut considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie :

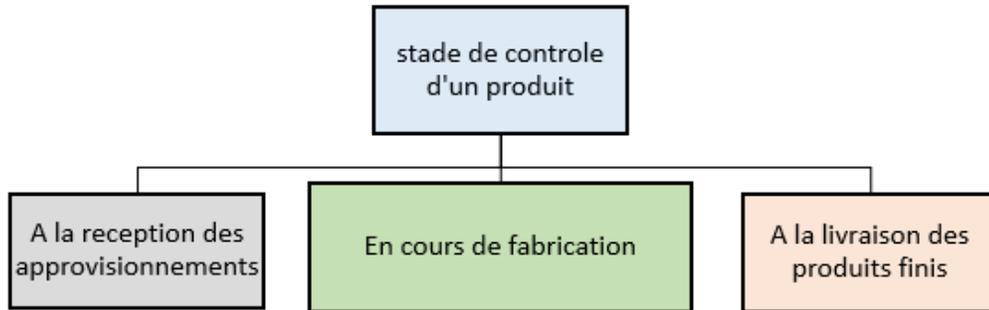


Figure III.1 : Le schéma des stades de contrôle. [61]

III.3.1. Le contrôle de réception: [61]

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison a pour but de respecter de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

III.3.2. Le contrôle en cours de fabrication: [61]

Le contrôle en cours de fabrication est un outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

III.3.3. Le contrôle de produit fini: [61]

Ce contrôle s'effectue sur pièces ou produits finis

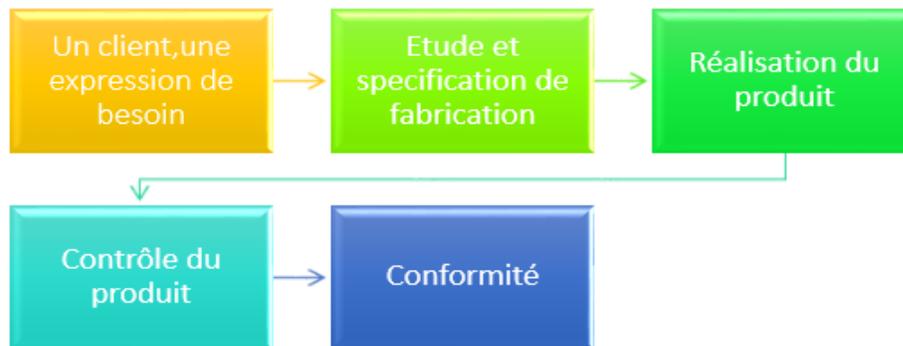


Figure III.2: Schéma représentant es étapes de contrôle de produit fini. [61]

III.4. Les types de contrôle et leur objectif : [61]

On distingue deux types de contrôles :

- ❖ Contrôle destructif,
- ❖ Contrôle non-destructif.

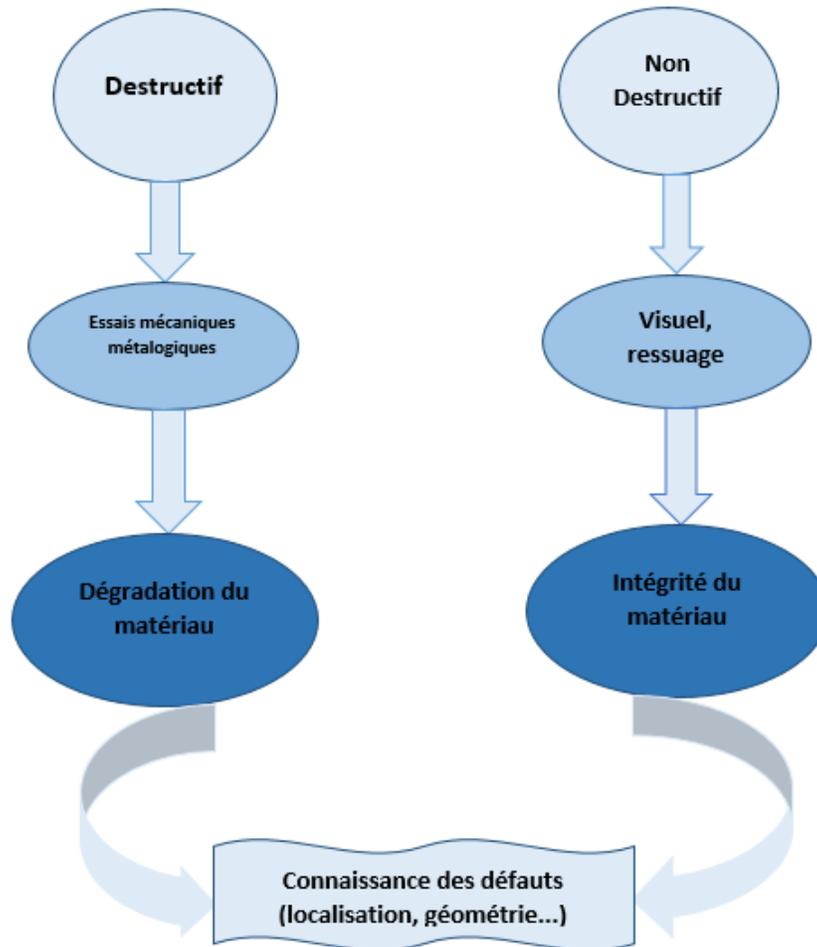


Figure III.3 : Schéma représentant les types de contrôle et leur objectif. [61]

III.5. Techniques de contrôle: [61]

Technique	Application
Ressuage	Recherche des défauts de surfaces
Magnétoscopie	Recherche des défauts de surfaces et sous-jacents
Ultrason	Recherche des défauts internes Mesures d'épaisseurs de parois
Radiographie	Recherche des défauts internes
Courants de Foucault	Mesure de l'épaisseur de revêtements Examen de tubes et faisceaux tubulaires
Thermographie infrarouge	Détection de défauts thermiques

Tableau III.3: Technique de contrôle [61]

III.6. Origines et classifications des défauts : [61]

III.6.1. Origines de défauts: [61]

Un objet (pièce, installation, machine) peut contenir des défauts qui ont plusieurs origines :

- La méthode et le procédé d'élaboration de brut (soudage, laminage, forgeage, moulage, ...),
- Les conditions de service (chargement, température, nombre d'heures de fonctionnement ...),
- Les traitements thermiques (trempe,).

Les défauts peuvent être de type surfacique (externe) ou de type volumique (interne).

III.6.2. Classification des défauts: [61]

a. Défauts dus au soudage :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger.

- ✓ **Soufflures** : Ce sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz. Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes (en surface).

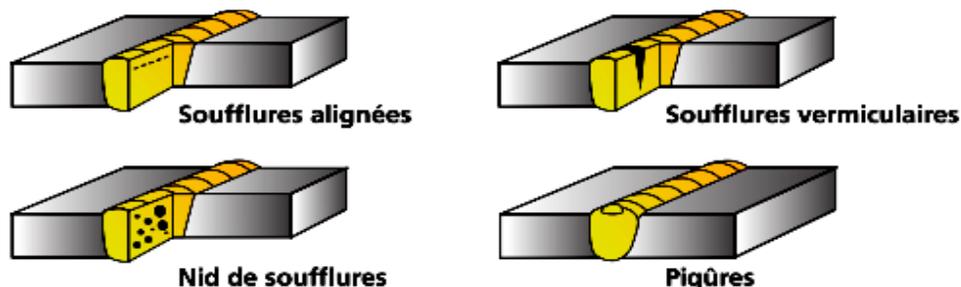
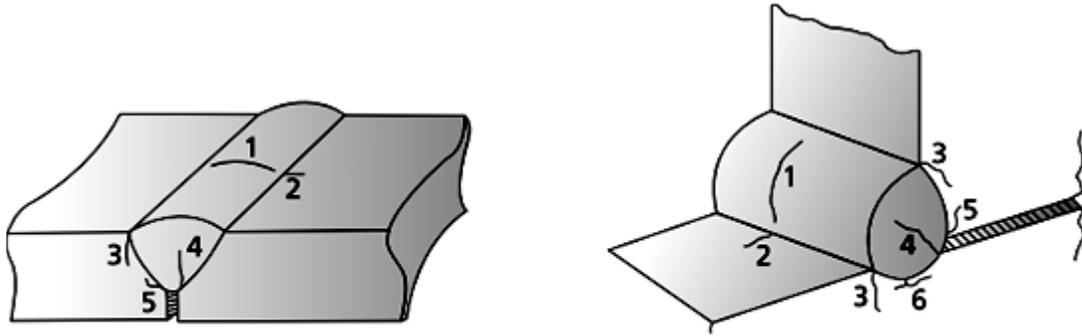


Figure III.4 : Défauts de Soufflures. [61]

- ✓ **Fissurations** : Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents. Elles sont causées par la présence de tensions internes trop importantes à l'intérieur du métal soudé.



- 1- Fissures transversales dans la zone fondue.
- 2- Fissures transversales dans la ZAT.
- 3- Fissures dans la zone de liaison.
- 4- Fissuration dans la zone fondue.
- 5- Fissures à la racine.
- 6- Fissures sous le cordon.

Figure III.5 : Défauts de Fissurations. [61]

	causes	moyen de prévention
fissuration à chaud	<ul style="list-style-type: none"> • Joints trop étroites. • Présence de l'impureté dans la soudure (souffre, phosphore). • Métal d'import incompatible avec le métal de base. • Cordon trop petit. • Trop de retrait durant ou après le soudage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne mesure des angles des chanfreins. • Préchauffage et chauffage en cours de soudure. • Bon choix de métal d'apport. • Refroidissement lent. • Traitement thermique après soudage. • Cordon suffisamment large.
fissuration à froid	<ul style="list-style-type: none"> • Hydrogène coincé dans la soudure. • Tensions internes résiduelles importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Préchauffage et chauffage en cours de soudure. • Refroidissement lent. • Traitement thermique après soudage. • Utilisation d'électrodes basique.

Tableau III.4 : Tableau montrant les causes et les moyens de prévention des fissuration[61]

- ✓ Inclusions solides ou inclusions de laitier.

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans le métal fondu(ex; poussières).
Inclusion de laitier	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de solidification.
Inclusion métallique	particule de métal emprisonné dans la masse du métal fondu(ex: la tungstène lors du soudage TIG,le cuivre et tout autre métal étranger).

Tableau III.5 : Tableau descriptive des types d'inclusion [61]

- ✓ Manque de fusion ou collage.
- ✓ Manque de pénétration.

Défaut	Description	Origine	Remèdes
Cloques (bulles, soufflures ...)	Emprisonnement d'air (ou de gaz) dans le métal qui se dilate lors de la libération de la pièce de son empreinte.	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de remplissage trop long. - Température de démoulage trop élevée. - Peau de pièce trop Fine qui ne peut résister à la pression des bulles d'air à Proximité et qui tendent à accroître leur volume (température). 	<ul style="list-style-type: none"> - Viser un temps mini écoulement pulvérisé et non en jet. - Abaisser la température du moule ou attendre plus longtemps avant le démoulage. - Modifier le tracé la position de l'attaque ou l'angle d'écoulement.

Criques (fissures)	Formation de fissures (principalement dans les angles)	- Retrait différentié du métal provoquant des contraintes (tensions divergentes) dans le métal.	- Veiller à l'uniformité des épaisseurs des parois (éviter de la matière si nécessaire). - Arrondir les angles.
Retassures	Retraits visibles à la surface de la pièce qui se forment à la solidification du métal.	- Différence dans le refroidissement de certaines parties de la pièce.	- Compenser l'effet de retrait par une pression maintenue du piston en fin d'injection. - Vérifier au préalable la pression d'injection. - Evider, enlever de la masse.
Gouttes froides (repli)	Soudure incomplète apparaissant lors de la jonction de deux parties du métal liquide.	- Division du jet lors du remplissage de l'empreinte. - Température trop faible du moule.	- Modifier l'emplacement de l'attaque; - Prévoir des talons de lavage - Augmenter la température du moule et/ou la vitesse de remplissage.
Bavures	Excès de matière au plan de joint de la pièce.	Pression trop importante provoquant une ouverture du plan de joint au-delà de 4/10 éme de mm.	- Réduire la pression ou - Augmenter la force de fermeture ou - Régler le plateau mobile.
Pelage (écaillage)	Apparition d'écailles à la surface de la pièce	Arrachement de parties de peau lors du démoulage. à peau trop fine à points chauds dans le moule	

Tableau III.6 : La description, l'origine et les remèdes des différents défauts [61]

a. Défauts dus au forgeage :

- ✓ **Déchirure:** dans le cas d'un cylindre forgé, il peut être décrit comme une fissure en forme d'étoile située au cœur la pièce et orientée selon l'axe de forgeage. Il est dû à un forgeage à une température très basse, ce défaut est très rare.
- ✓ **Replis:** défaut situé en périphérie de la pièce parallèlement à la surface.

b. Défauts dus aux traitements thermiques :

- ✓ **Tapure:** lors du chauffage ou de refroidissement brusque, les contraintes thermiques qui ne peuvent pas être absorbées par la pièce engendrent des chocs thermiques trop importants et créent des fissures consécutives. Les tapures de trempe sont des fissures externes débouchant résultant d'un refroidissement très rapide de la pièce.

III.7. L'examen visuel : [61]**III.7.1. Introduction: [61]**

Le contrôle visuel est une technique de base essentielle de contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci :

- Des défauts évidents (comme des cassures, de la corrosion, fissures, ...)
- Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

III.7.2. Compétences nécessaires: [61]

L'examen visuel permet d'aider le contrôleur à choisir la technique la plus adaptée en CND pour des examens approfondis.

La formation et l'expérience du contrôleur sont très importantes :

- La connaissance des méthodes de fabrication et d'assemblage et leurs possibles défauts : défaut de coulée ou de forge, de cintrage, défaut de soudure ...
- La connaissance des contraintes apparaissant en service (corrosion, fatigue, fluage...).

La connaissance d'autres techniques CND pour des contrôles plus profonds en addition du contrôle visuel (détection des défauts cachés et dimensionnement).

- La formation doit être adaptée au secteur : aéronautique, centrale thermique et nucléaire, industrie...

III.7.3. Equipements:**III.7.3.1 Le boroscope:**

- **Historique de la boroscopie: [62]**

Les premiers pas de la boroscopie remontent à l'antiquité grecque, à l'époque d'Hippocrate. Mais la véritable révolution date des débuts des années soixante-dix au siècle dernier, avec l'utilisation de la fibre optique et l'apparition des premiers fibroscopes souples, qui ont permis d'augmenter considérablement les performances techniques et le confort par rapport aux anciens appareils rigides. Par rapport à d'autres méthodes d'investigation, comme la radiologie, la boroscopie

présente le grand avantage de permettre la prise de biopsies, qui peuvent confirmer ou préciser le diagnostic microscopique.

- **Définition du boroscopie : [62]**

La boroscopie est un terme générique, qui signifie « regarder à l'intérieur ». Le nom de l'organe suivi de -scopie s'adresse plus spécifiquement à l'un ou l'autre examen. Ainsi, une bronchoscopie désigne une boroscopie des bronches, une laryngoscopie du larynx, une gastroscopie de l'estomac. C'est une méthode d'inspection qui permet d'éclairer et d'explorer des cavités et des conduits non accessibles directement à la vision humaine. La boroscopie est une technologie en perpétuelle évolution et voit aujourd'hui apparaître les vidéo-boroscopes qui intègrent l'acquisition d'images numérisées.

- **Définition du boroscope : [63]**

Le boroscope est un instrument optique utilisé pour l'inspection visuelle des zones étroites et difficiles d'accès.

Les boroscopes sont couramment utilisés dans diverses industries pour les tests non destructifs, tels que l'inspection des moteurs d'avions, des turbines à gaz industrielles, des moteurs diesel et des composants automobiles. Ils sont essentiels pour détecter les défauts, les imperfections et les obstructions sans avoir besoin de démontage, ce qui permet de gagner du temps et de réduire les coûts. Les boroscopes flexibles, comme le Multiscopie, sont conçus avec de petits diamètres et peuvent accéder à des cavités autour des coudes, ce qui les rend idéaux pour l'inspection de composants de machines complexes, de pièces moulées, de pales de turbine, de cartes de circuits imprimés, de canons de fusil et de soudures.

Ces instruments jouent un rôle vital dans les tâches de contrôle qualité, de maintenance et de dépannage dans les industries aérospatiale et manufacturière, garantissant la sécurité, l'efficacité et un temps d'arrêt minimal.



Figure III.6: Le boroscope. [64]

- **Les composants d'un boroscope : [62]**

Le boroscope se compose essentiellement de:

1. Une source de lumière.
2. Manette de manipulation.
3. Flexible (tube) optique qui finit par un objectif (camera).
4. Un guide pour des utilisations particulières.

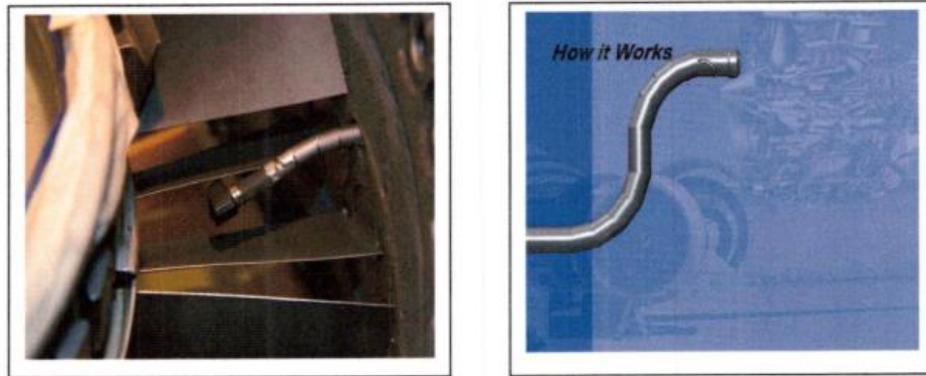


Figure III.7 : Guides du boroscope. [62]

- **Principes initiaux du boroscope : [62]**

Le boroscope doit supporter des tests de vibrations chocs immersion et aussi :

- Il comporte un objectif de course focale (19 mm par exemple).
- IL est éclairant.
- Le système optique doit véhiculer d'un bout à l'autre de l'appareil quelle que sa longueur.
- Dans les systèmes récents (articulés), est caractérisé sa coupure possible (203mm par exemple).
- Il doit être étanche pour éviter ça dégradation pendant l'utilisation.
- Il doit être immersible pour être précisément nettoyé désinfecté stérilisé, voire auto lavables et toujours dé-contaminable.
- Suivant les emplois médicaux ou industrielles et précisée également la plage de température d'utilisation (de-23°C à49°C).

- **Fonctionnement du boroscope : [63]**

L'extrémité du tube d'insertion comprend une lumière qui permet de capturer des images vidéo ou fixes à l'intérieur des équipements, des moteurs et d'autres espaces sombres. En tant qu'outil d'inspection visuelle à distance, la possibilité de capturer des images vidéo ou fixes pour une inspection ultérieure est un avantage considérable. Un écran situé à l'autre extrémité affiche la vue de la caméra et sur certains modèles, la position de visualisation peut être modifiée à l'aide d'une manette ou d'une commande similaire. La caméra vidéo et le tube flexible sont

submersibles. Les modèles ultérieurs offrent des caractéristiques améliorées, telles qu'une meilleure résolution, un éclairage réglable ou le remplacement de l'écran intégré par une connexion à un ordinateur, par exemple un câble USB.

Puisqu'il dispose d'une sonde de 1 mètre de longueur, On peut l'utiliser sans avoir à démonter des moteurs ou des machines. Cela se traduit par des économies de temps et d'argent. [65]

La tête du boroscope intègre 6 LED que l'utilisateur peut régler. Elle dispose de plusieurs niveaux d'éclairage, ce qui permet un éclairage optimum du lieu à inspecter. De cette manière on évitera un sur-éclairage qui entrainerai la non visualisation de l'image sur l'écran. En plus de l'éclairage le boroscope possède aussi la fonction zoom avec plusieurs niveaux : 2, 3 et 4 agrandissements. Les images et les vidéos du boroscope s'enregistrent automatiquement sur la carte micro SD. Cela nous permettra d'analyser les images postérieurement et de les documenter. [65]

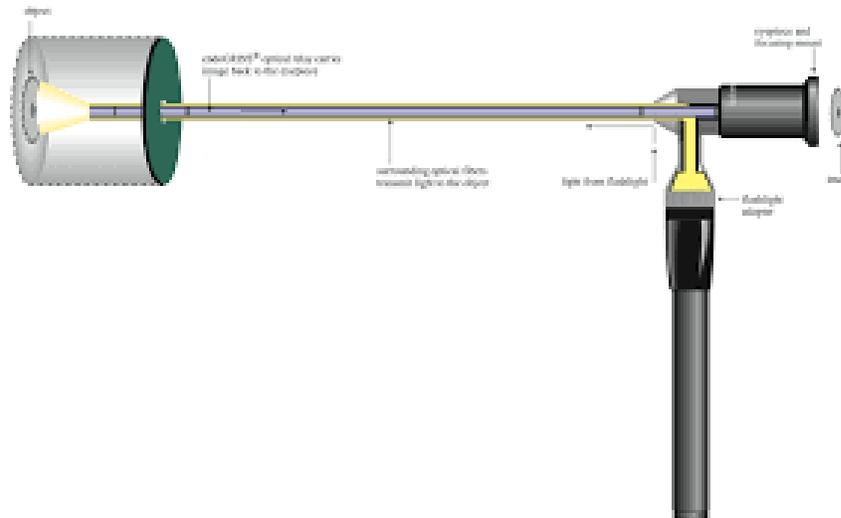


Figure III.8: Vue schématique d'un boroscope.

- **L'inspection boroscopique : [62]**
 - a) **Circonstances de l'inspection boroscopique : [62]**
 - **Inspections programmées :** des inspections régulières faisant partie du programme de maintenance, dont la fréquence dépend du cycle de moteur ou temps de vol.
 - **Inspections non-programmées :** des inspections non régulières sans effectuées pour évaluer l'aptitude au service après les incidents comme : FOD, le pompage du moteur et lorsque EGT ou RPM dépassent les limites.
 - **Inspections spéciales :** les défauts peuvent apparaître au service de suivi de l'état des conditions (paramètres de performance) du moteur. L'incitation d'une inspection spéciale permet de surveiller ces défauts particuliers alors que le moteur demeure en service.
 - b) **Techniques d'inspections boroscopique : [62]**

Les meilleurs résultats d'une inspection BSI dépendent de :

1. De bonne maîtrise du boroscope.
2. Connaissance du moteur (mini 3 à 5 ans d'expérience).

Chaque inspection BSI fournit un accès pour inspecter les éléments de passage de gaz, L'inspecteur doit connaître la procédure et les techniques d'inspection de chaque élément et ses défauts habituels.

3. Classement des anomalies (fissures, déchirures, entailles, creux, érosions, déformation, décoloration, métal manquant, endommagement du bout d'aube, oxydation...).
 4. La mesure (l'évaluation des anomalies).
 5. Application des limites de constructeur.
 6. Rapports des conclusions (documentés pour la prochaine inspection ou historique).
- ❖ **S'il n'y a aucune détérioration** : le moteur reste en service jusqu'à la prochaine inspection programmée.
 - ❖ **S'il y a une détérioration** : évaluer les anomalies afin de prendre une décision :
 - Le moteur reste en service jusqu'à la prochaine inspection planifiée avec une augmentation de fréquence de contrôle.
 - Le moteur doit être remplacé après X temps.
 - Le moteur doit être remplacé immédiatement.

- **Utilisation de boroscope en maintenance préventive : [66]**

Dans l'industrie manufacturière, les boroscopes sont utilisés pour l'inspection et l'entretien des machines et des équipements. En utilisant un boroscope, les techniciens peuvent inspecter les zones difficiles d'accès des machines et des équipements sans avoir à les démonter, ce qui peut permettre d'économiser du temps et de l'argent. Une application typique des boroscopes dans l'industrie manufacturière consiste à inspecter l'intérieur des tuyaux, des vannes et d'autres composants à la recherche d'accumulations, de dommages ou d'autres problèmes susceptibles d'avoir un impact sur la production ou de poser des problèmes de sécurité. Les boroscopes peuvent être insérés dans de petites ouvertures de l'équipement pour inspecter l'intérieur à la recherche de signes d'usure, de dommages ou d'autres problèmes. En inspectant régulièrement ces zones avec un boroscope, les techniciens peuvent détecter les problèmes potentiels à un stade précoce, avant qu'ils ne deviennent des problèmes majeurs susceptibles d'avoir un impact sur la production ou la sécurité.

Type de détecteurs utilisés : [67]

Les boroscopes peuvent être classés selon deux façons : par la rigidité du tube ou type de relais d'image.

- a) **Rigidité et flexibilité : [67]**

- ✚ Le tube de boroscope peut être rigide ou flexible. Les boroscopes rigides incluent certaines des conceptions les moins chères, car ils ne comportent généralement qu'un tube creux, un oculaire, une source de lumière et une ou plusieurs lentilles relais. Les lentilles utilisées dans les boroscopes rigides sont généralement des achromates, des lentilles

GRIN ou des modèles Harold Hopkins. Bien que les boroscopes rigides soient économiques et efficaces, leur grave inconvénient est que leur visualisation est effectivement limitée à une ligne droite. Lors de l'inspection de certaines entités, telles que les tuyaux droits, les cylindres de moteur et les injecteurs de carburant, les boroscopes rigides sont efficaces.

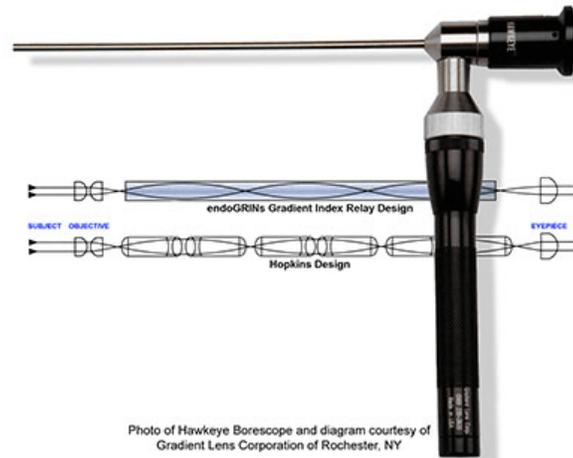


Figure III.9: Boroscope rigide. [67]

- ✚ Les boroscopes flexibles sont beaucoup plus polyvalents que les types rigides. Parce qu'ils nécessitent des moyens supplémentaires pour transmettre une image à l'oculaire, ils sont plus coûteux à fabriquer et à l'achat. Les types flexibles incluent les fibroscopes et les vidéoscopes.

Les fibroscopes sont des boroscopes flexibles qui utilisent la technologie des fibres optiques, un oculaire à une extrémité et une lentille à l'autre pour inspecter les alésages et les cavités. Ils abritent des faisceaux de fibres optiques dans un tube flexible qui permet aux utilisateurs de modifier l'angle de vue ou de parcourir des chemins courbes. [67]

Et les vidéoscopes sont équipés d'une puce CCD et d'un ensemble de lentilles focalisables qui transmettent les images des alésages et des cavités vers un écran. La caméra est intégrée à l'extrémité de la lunette et utilise la technologie CCD plutôt que des composants de relais optiques (endoscopes) ou des fibres optiques (fibroscopes). [67]



Figure III.10 : Utilisation d'un boroscope flexible (fibroscope) pour inspecter une cavité. [67]



Figure III.11 : Le videoscope industriel. [62]

b) Type de relais d'image : [67]

✚ Les boroscopes rigides peuvent utiliser l'un des trois types de relais différents pour la transmission d'images :

1. Les achromates sont des lentilles doubles (doublets) qui corrigent automatiquement les aberrations chromatiques et sphériques. Ce sont des options rentables, mais elles ne sont généralement utilisées que dans les boroscopes de grand diamètre.
2. Le design Hopkins est un système conçu par Harold Hopkins, un physicien britannique, qui implique le placement précis de nombreux tubes de verre poli à la place de minuscules lentilles. Les relais Hopkins donnent une excellente qualité d'image pour les applications d'endoscopes de diamètre moyen, mais sont fastidieux à produire et à entretenir, compte tenu de la nature délicate des optiques impliquées.

3. Les relais à indice de gradient (GRIN) fonctionnent de la même manière que les modèles Hopkins, mais sont plus simples à produire et à utiliser. Par exemple, une seule tige GRIN est capable de remplir la même fonction que 24 tubes Hopkins distincts. Par conséquent, les optiques à gradient d'indice offrent la meilleure combinaison de qualité et de coût. Ce type de relais est généralement utilisé pour les endoscopes de petit à moyen diamètre.
- ✚ Les types de relais flexibles incluent les fibres optiques et les signaux vidéo numériques. Ces appareils sont décrits plus en détail respectivement dans le Guide de spécification du fibroscope et dans le Guide de spécification du vidéoscope.

Appareil	Boroscope rigide	Fibroscope	Vidéoscope
Type de tube d'insertion	Rigide, accès en ligne droite	Flexible, articulé	Flexible, articulé
Source de lumière	Externe	Externe	Intégrée
Acquisition d'images	Optique, lentilles de relais	Optique, faisceau de fibres	Numérique, capteur d'image
Système optique	Fixe	Fixe ou modifiable	Modifiable
Capture d'écran, d'images et de vidéos	Nécessite des accessoires supplémentaires	Nécessite des accessoires supplémentaire	Intégrée
Mesure	Non disponible	Non disponible	Possible

Tableau III.7 : Comparaison des principales caractéristiques des boroscopes rigides , des fibroscopes et des vidéoscopes [68]

Comme le montre le tableau, les vidéoscopes présentent des avantages techniques considérables par rapport aux boroscopes rigides et aux fibroscopes. Une inspection réalisée à l'aide d'un vidéoscope sera plus rapide (moins de pièces à installer et moins de réglages à effectuer pour obtenir une bonne image), et elle permettra également la production de meilleurs rapports, puisqu'il est facile d'enregistrer des images et des vidéos. [68]

III.7.4. Restrictions: [61]

- Technique limitée aux surfaces visibles.
- La surface doit être propre.
- Besoin de formation des opérateurs.
- La caractérisation des défauts est limitée.
- Pas d'enregistrement (sauf par vidéo ou photo).

III.8. Le ressuage : [61]

III.8.1. Introduction: [61]

Par opposition aux autres méthodes de contrôle non destructif, le ressuage peut être considéré comme une méthode « globale » pour tous les défauts débouchants en surface, quelle que soit la nature du matériau. À partir du moment où les conditions opératoires sont satisfaites, on n'a pas besoin de connaître à priori l'orientation du défaut pour le détecter et un seul essai peut suffire. Comme par ailleurs ce sont les discontinuités débouchantes qui peuvent nuire le plus lors de

l'utilisation de la pièce, on voit tout de suite le grand intérêt que peut présenter cette méthode : elle est d'ailleurs fréquemment utilisée en tant que méthode de lever de doute pour confirmer ou infirmer la présence de défauts débouchants mis en évidence par une autre technique.

III.8.2. Définition: [61]

Le ressuage une méthode de contrôle non destructif dont le but est la détection et la localisation de défauts ouverts et débouchant en surface sur tous métaux et certains matériaux non métalliques (céramiques, matières plastiques...).

Cette méthode repose sur la capacité de certains liquides à pénétrer, puis à ressuier par capillarité, dans ces discontinuités géométriques.

La capillarité ou la force capillaire caractérise l'aptitude d'un liquide en contact avec un solide à se déplacer par rapport à ce solide.

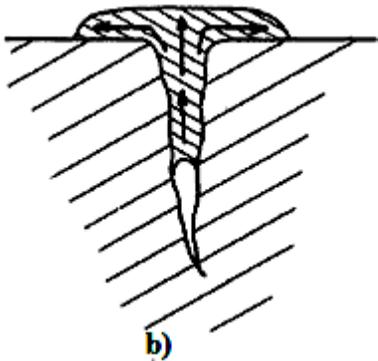


Figure III.12 : Introduction du pénétrant dans les discontinuités par capillarité. [61]

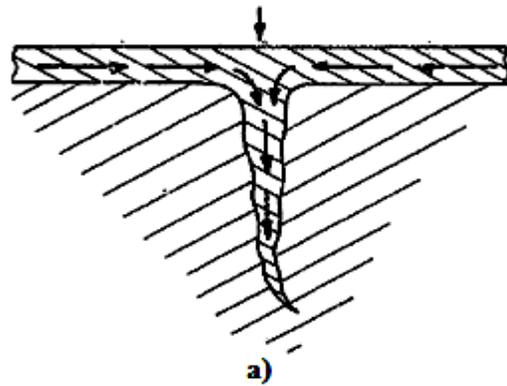


Figure III.13 : Phénomène de ressuage après élimination de l'excès de pénétrant. [61]

- a) Introduction du pénétrant dans les discontinuités par capillarité.
- b) Phénomène de ressuage après élimination de l'excès de pénétrant.

III.8.3. Domaines d'application: [61]

On peut localiser les défauts de : moulage, de fatigue, d'usinage, de traitement thermique et soudage Le ressuage donne des résultats intéressants avec des métaux tel que l'aluminium, le magnésium le cuivre, le titane, l'acier inoxydable et la plupart des alliages non métalliques comme les céramiques, les plastiques, le caoutchouc moulé, (mais il faut, pour les plastiques et les composés caoutchouc moulé, se méfier de leur réactivité vis à vis des produits utilisés et donc procédé à des essais préliminaires) :

- Aéronautique.
- Chaudronnerie: cordons de soudures.
- Centrales nucléaires.

- Industries mécaniques: engrenages, arbres, cylindres.
- Industries agro-alimentaires: sucreries.
- Étanchéité: détection de fuites.

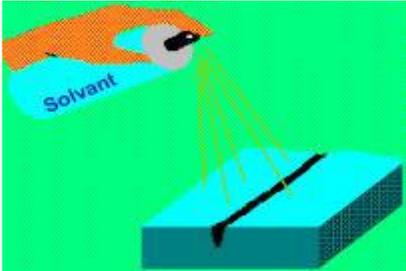
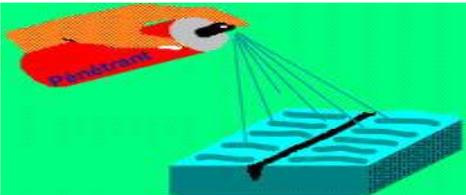
III.8.4. Avantages et inconvénients : [61]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre possible sur organes montés dans un ensemble. - Très grande fiabilité. - Grande souplesse d'adaptation en fonction de la géométrie des pièces et de leur état de surface. - Interprétation aisée des indications des discontinuités révélées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'une bonne préparation des surfaces à contrôler. - Domaine de températures à respecter. - Nécessité de travailler proprement. - Effluents liquides à traiter.

Tableau III .8 : Avantages et inconvénients de rassage

III.8.5. Principe de ressuage: [61]

Le ressuage comporte 6 étapes :

<p>A- Le nettoyage de la surface à contrôler : La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce :</p> <ul style="list-style-type: none"> · Par meulage, · Par brossage, · Par dégraissage (chimique ou en phase vapeur) 	
<p>B- L'application du pénétrant sur la surface à contrôler : On laisse au pénétrant un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissantes à la surface.</p>	
<p>C- L'élimination de l'excès de pénétrant : Cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussie à s'infiltrer dans les discontinuités. On utilise dans cette opération :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Un chiffon sec et propre et non pelucheux, - L'eau suivi ou non d'un séchage, - Un solvant. 	
<p>D- Application du révélateur : Un révélateur, produit opaque et absorbant</p>	

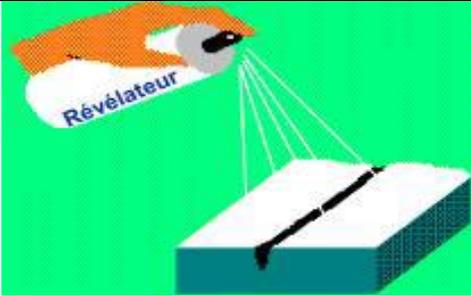
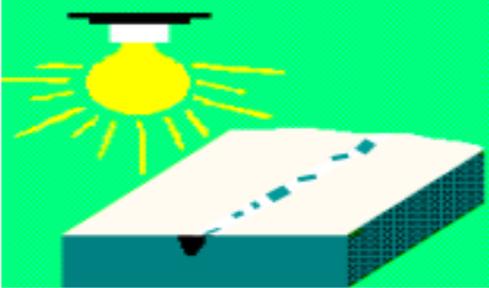
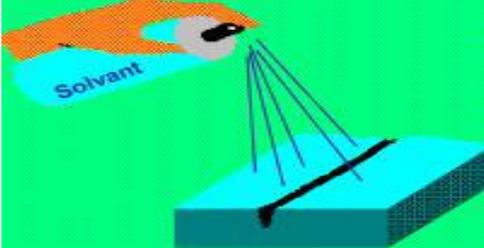
<p>est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.</p>	
<p>E- Interprétation des résultats : L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité, le pénétrant contient en général :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Un produit coloré visible à la lumière blanche (lumière du jour). - Ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultraviolet). <p>Une estimation grossière de la fissure peut être faite grâce à la largeur de l'étalement du pénétrant sur le révélateur.</p>	
<p>F- Nettoyage final : Un nettoyage final est préconisé pour certains matériaux (alliages d'aluminium, alliage de magnésium) pour lesquels la présence des produits utilisés peut entraîner des corrosions.</p>	

Tableau III.9 : Les étapes de rassage [61]



Figure III.14 : Exemple d'une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par rassage. [61]

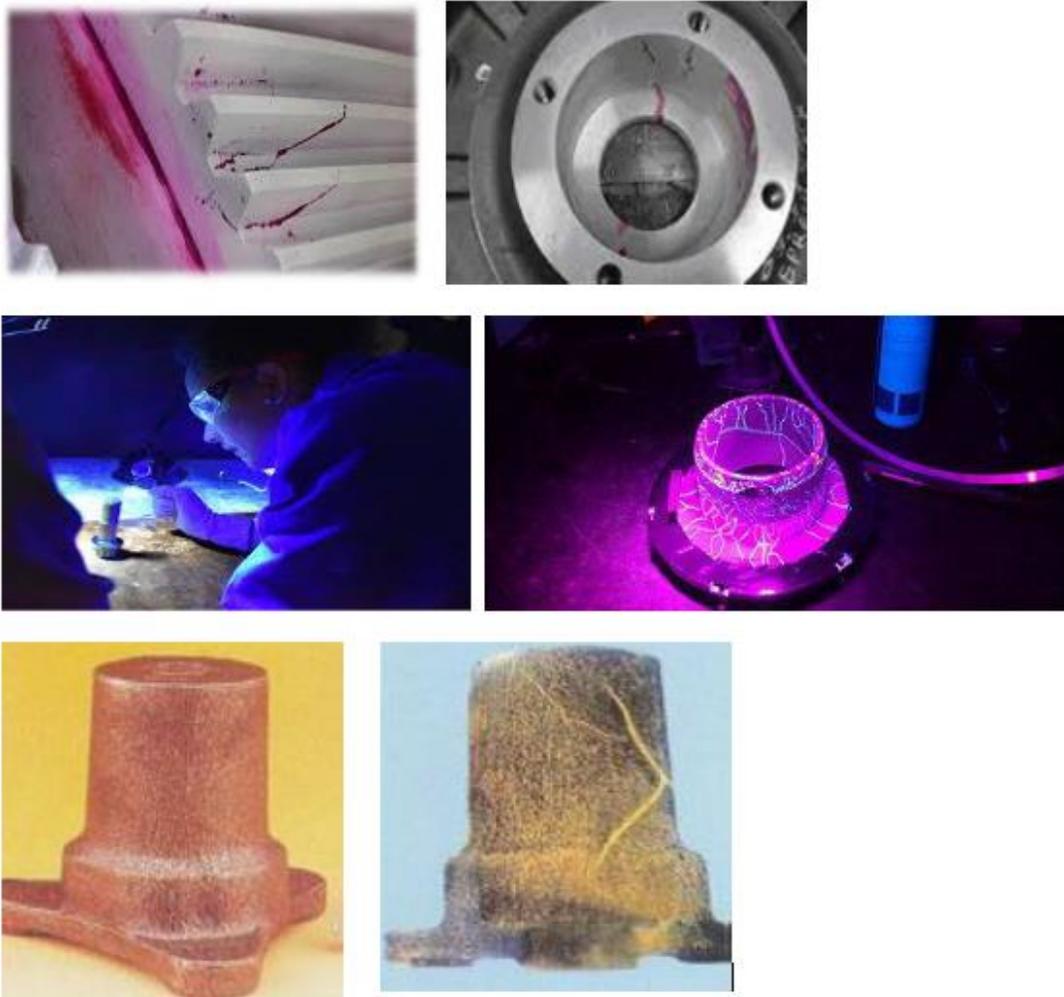


Figure III.15 : Exemples de pièces contrôlées par ressuage. [61]

III.8.6. Types et significations des indications: [61]

III.8.6.1. Types d'indications : [61]

Toute apparition du pénétrant indique en principe la présence d'une discontinuité sur la surface. Les indications peuvent être classées en trois types:

Les vraies indications : ce sont les seules indications soumises à une évaluation, elles ont pour origine les discontinuités non prévues à la conception de la pièce ou non justifié par les conséquences normales des procédés de fabrication.

Les indications parasites: il s'agit d'indications résultantes des discontinuités existant réellement mais dont on connaît l'origine qui est d'ordre conceptuel.

Les fausses indications: elles sont en général pour origine une élimination incomplète de pénétrant restant en surface, l'absence d'indication est aussi une fausse indication (dégraissage incomplet de la pièce, présence de poussière, ...).

III.8.6.2. Significations des indications : [61]

Les indications observées en ressurgences peuvent être regroupées en 5 types :

Forme arrondie: indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piqûre, structure poreuse de la pièce...).

Ligne continue: indication d'origine les fissures, les replis de forge, les rayures. Ligne discontinue: indication apparaît lorsque la pièce subit une préparation mécanique ou toute autre opération qui peut enfermer une partie d'un défaut débouchant.

Tache ponctuelle: indication apparaissant surtout lors de contrôle des pièces moulées, elle est d'origine la nature poreuse de la pièce, des piqûres, ou de la structure grossière de la pièce.

Tache diffusée: présence de micro-pore dans les pièces.

III.8.7. Types de pénétrant et de révélateurs : [61]

III.8.7.1. Pénétrants : [61]

Le pénétrant est un produit dont les caractéristiques recherchées sont:

- c) Un point éclair élevé,
- d) Faible viscosité,
- e) Non toxique,
- f) Teneur en chlore inférieur à 25 ppm,
- g) Bonne stabilité chimique.

On distingue :

- Les pénétrants colorés, qui sont généralement de coloration rouge/violette, pour lesquels l'observation se fait en lumière blanche,
- Les pénétrants fluorescents qui nécessitent un examen en lumière ultraviolette.

III.8.7.2. Révélateurs : [61]

Il existe essentiellement deux types de révélateurs, pouvant être utilisés avec les diverses familles de pénétrants:

Les révélateurs *secs* se présentant sous forme de poudre : ce type est utilisable seulement avec les pénétrants fluorescents, et :

- Pour surfaces rugueuses,
- Pour pièces de forme complexe : filetage, rainure, trou,
- Pour pièces de grande dimension.

Les révélateurs *humides* constitués d'une poudre en suspension ou en solution dans un liquide (révélateurs non aqueux, révélateurs aqueux).



Figure III.16 : Les pénétrants. [61]

III.9. Conclusion :

Pour conclure sur le test non-destructif et l'inspection par boroscope, les méthodes de test non-destructif telles que l'inspection par boroscope jouent un rôle essentiel dans divers secteurs industriels.

Boroscopes sont des outils rapides et économiques qui ne causent aucun préjudice lors de l'inspection. On les utilise fréquemment dans les domaines médical et industriel pour inspecter visuellement des zones difficiles à atteindre sans causer de dommages.

Les méthodes de test non destructeurs, telles que l'inspection par boroscope, sont indispensables pour garantir l'intégrité et la sécurité des équipements et des structures sans compromettre leur fonctionnalité ou leur durabilité.

Chapitre IV

Etude de cas

Chapitre IV

Etude de cas

IV.1 Introduction :

Medgaz, un projet d'envergure internationale, est un gazoduc sous-marin de 210 km reliant l'Algérie au port d'Almería en Espagne, à travers la mer Méditerranée. L'objectif de Medgaz est de transporter le gaz algérien en Espagne. La société Medgaz. a été créée pour concevoir, construire et gérer ce gazoduc stratégique. Elle s'est engagée à mener à bien ce projet dans le plus strict respect de l'environnement.

Ce gazoduc revêt une importance capitale dans le paysage énergétique international en assurant un approvisionnement fiable en gaz naturel entre l'Algérie et l'Espagne. Les progrès technologiques actuels permettent la concrétisation de ce projet emblématique qui contribuera à une interaction gazière fluide entre le système espagnol.

En somme, Medgaz représente bien plus qu'un simple gazoduc, il incarne une convergence de talents multidisciplinaires visant à garantir un apport continu, régulier et sûr de gaz naturel .

Cette introduction offre un premier regard sur le rôle majeur de Medgaz dans le transport du gaz naturel, soulignant l'importance stratégique de cette activité dans la chaîne de valeur énergétique. Le rapport qui suit explorera plus en détail les opérations de transport de gaz naturel de Medgaz, mettant en lumière les innovations, les défis et les contributions significatives de la société dans ce domaine crucial de l'industrie énergétique.

IV.2 Définition de Medgaz :

Est l'entreprise chargée du design, construction et des opérations du gazoduc sous-marin entre l'Algérie et l'Europe, qui traverse l'Espagne. C'est le premier qui se construit à plus de 2000 mètres de profondeur dans la Méditerranée. Avec une capacité initiale de 8 milliards de mètres cubes par an, elle amène le gaz naturel directement de Beni Saf, sur la côte Algérienne, jusqu'à Almería, en Andalousie.



Figure IV.1: MEDGAZ [69]

IV.2.1 Le rôle de Medgaz :

Les principaux rôles de Medgaz incluent la conception, la construction et les opérations du gazoduc sous-marin reliant l'Algérie à l'Europe via l'Espagne.

En tant qu'entreprise responsable de ce projet d'envergure, Medgaz assure le transport fiable de gaz naturel entre ces régions stratégiques.

De plus, Medgaz joue un rôle crucial dans l'exportation de gaz vers l'Espagne, contribuant ainsi à l'approvisionnement énergétique de cette région.

Le gazoduc Medgaz a une capacité prévue de 10,5 milliards de mètres cubes par an , un diamètre de 24 pouces et une profondeur de 2165m renforçant sa position en tant que lien essentiel pour le transport de gaz entre l'Algérie et l'Europe.

IV.2.2 L'organigramme de Medgaz :

Est une société multidisciplinaire où tous ses partenaires participent activement au développement du projet grâce à des équipes de travail.

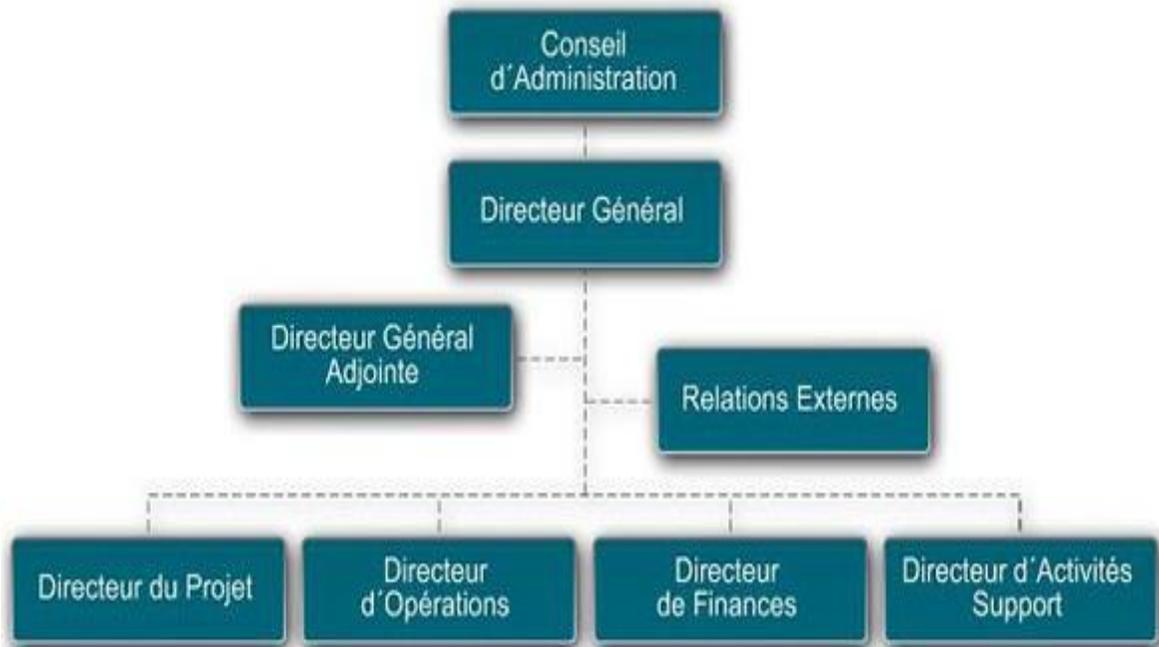


Figure IV.2 : L'organigramme de Med gaz. [70]

IV.2.3 Description général de la station :

IV.2.3.1 Filtration :

Ce gaz arrivé passe par une filtration y comprend trois filtres a cartouche. La filtration se fait avec une grande vitesse qui fait tourbillonner le gaz ; Les condensats et les impuretés sont plutôt lourds alors ils sont évacués en bas vers la citerne de récupération des condensats (citerne de purge) c'est le système de drainage et le gaz continue son parcours vers le haut.



Figure IV.3 : Les trois filtres principaux.[71]

IV.2.3.2 Analyse du gaz :

Le but de la station a travers l'installation des analyseurs et de vérifier la qualité du gaz.

Dans la station il existe trois types d'analyseur :



Figure IV.4: Les analyseurs [71].

➤ **Analyseur du point de rosée :**

Est destiné pour la mesure continue automatique du point de saturation d'hydrocarbure et la rosée d'eau dans le gaz naturel.

➤ **Analyseur de soufre :**

Le but majeur de la station est d'avoir un pourcentage le plus bas possible du H₂S. Car si le soufre dépasse certain pourcentage, il devienne comme une matière abrasive pour les aubages du

compresseur et de la turbine et aussi à cause de la basse température dans le pipe marin il se stagne sur la paroi du pipe.

➤ **Analyseur d'humidité dans le gaz :**

La station a pour objective d'avoir un gaz avec un taux d'humidité nulle pour qu'elle protège les compresseurs contre l'endommagement et en plus pour la protection du pipeline contre la corrosion et le givrage

IV.2.3.3 Les compresseurs d'air :

L'unité de production et de conditionnement d'air est installée dans la station de compression pour alimenter les réseaux de commande, de contrôle et de diverses utilités. L'unité est composée essentiellement de trois compresseurs à vis, deux sécheurs d'air et un réservoir pour stockage et distribution.



Figure IV. 5 : Les compresseurs d'air [71]

IV.2.3.4 Unité de la génération du nitrogène gaz :

Le nitrogène liquide est utilisé dans la station comme un produit de secours pour remplacer le nitrogène et l'aire instrument. Leurs utilisations sont :

- Un gaz de secours en cas décharge électrostatique (ESD) des turbocompresseurs.
- Il assure le refroidissement du GG et l'étanchéité dans la turbine de puissance en cas de ESD due à une chute de tension (black-out).
- Un gaz de secours en cas de chute de pression dans le réseau de nitrogène a 6.5 bars et l'air instrument à 6 bars. Dans ces cas le nitrogène liquide entre en service.
- Les opérations de purge en cas de travaux de maintenance.
- Dans les ateliers.



Figure IV.6 : Unité de la génération du nitrogène gaz. [71]

IV.2.3.4 La torche :

Le système d'évent /flamme de la torche dans BSCS (1-UX-71)est fourni pour assurer la sécurité et l'efficacité de l'élimination des gaz à l'intérieur de la station. L'élimination des gaz est recueillie dans un collecteur et acheminé à la torche, ce système est extrêmement important en cas d'urgence dans la station BSCS, tels que l'incendie ou de fuite importante de gaz.



Figure IV.7 : La Torche [71].

IV.2.3.5 Skid Gaz :

Le système de conditionnement de gaz doit fournir :

- Du fuel gaz aux trois turbocompresseurs 1-TK-10/20/30/40
- Du fuel gaz et gaz de démarrage aux deux turbogénérateurs 1-TG-70/80
- Du service gaz pour la motorisation des vannes.



Figure IV.8 : Système Skid gaz [71].

IV.2.3.6 Les turbocompresseurs (1-TK10/20/30/40) :

La fonction du turbocompresseur est de fournir l'énergie cinétique nécessaire pour permettre le transport du gaz naturel via le marine pipeline jusqu'en Espagne. Le turbocompresseur est considéré comme l'équipement potentiel dans la station de compression de BSCS, il est constitué d'une turbine à gaz dont le générateur de gaz est du type RB211 DLE 24GT (GG) et une turbine de puissance du type RT61 qui entraîne à travers un multiplicateur de vitesse ETA50XI (470) le compresseur centrifuge de type Dresser Rand DATUM D10R6B.

Le groupe des turbocompresseurs doit assurer un débit de :

- 22.9 million Nm³/jour dans la 1ère étape de la 1ère phase (2+1)
- 28.5 million Nm³/jour dans la 2ère étape de la 1ère phase (3+1)
- 48.5 million Nm³/jour dans la 2ème phase (5+1)

Le générateur à gaz est constitué principalement de deux stades :

- Le premier est le LP (basse pression) avec (07) sept niveaux de compression
- Le deuxième est le HP (haute pression) avec (06) six niveaux de compression

Une chambre de combustion dans laquelle le Gaz carburant (fuel gaz) est brûlé pour produire une grande vitesse et fournir une grande pression à l'air caloporteur à travers un système de combustion comprenant 09 chambres radiales avec un angle de 11° par rapport à l'axe de rotation.

Un système spécifique de combustion baptisé DLE (Dry Low Emission), dont l'objectif est

Environnemental et qui est la réduction des NOx et des (CO, UHC).

A cet effet, 04 lignes d'injection de fuel ont été prévues:

- Ligne torche
- Ligne centrale
- Ligne primaire
- Ligne secondaire

Elle est composée aussi d'une turbine **LP** avec une seule roue et une **HP** avec une seule roue, ainsi qu'une turbine de puissance RT61 à trois étages "impulse-réaction", entraînée par les gaz d'échappement du GG, après avoir traversé le troisième étage, les gaz d'échappement coulent entre les diffuseurs internes et externes à travers une cheminée isolée vers l'atmosphère. La turbine est accouplée à la charge via un accouplement à très haute vitesse, un torque mètre est installé pour enregistrer la force de torsion sur l'arbre entre la turbine de puissance et la boîte à vitesse et enfin envoi le signal au panneau de contrôle.

Nombre d'étage : 3

Type : Réaction

Sens de rotation : aiguilles d'une montre face à l'arrière de l'arbre

Puissance : 32.855 KW

Et dernièrement le compresseur centrifuge qui est un organe de conversion d'énergie mécanique en énergie cinétique, il est constitué de 06 roues en configuration 'back to back' c'est-à-dire que la configuration du rotor est partagée en deux 02 sections référencée généralement "1ère section" et "2ème section". La première section possède 03 roues côté non entraînée de l'arbre. C'est la partie basse pression (**LP**). La deuxième section possède les 03 autres roues du côté entraîné de l'arbre. C'est la haute pression (**HP**).



Figure IV.9 : Les turbocompresseurs [71].

IV.2.3.7 Source d'énergie électrique de la station :

- Turbogénérateur (1-TG70/80)

- Deux turbogénérateurs (1-TG-70 et 1-TG-80) fourniront l'énergie électrique requise. Chacun aura une capacité de 3,5 MVA et un seul fonctionnera dans des conditions normales; l'autre fera office de réserve. La seconde servira de réserve. De plus, en cas de panne du turbogénérateur en service, une connexion avec le réseau algérien servira de secours pour éviter le déclenchement des turbocompresseurs



Figure IV. 10: Les turbogénérateurs [71] .

- Le groupe alternateur entraîné par la turbine à gaz possède une turbomachine à flux axial, un alternateur et un dispositif d'engrenages. Ces éléments sont installés en ligne sur un châssis de base en acier, qui correspond à une structure en acier, formée de longerons et de traverses soudés pour constituer une assise rigide.

- L'arbre d'entrée du dispositif d'engrenages est relié au moyen du cône avant la partie rotor du compresseur de la turbine par un accouplement à manchon cannelé. Une contre bride boulonnée au carter d'entrée d'air de la turbine relie les ensembles.

- L'arbre d'entrée de l'alternateur est aligné sur l'arbre de sortie du dispositif d'engrenages et les arbres sont reliés par un accouplement de cisaillement flexible dans un couvercle de protection. . Les accessoires du groupe alternateur comprennent les systèmes de démarrage, de combustible, de commande électrique, d'huile de lubrification et d'un système d'air pneumatique.

- Le générateur est conçu pour subvenir au besoin de la station, il est surdimensionné afin de fonctionner loin des craintes Puissance : 3200 kW Voltage : 6.6 kV

L'installation des turbogénérateurs dans la station de compression a pour objectif :

- La fourniture de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de la station Pour garantir une autonomie d'énergie électrique et assurer la continuité de service.

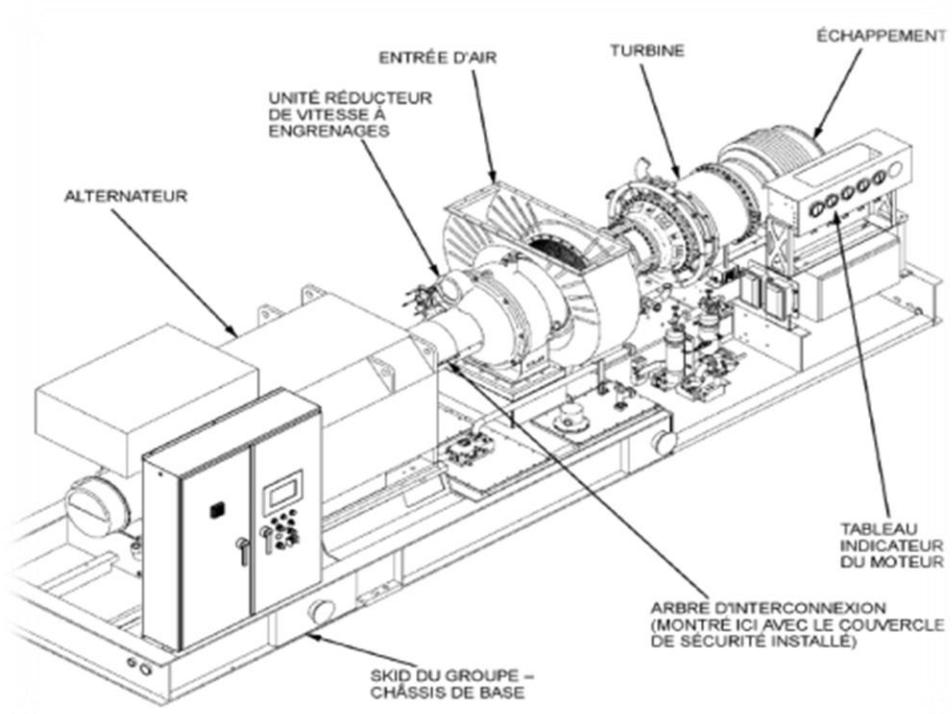


Figure IV.11: Schéma de turbogénérateur [71].

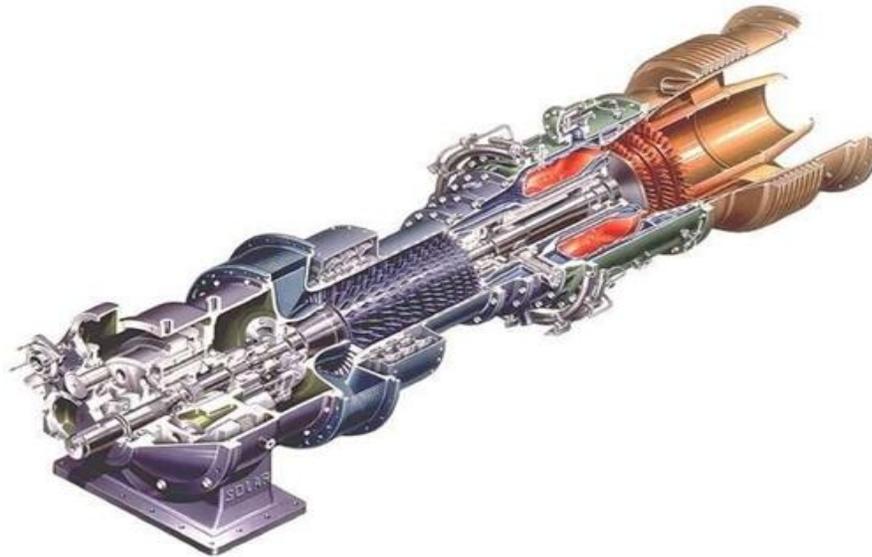


Figure IV.12 : Turbine à gaz centaur 40 . [72]

- **Turbomachine** : L'air est aspiré dans la section du compresseur de la turbine par le biais du circuit d'admission d'air et il est comprimé à travers 11 étages. Du carburant est ajouté à l'air comprimé dans la chambre de combustion et le mélange air + gaz est allumé. Les gaz chauds en

provenance de la combustion se détendent dans les tuyères de la turbine et entraînent les rotors de la turbine. Les gaz brûlés s'échappent ensuite dans l'atmosphère par le système d'échappement.

➤ **Poste Sonelgaz (1-SB-1) :**

Délivre une tension de 30 KV, le réseau Sonelgaz agira en cas d'indisponibilité des turbogénérateurs (déclenchement) .

➤ **Générateur Diesel (1-DG01)**

Le groupe diesel est installé dans un local adjacent dans une sous station électrique, il est composé d'un moteur diesel VOLVO six cylindres de volume de 16.12 litres et un Alternateur LEROY SOMER, le groupe diesel a ses propres batteries de démarrage et chargeurs de batteries.

Les caractéristiques du générateur diesel sont :

Puissance : 636 KVA

Tension : 400 V

Fréquence : 50 Hz

Nombre de phase : 3

Nombre de fils : 4

➤ **Moteur Diesel :**

Vitesse : 1500 RPM

Consommation fuel : 115.9 litres/h (en charge maximale)

Réservoir fuel : 1100 litres (10 heures d'autonomie)

Temps de démarrage : inférieur à 10 secondes

➤ **Alternateur :**

Puissance : 636 KVA

Facteur de puissance : 0.8

Vitesse : 1500 RPM

Fréquence : 50 HZ

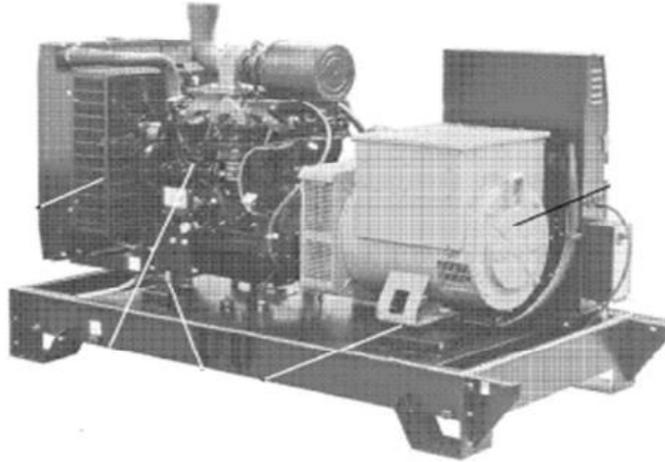


Figure IV.13 : Générateur diesel [71].

IV.2.4 Politique de la maintenance du MEDGAZ :

La politique de la maintenance et sa stratégie consiste à définir les objectifs technico-économiques relatifs à la prise en charge du matériel d'une entreprise.

On a deux politiques distinctes:

- La maintenance préventive.
- La maintenance curative.

Au moment de la détermination de la politique de maintenance qui va être mise en œuvre sur un équipement ou une installation, l'homme de maintenance se trouve devant une alternative classique: doit-il attendre la défaillance du matériel et donc être amené à intervenir sur ce matériel qui n'assure plus tout ou une partie de sa fonction requise, ou bien doit-il faire l'impossible pour éviter que cette défaillance ne se développe et entraîne la « panne » du matériel?

Dans le premier cas on met en place une stratégie de maintenance corrective, alors que dans le second on s'orientera vers une stratégie de maintenance préventive. Il peut paraître simple de répondre à cette question et une première analyse sommaire conduirait à privilégier la maintenance préventive en croyant, à tort, que cette maintenance préventive va supprimer totalement le risque de panne. De fait il n'en est rien car la maintenance préventive ne fait que «réduire la probabilité d'apparition d'une défaillance ». Une analyse plus approfondie montre que le choix entre maintenance corrective et maintenance préventive demande la connaissance et l'examen d'un certain nombre de critères qui, selon le contexte, auront plus ou moins d'importance. [62] Ces critères relèvent des aspects :

- Techniques : fiabilité, maintenabilité, etc.
- Économiques : coûts de maintenance, d'indisponibilité, etc.
- De sécurité : des biens et des personnes.
- Environnementaux.
- De qualité.

➤ **maintenance préventive:**

Il y a deux plannings qui se préparent à chaque mois dans le département de maintenance à ALMERIA un pour OPRT et l'autre pour BSCS (MEDGAZ)

- S'il y a une maintenance curative ils ont le droit de retarder les travaux de la maintenance préventive par ce que la maintenance curative c'est une urgence. Comme ils ont droit d'avancer les travaux si tous les conditions sont vérifiées (personnels, outils, machine en arrêt,...)

- à chaque semaine il y a un nettoyage générale des compresseur à air A, B , C et les deux sècheurs.

- à chaque semaine il y a un test du groupe diesel qui est programmé avec une durée de fonctionnement de 10 minutes en Lod Off et la 4^{ème} semaine en Lod On pour vérifier la température T, la pression P, et le niveau du huile et du l'eau.

- trois à chaque mois il y a un nettoyage des filtres (filtres d'aspiration de l'air de l'atmosphère) du turbo générateurs & turbo compresseurs

- à chaque 3 mois il y a des analyses au niveau de l'Espagne de l'huile synthétique et de l'huile minérale de toutes les unités. à pour objective de testé leur fiabilité.

- à chaque année il y a un planning de peinture de toute la station.

IV.3. L'application de l'inspection boroscopique :

L'inspection boroscopique permet de localiser les défauts et donne également la possibilité de la mensuration. Un défaut décèle sur une pièce sera l'objet d'une étude et comparaison avec les tolérances conformément au manuel du constructeur. [62]

IV.3.1 La partie étudiée :

Durant le stage on a fait une inspection boroscopique sur le moteur d'une turbine à gaz Centaur 40 après 4000 heures de travail et par le boroscope modèle Olympus .



Figure IV.14: Photo Boroscope Olympus [72] .

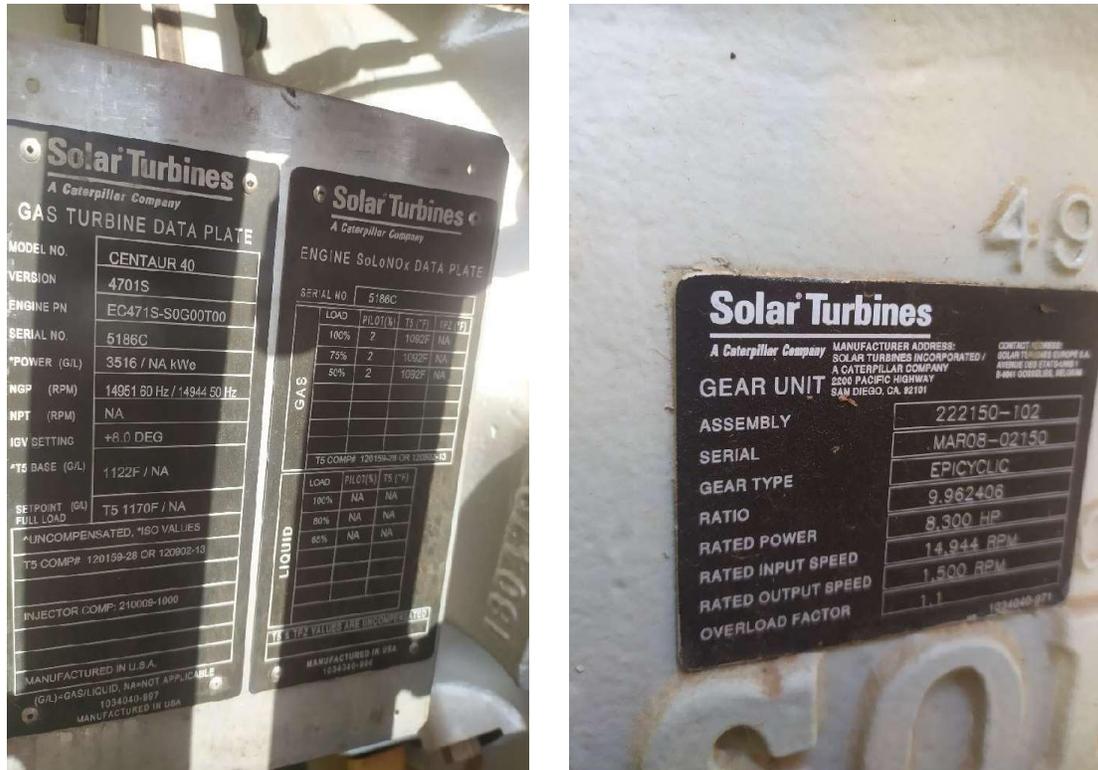


Figure IV. 15: Turbine à gaz et la boîte de vitesse [72]

IV.3.2. Les informations :

IV.3.2.1 Les informations sur l'inspection boroscopique :

Pays : **Algérie**

Nom du client : **Medgaz**

Nom du site : **Beni-saf**

La raison d'inspection : **4000 Heures**

Boroscope utilisé (marque /modèle) : **Olympus**

La procédure du boroscope inspection : **128**

IV.3.2. Sur le moteur :

Moteur GP1 P/N : **4C471S-S0G00T00**

Moteur GP S/N : **5186C**

Puissance du Moteur : **C4700**

Type De Combustion : **SoLoNOx**

Type De Carburant : **Gaz**

Les heures de carburant : **21417**

Nombre total d'heures : **21417**

Remarque : Boroscope terminé après le lavage du compresseur.

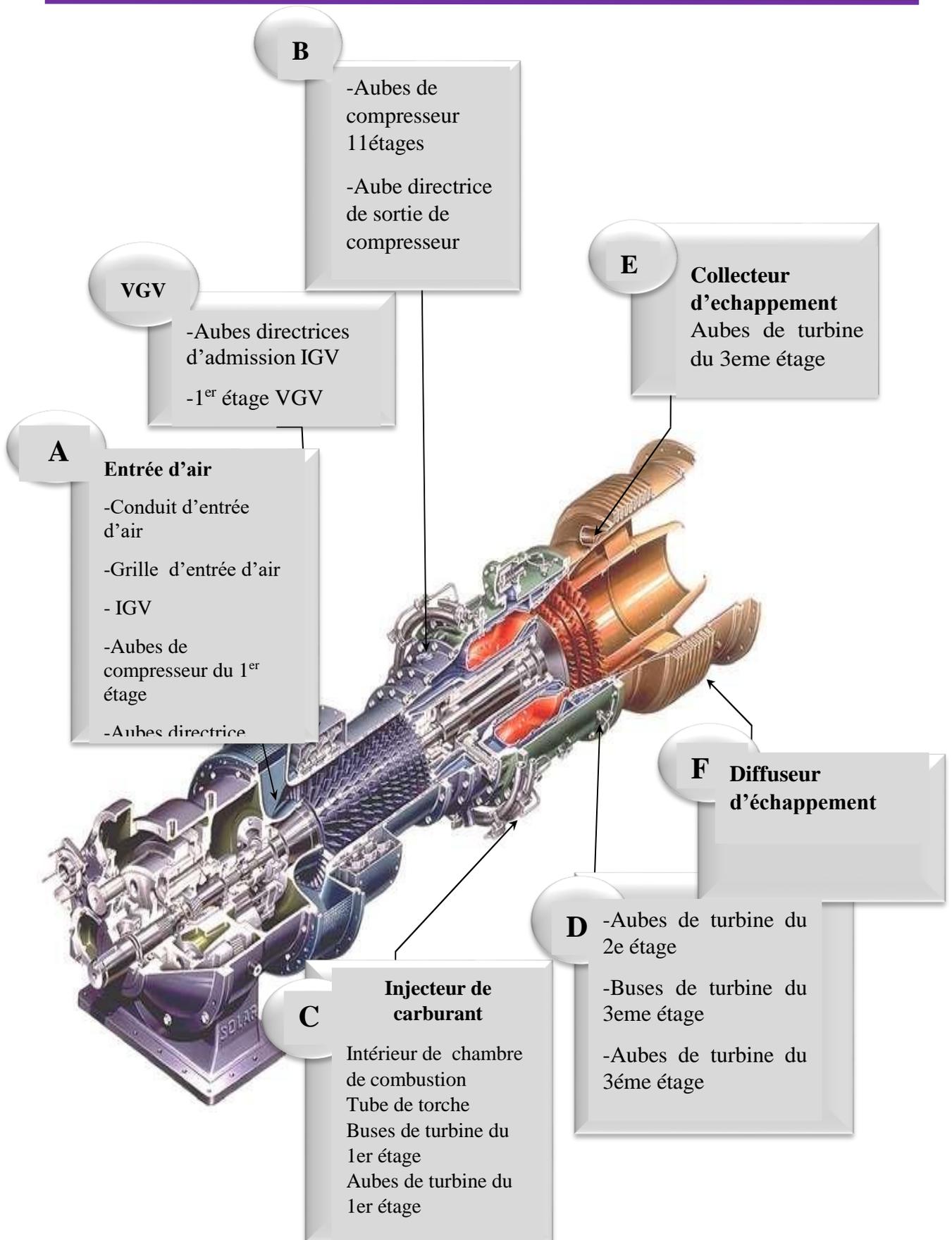


Figure IV.16 : Les lieux de l'inspection boroscopique [72] .

IV.3.3 Liste de vérification 4 point de mesure : (pour avoir plus des détails vérifier Annexe 4)

Etape	Description	Effectué	
		Oui	Non
1	Effectuer l'évaluation des risques liés aux tâches.	✓	
2	Effectuer l'analyse de la sécurité des travaux.	✓	
3	S'assurer que le moteur de la turbine à gaz est refroidi.	✓	
4	Préparer le colis pour une inspection boroscopique..	✓	
5	Effectuer une inspection boroscopique (enregistrer les images, mesures et commentaires sur le rapport de l'inspection boroscopique).	✓	
6	Remettre le moteur de la turbine à gaz en service.	✓	

Tableau IV.10 Liste de vérification [72] .

IV.3.4 Les résultats de l'inspection boroscopique:**➤ Compresseur :****A) Aubes directrices d'admission IGV (Inlet guide vanes) et les aubes de compresseur du 1^{er} étage :**

Les aubes sont affectées par des piqures de corrosion présence des excès d'encrassement, des entailles et des bosses.



Figure IV.17 : Aubes d'admission et de compresseur [72] .

B) Aubes de compresseur du 11^{ème} étage et les aubes directrices de la sortie de compresseur GV (variable guide) :

Les aubes subissent une dégradation progressive due à divers phénomènes comme la corrosion, les impacts de corps étrangers on trouve aussi des excès d'encrassement, des bosses, manque de métal et absence de revêtement par apport au GV (*variable guide*).

Cette dégradation peut entraîner une diminution des performances, une augmentation des vibrations



Figure IV.18 : Aubes du 11^{ème} étage [72] .



Figure IV.19: Aube directrice GV [72] .

➤ **Chambre de combustion et la section turbine :**

A) Injecteur :

Les injecteurs jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des chambres de combustion des turbomachines comme les turbines à gaz. Leur conception et leur intégrité ont un impact direct sur la qualité de l'injection du carburant, et donc sur l'efficacité et la stabilité de la combustion.

On remarque que le Rayon est cassé, Trou de combustible contaminé ou bloqué et présence des fissures.



Figure IV.20: Injecteur [72] .

B) Interieur de la chambre de combustion :

L'état de l'intérieur d'une chambre de combustion est un facteur clé pour garantir les performances et la sécurité des turbomachines. Une conception optimisée, associée à un suivi régulier et une maintenance adaptée, sont essentiels pour maintenir l'intégrité de la chambre et assurer un fonctionnement fiable sur le long terme .

Il peut subir une dégradation progressive due à divers phénomènes comme l'encrassement, la corrosion, l'érosion ou les chocs thermiques



Figure IV.21 : Intérieur de la chambre de combustion [72] .

C) Tube de torche , Aubes de turbine du 1er étage :
Sont affectées par de l'érosion , les dommages étrangers d'objet (Foreign outside damage) FOD , des fissures et oxydation



Figure IV.22 : Tube de torche [72] .

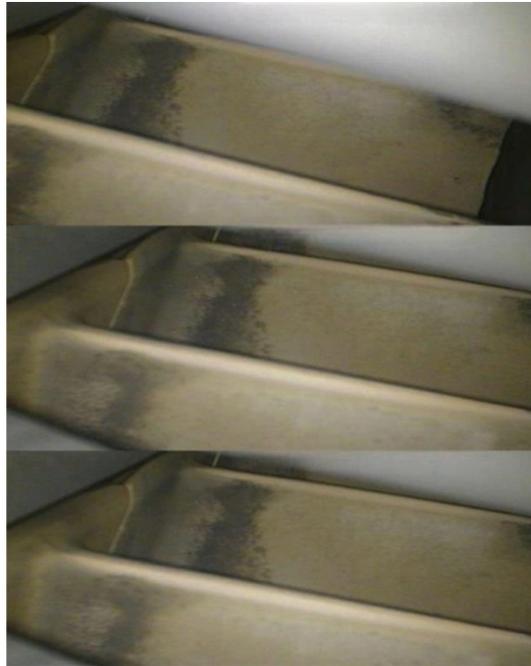


Figure IV. 23 : Aube de turbine 1^{er} étage [72] .

D) 3^{ème} aube de turbine et 3^{ème} buse de turbine :

- Fissures, quantité, longueur, orientation
- Érosion thermique. Profondeur, surface
- FOD et oxydation



Figure IV.24 : Trois^{ème} aube et buse de turbine [72].

➤ **VGV (variable guide vanes):**

A) Aubes directrices :

On Remarque des fissures et érosion thermique .



Figure IV.25 : VGV [72].

IV.3.5 Interpretation :

- Pour la chambre de combustion les boîtes de brûleur sont vérifiées pour les fissures et les défauts d'alignement. Buses à combustible et d'autres parties, sont vérifiées pour la fissuration et la déformation.
- Pour les turbines sont soumises à des dommages ingérés des corps étrangers (FOD), la corrosion, l'érosion, la dégradation thermique, la fissuration et la distorsion. Étant donné que les parties qui sont les plus vulnérables aux dommages ne sont pas facilement disponibles pour une inspection visuelle sans aide, la seule méthode disponible pour déterminer l'état d'une turbine est l'utilisation d'un vidéoscope, boroscope.
L'inspection boroscopiques des Turbines aident à maintenir la fiabilité de la turbine à gaz. Cela signifie plus de sécurité et plu de temps qu'un moteur peut fonctionner .
- Pour connaître le stade de la corrosion, il est essentiel d'observer attentivement les signes visibles sur la surface du matériau affecté.
Car La corrosion peut être évaluée en fonction de différents critères, notamment la présence de cavités, de rouille, de décoloration, de fissures ou de perforations.
En cas de corrosion par piqûres, des cavités se forment à la surface du matériau, pouvant éventuellement perforer la paroi.
D'autre part, la corrosion cavernueuse se manifeste par des cavités qui se développent à l'intérieur du matériau, souvent dans des zones difficiles à observer. Pour déterminer le

stade de la corrosion, il est crucial de rechercher ces caractéristiques spécifiques et de prendre en compte la profondeur, l'étendue et la localisation des dommages sur le matériau affecté[2][3].

Selon le stade de la corrosion, on distingue les catégories suivantes :

- **Catégorie 1:** Présence de quelques traces de corrosion [ponctuelles].
- **Catégorie 2:** Présence de quelques zones et traces de corrosion, avec perte de coating [couche de protection].
- **Catégorie 3:** Oxydation.
- **Catégorie 4 :** Pénétration en profondeur .

Suivant que le défaut est de catégorie une, deux, trois ou quatre, on effectue les heures d'interventions.

Aujourd'hui, de nombreuses inspections boroscopiques sont mandatés par les fabricants. Et l'inspection des différents éléments obéissent au respect strict des normes et recommandation du constructeur. Elle dépend de la longueur de la fissure, de son orientation, de sa zone, du numéro d'étage .

IV.4 Conclusion :

L'inspection boroscopique contribue à minimiser les risques pour la sécurité en détectant les défauts qui pourraient causer des accidents ou des blessures.

Améliorer la productivité : En réduisant les temps d'arrêt imprévus, l'inspection boroscopique contribue à améliorer la productivité en garantissant un fonctionnement optimal des équipements.

Suite aux premières photos d'IGV/VGV et des aubes de compresseur sur le 1er étage, nous avons remarqué qu'il n'y avait presque pas de peinture de couche protectrice et une présence notable de corrosion et de contamination.

Pour toutes les autres parties du moteur (carburateur à combustion, injecteurs, torche et PT (*power turbine*), ils sont en état normal et non dommages enregistrés, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour y remédier.

- ✚ Pour des fissures ou de la corrosion limitées à certaines zones, il est possible de procéder à des réparations locales. Cela peut inclure :
 - ✚ Le soudage ou le rechargement pour combler les fissures
 - ✚ Le grenailage ou le polissage pour éliminer les piqûres de corrosion superficielles
 - ✚ Revêtements protecteur (peinture, dépôts, etc.)
 - ✚ Le remplacement de pièces spécifiques présentant des défauts trop importants

En conclusion, la turbine est prête à être exploitée dans des conditions sûres.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'amélioration de la disponibilité des matériels et de la sécurité des personnes passé par utilisation des techniques avancées de maintenance : l'analyse du comportement vibratoire qui représente 75% sur l'ensemble des techniques appliquées ; les analyses et le contrôle non-destructif 12% ; la thermographie qui prend actuellement un essor important et qui représente environ 8% ; les analyses des courants moteurs 3,5% et enfin l'analyse des particules dans les huiles 1,5%.

Dans cette étude nous avons eu l'occasion d'approfondir nos connaissances sur les différentes techniques de maintenance préventive appliqués sur les machines tournantes (groupe turbomoteur, motopompe, turbine à gaz , motoventilateur etc..) et des machines statiques (chaudière, transformateur, condenseur etc...) au niveau de l'entreprise MEDGAZ.

L'outil le plus utilisé dans la maintenance conditionnelle et préventive est celui de l'analyse des vibrations qui connaît aujourd'hui un développement très important du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal, et le contrôle non destructif ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des dégradations importantes des organes soit par suivi des anomalie vibratoire, lorsque le niveau des vibrations atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette dernière, ou bien par inspection boroscopique qui details par suite.

L'inspection boroscopique offre plusieurs avantages pour la maintenance préventive des machines tournantes, notamment :

- Détecter les défauts à un stade précoce : permet de détecter les signes de dégradation ou de défaillance, comme les fissures, l'usure ou les dommages, avant qu'ils ne deviennent critiques.
- Planifier des interventions de maintenance préventive : En détectant les défauts à un stade précoce, il est possible de planifier des interventions de maintenance préventive pour éviter les pannes coûteuses et prolonger la durée de vie des équipements.
- Économiser du temps et de l'argent : évite les temps d'immobilisation liés aux démontages, ce qui représente un gain de temps et d'argent considérable.
- Améliorer la sécurité : L'inspection boroscopique contribue à minimiser les risques pour la sécurité en détectant les défauts qui pourraient causer des accidents ou des blessures.
- Améliorer la productivité : En réduisant les temps d'arrêt imprévus, l'inspection boroscopique contribue à améliorer la productivité en garantissant un fonctionnement optimal des équipements.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Document de cour de maintenance Industrielle Dr. T. NEHARI , Université Belhadj Bouchaib
- [2] H.P. RAMELLA. Maintenance des turbines à vapeur. Techniques de l'ingénieur, Référence BM4186. 2002.
- [3] Article mobility work « Quel est le rôle de la maintenance ? » Le site web : [https://mobilitywork.com/fr/blog/maintenance\)industrielle](https://mobilitywork.com/fr/blog/maintenance)industrielle)
- [4] livre de pratique de la maintenance préventive –Dunod
- [5] Jean-Baptiste Léger, Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production, thèse de niveau doctorat, Université de Nancy 1, Nancy, 1999, 212 p
- [6] Mémoire fin d'études "mise en place d'un plan de maintenance préventive pour l'amélioration de la disponibilité de la ligne TAMBOUR au sein de SAMHA (Brandt) Sétif, Université Bejaia
- [7] Jérémy Laurens, Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique
- [8] Mémoire fin d'étude " Optimisation de la maintenance préventive d'une pompe centrifuge GA -1102", UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, BADEREDDINE HOCINE, 23/05/2016 présenté par : BADEREDDINE Hocine et DJEGHBALA Amor
- [9] F. Monchy « Maintenance, Méthodes et organisation » Edition DUNOD, Coll. L'usine Nouvelle série gestion industrielle (2eme édition), Paris, 2003.
- [10] Document de cour de maintenance M. siadani Djamel Eddine , Université Tlemcen
- [11] H. Djamel « Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines Dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures » Thèse de Doctorat, Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2014.
- [12] A. BELHOMME : BTS Maintenance industrielle « Cours de stratégie de maintenance»

Bibliographie

- [13] Polycopié [Rappels de cours sur la vibration].
- [14] Site web: www.weebly.com.
- [15] Formation: Analyse vibratoire des machines tournantes (chapitre2-l'analyse vibratoire);01db, Metravib technologies. Auteur: F. champavier.
- [16] Landolsi Foued, cours de technique de surveillance.
- [17] Maxi cours-Analyse spectrale.
- [18] Techno-science « Analyse spectrale: définition et explications ».
- [19] (Y.K. Lin.Probablistic theory of structural Dynamics, New York, Robert E. Krieger publishing company, juillet 1976,388P.)
- [20] Site web : PCE-France.Fr.
- [21] Site web : [Measures.com/guides d'achats/quel choix pour les capteurs?](http://Measures.com/guides-d'achats/quel-choix-pour-les-capteurs/)
- [22] Informations lexicographiques [archive]et étymologiques[archive]de"accelerometre"dans le trésor de la langue française informatisé, sur le site du centre national de ressources textuelles et lexicales.
- [23] « Capteur de déplacement haute précision », sur [sensel-measurment. Fr](http://sensel-measurment.Fr),6novembre 2019.
- [24] Article « explorer les applications des capteurs de proximité », auteur: William sur geya.net, le 06 mars 2023.
- [25] Article"capteur-proximite-technologies"sur celdu-relais.com\Fr.
- [26] Article ‘comment choisir un capteur’ sur le site : pitch-technologies.fr.
- [27] Article les composants 4.0: comment choisir les capteurs des données? Par Genium 360 le 27 mars 2019 sur le site : [blogue.genium 360.ca](http://blogue.genium360.ca).
- [28] Article Critères de sélection des capteurs de pression par Anju Thangam Joy le Août 30, 2023 sur tameson.fr.
- [29] Article Bien choisir un capteur de niveau sur guide.directindustry.com.
- [30] Alain Boulenger et Christian Pachaud, "Surveillance des machines par analyse des vibrations" AFNOR 2^{eme} tirage 1998.
- [31] Jacques Baudy, Alain Boidin, Gilles Brenier, Hugues Delannoy et Luc pilot ingénieurs et formateurs de SCHENCK"Vibration-équilibre sur site. Application à la maintenance conditionnelle".

Bibliographie

- [32] [chapitre2- vibration libre du système a un degré de liberté], PDF. Ounis-hadj, sur le site du univ-batna 2.dz.
- [33] Dynamique des systèmes, chapitre 02. Vibration des systèmes mécaniques à deux degrés de liberté. Auteur: Mohamed el yahyaoui, sur ACADEMIA.edu.
- [34] Meriem Hayani Mechkouri.integration des comportements vibratoires dans les systèmes de conception et fabrication assistés par ordinateur(CFAO). Génie mécanique[physiques-class-ph]. Ecole national supérieure d'art et métiers-ENSAM, Meknès, 2018.Français.
- [35] Chapitre2-systemes-discrets-a un degré de liberté .PDF sur staff.univ-batna2.dz.
- [36] Article « système continu », sur sii-tannerelli.com.
- [37] Systèmes linéaires continus et invariants, PDF: sciences industrielles. Papanicola Robert.lycee jacques Amyot, le 28-10-2003.
- [38] Article « dynamique des rotors en flexion », Auteurs: Michel LALANNE, Guy FERRARIS.sur techniques-ingenieurs.fr
- [39] Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme du master académique par 'Aimeur Noureddine', intitulé: étude dynamique d'un rotor par éléments finis., Université Kasdi Merbah Ouargla .
- [40] Thèse présenté pour l'obtention du titre de docteur de l'école centrale de LYON: dynamique non linéaire des rotors, applications numériques et expérimentales à un rotor flexible. Doctorale de LYON(UCBL/INSA/ECL) par Cristiano VIANNA SERRA VILLA.
- [41] Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs (Christophe Migeon)
- [42] Cours Pdf Analyse vibratoire des machines tournantes (Origine des Vibrations) “Chapitre 3”
- [43] Article mécanique des vibrations
- [44] THÈSES DE L'ENTRE-DEUX-GUERRES 5(P. SÉMIROT Chocs et solutions Périodiques dans le problème des trois corps)
- [45] Dynamique des Solides et des Structures 5 eme Edition ´ octobre 2016 (Sylvain Drapier) Centre Science des Matériaux et des Structures & UMR CNRS 5146 ´ Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [46] Université Batna COURS CHAPITRE 02 SYSTEMES A N DEGRES DE LIBERTE
- [47] Logiciels de calcul de structures ‘dlubal’
- [48] Méthode des éléments finis Wikipédia

Bibliographie

[49] L. PAOLI M. SCHATZMAN Mouvement à un nombre fini de degrés de liberté avec Contraintes unilatérales : cas avec perte d'énergie RAIRO – Modélisation mathématique et Analyse numérique, tome 27, no 6 (1993), p. 673-717. 44 Chapitre 1 'Systèmes linéaires' ellipses

[50] UV Traitement du signal Cours 4 Systèmes linéaires continus Définition et caractérisations (Temporelle et fréquentielle).

[51] Cours de Signaux PeiP2 polytechnique France.

[52] Cours Chapitre III : Système linéaire invariant dans le temps (SLIT).

[53] Cours de technologie électrique et électronique, signaux variables : représentation, Auteur : Gérald Huguenin sur ingenierie.he-arc.ch .

[54] PDF Analyse spectrale par Jean-Philippe Muller.

[55] [wikipedia.org/wiki/Transformation de Fourier](http://wikipedia.org/wiki/Transformation_de_Fourier) .

[56] Article Transformée de Fourier : qu'est-ce que c'est ? sur www.futura-sciences.com.

[57]Decomp-série-fourier-signal-periodique.pdf Université de Genève, Site web : <https://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpi/Liens/Protocoles/Complements/Decomp-serie-fourier-signal-periodique.pdf>

[58]Phénomène de déséquilibre et équilibrage sur le site web : <https://www.maxicours.com/secours/phénomène-de-déséquilibre-et-equilibrage>

[59] MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER INTITULÉ Etude des défauts du roulement par analyse spectrale et cepstrale FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIOIRAT UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA.

[60] MÉMOIRE PRÉSENTATION EN VUE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE MASTER INTITUL DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DES ROULEMENTS PAR L'ANALYSE DE VIBRATION FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIOIRAT Département DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA.

[61] JGC/TAS Project, Inspection log book , SH/DP/Hassi Messaoud, Procédure de suivi sur le chemp de Hassi r'mel

[62] Mémoire de fin d'études EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DES ÉTUDES UNIVERSITAIRES APPLIQUÉES EN AÉRONAUTIQUE ; intitulé : INSPECTION BOROSCOPIQUE DU MOTEUR PW 127F ÉQUIPANT L'ATR 72-500. UNIVERSITE SAAD DAHLEB-BLIDA ; FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR Département d'Aéronautique.

[63]Le site https://www.pce-instruments.com/french/instruments-de-mesure/mesureur/boroscope-kat_162387.htm

Bibliographie

- [64] Le site web :<https://www.mouser.lu/images/marketingid/2020/img/104519899.png>
- [65] Le site web : <https://www.pce-instruments.com/french/>
- [66] Le site web : <https://teslong.com/blogs/news/the-top-5-industries-that-use-borescopes-for-maintenance>
- [67]https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/inspection_tools_instruments/borescopes
- [68] Le site web : <https://industrial.evidentscientific.com.cn/fr/applications/inspection-of-large-reciprocating-engines/>
- [69] Document e l'entreprise MEDGAZ
- [70] Le site :www.medgaz.com
- [71] Rapport de stage sur MEDGAZ
- [72] Document du rapport de l'inspection boroscopique par l'équipe de Maintnance MEDGAZ

LISTE DES ABRIVIATION

Liste des abréviations

AFNOR	Association Française de Normalisation
ISO	Organisation internationale de normalisation
DIN	Organisme allemand de normalisation
VDI	Norme allemande
BS	Norme Britannique
RMS	Root Mean Square
CPM	Nombre de cycles par minute.
RPM	Nombre de rotations par minute
CAN	Le convertisseur analogique-numérique
LVDT	Linéaire Variable Différentiel Transformer
BCU	Bearing condition unit
HFD	High frequency detector) pour le constructeur SKF
DDL	Degré de liberté
MEF	Méthodes des éléments finis
LTI	Linéaire et invariant temporel
TFD	Transformée de Fourier Discrète
FFT	Transformée de Fourier Rapide
TFCT	Transformée de Fourier de Temps Court
API	Axe principal d'inertie
BPFO	Ball Pas Fréquence Outre
BPFI	Ball Pas Fréquence Inné
FTF	Fondamental 1 train Fréquence
BSF	Ball Spin fréquence
ESD	ElectroStatic Discharge
HP	High pressure
LP	Low pressure
IGV	Inlet guide vanes
VGW	Variable guide vanes

LISTE DES ABRIVIATION

PT	Power turbine
FOD	Foreign outside damage
EGT	Exhaust gas temperature
CND	Contrôle non destructif
CCD	Charge coupled device
LED	Light- Emitting Diode
SD	Stockage de données
USB	Universal Serial Bus

LISTE DES SYMBOLE

Liste des symboles

Symboles	Désignations	Unités
F(t)	Force	(N)
X(t)	Déplacement	(mm)
M	Masse	(Kg)
F	Fréquence	(Hz)
T	Période	(s)
A	Amplitude	(mm)
V	Vitesse	(mm/s)
Sin	Fonction sinusoïdale	-
a₀, a_n, b_n	Coefficient de la série de Fourier	-
K	La constante de raideur	(N/mm)
X	La position	-
ω	Fréquence angulaire	(rad/s)
n eff	La vitesse vibratoire efficace	(mm/s)
F_r	Fréquence de rotation	(tr/min)
δ(t)	La distribution de Dirac	-
P	Puissance électrique	MVA
g	Gravité	N/kg
cos	Cosinusoïdale	-

ANNEXES

ANNEXE - 1

A1 :

➤ L'analyse spectrale

L'analyse spectrale constitue un élément clef du traitement du signal, elle a pour objectif d'améliorer la connaissance d'un signal en s'intéressant au domaine fréquentiel. L'analyse spectrale vise à extraire le spectre énergétique d'un signal. Et parmi les utiles utilisés dans le domaine spectral :

- Transformées de Fourier de signaux classiques, visualisation des spectres réels.
- Chaînes de mesure : accéléromètres et leur fixation, analyseurs FFT (fonctionnement, utilisation).
- Utilisation des fonctions zoom, cepstre, enveloppe.
- Choix des échelles de mesure.
- La surveillance par des capteurs sans contact.

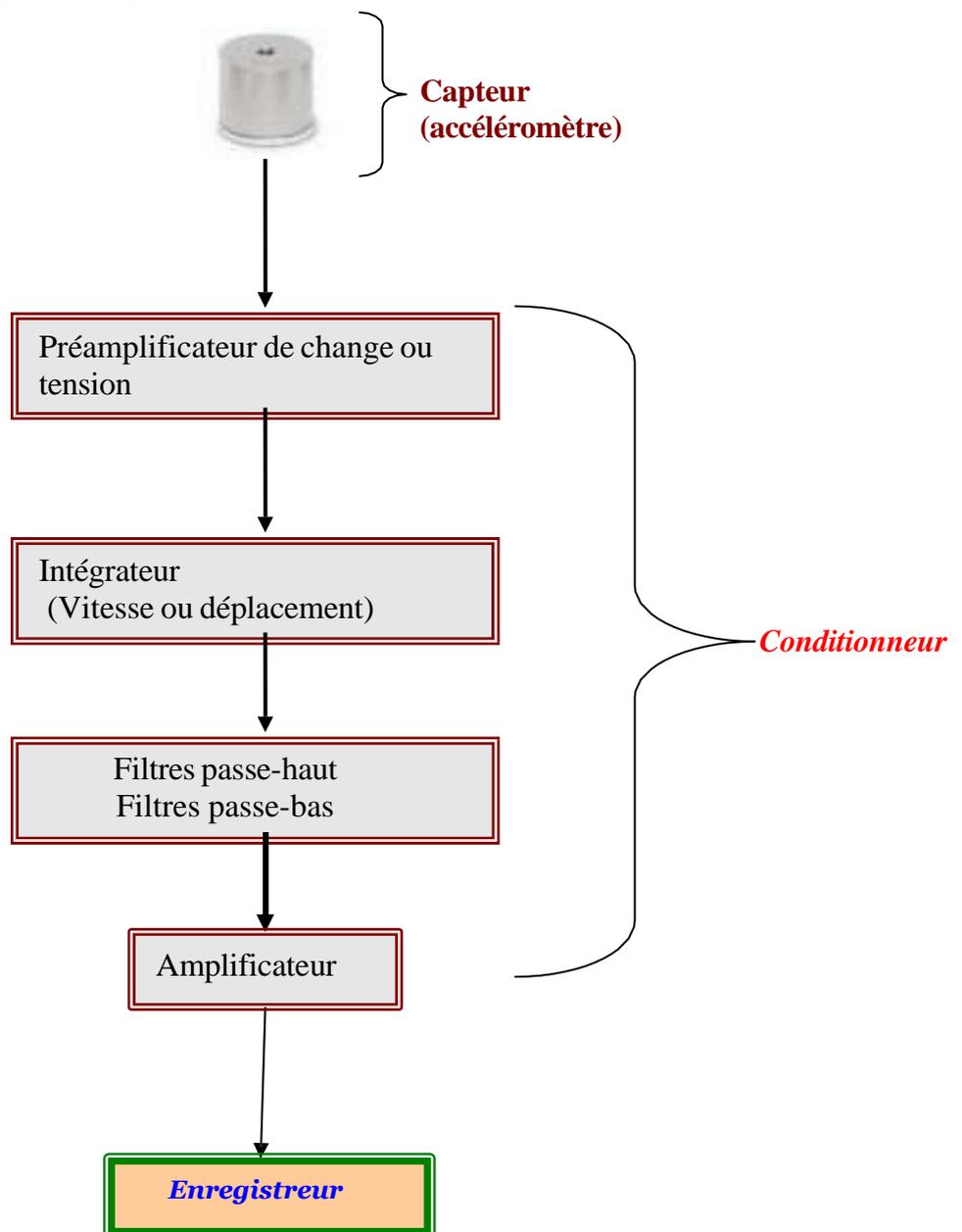


Fig.A1.1 Chaînes de mesure

➤ L'appareille de mesure

OFF LIGNE :

C'est un appareil de mesure portable Fig. A.1.2 Fonctionnant à l'aide d'une batterie pour le diagnostic de la maintenance conditionnelle des machines. Une utilisation simplifiée et fiable est obtenue grâce au point suivant :

- Un faible encombrement (p=800g)
- Technique moderne à microprocesseur
- Configuration accessible par menus
- Possibilité graphique sur un écran
- Le stockage de plusieurs rapports

La représentation des résultats de mesure sur l'écran se fait sous la forme suivant :

- Affichage numérique des mesures
- Fonction zoom on mode graphique



Fig.A1.2 VIBROTEST 60

ON LIGNE :

Dans ce cas les capteurs sont installés a un point fixe (Fig.III.9) et la périodicité des mesures correspondra à la rapidité maximale de l'unité d'acquisition qui permet de donner des mesures instantanées reliées avec la salle de contrôle.

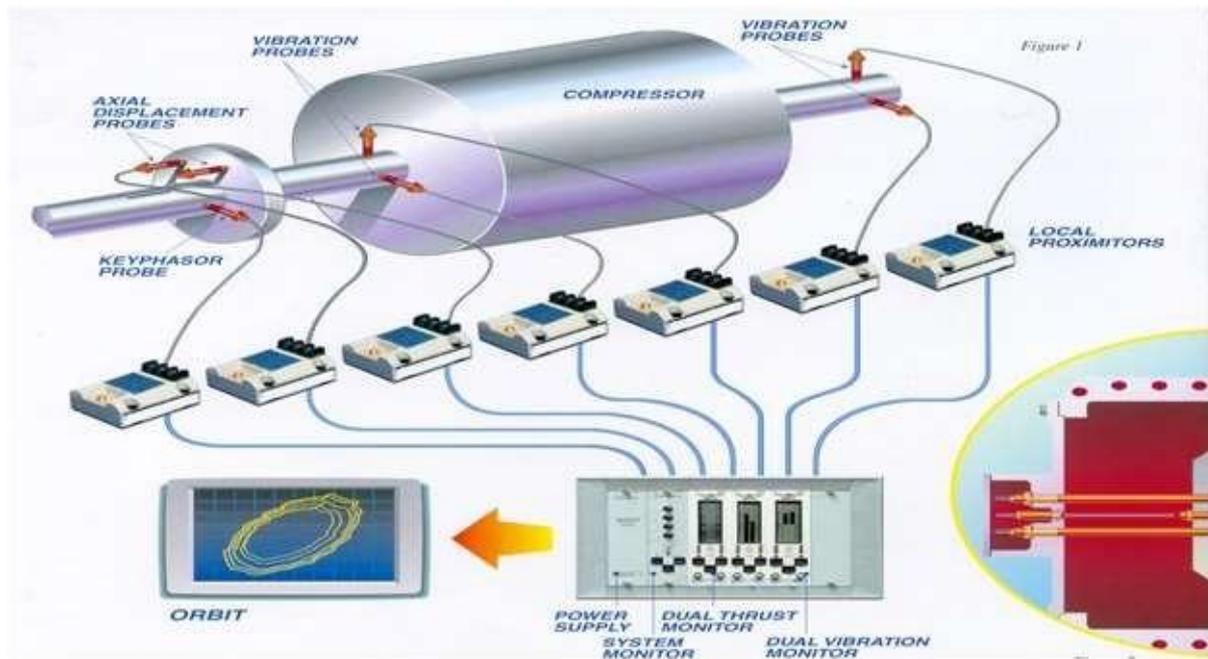


Fig.A1.3 Principe des mesures ON LINE

Pour représenter le signal vibratoire sous une forme exploitable, on a cherché à le représenter dans un diagramme amplitude fréquence appelé spectre.

Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales élémentaires du signal est parfaitement définie par son amplitude et sa fréquence

La représentation spectrale du signal devient ainsi claire et exploitable

➤ **Interprétation des spectres**

D'après la représentation spectrale des vibrations on peut définir le type de panne dans la machine.

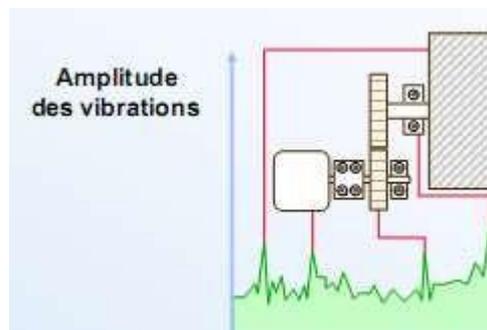


Fig.A1.4 le spectre est une empreint digitale

Types des signaux a rencontrés.

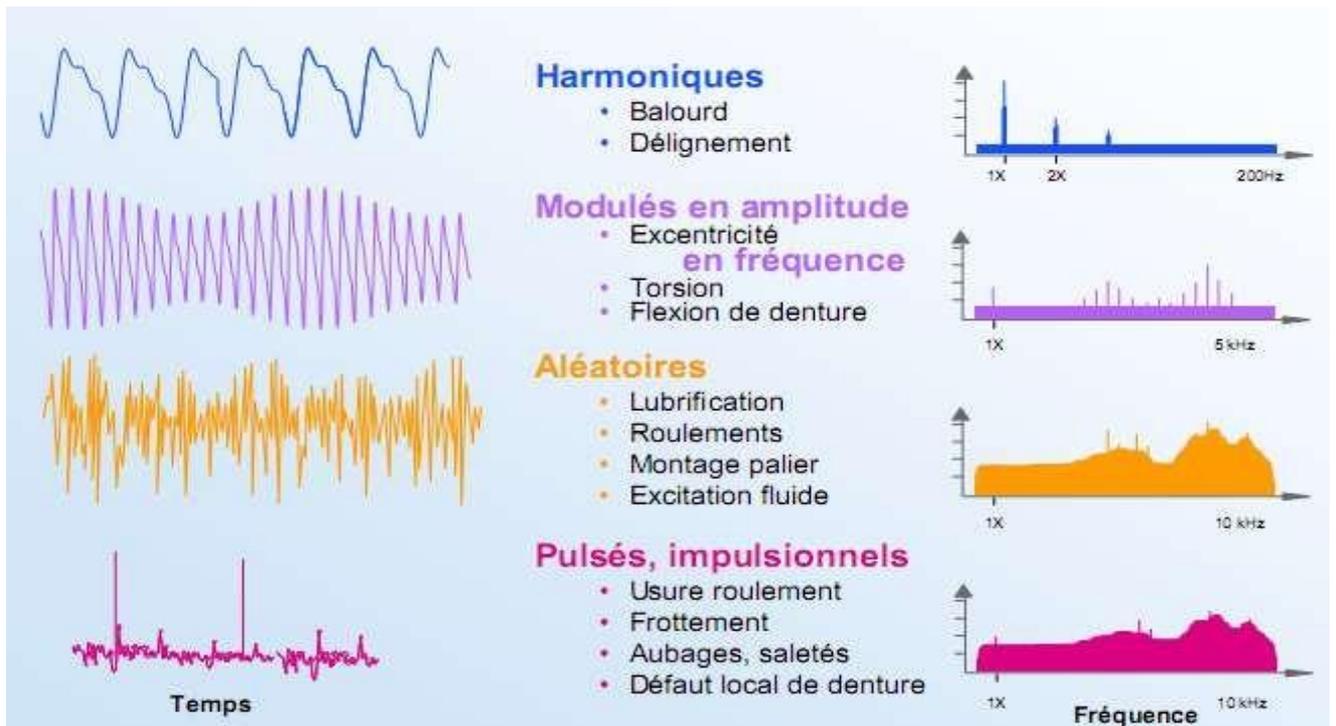


Fig.A1.5 Principaux défauts mécaniques

ANNEXE - 2

A2 : Suivi du niveau vibratoire des indicateurs (niveaux globaux)

Pour peu que les mesures aient été prises soit sur différentes bandes de fréquences, soit selon différents indicateurs eux-mêmes plus sensibles à différentes fréquences, il est possible, en regardant de façon comparative l'évolution des niveaux de ces différents paramètres, de se faire une idée des familles de défauts responsables de la vibration des machines et, éventuellement, d'orienter les recherches pour des analyses complémentaires (tableau ci-dessus).

Tableau 1 – Suivi du niveau vibratoire des indicateurs					
Types de défauts		Déplacement	Vitesse	Accélération	Chocs
Basses fréquences					
<ul style="list-style-type: none"> • Balourd • Désalignement • Usure d'accouplement • Desserrage • ... 		/	/	→	→
Moyennes fréquences					
<ul style="list-style-type: none"> • Engrènement défectueux • ... 		→	/	/	/
Hautes fréquences					
Roulements	• Usure régulière	→	→	/	→
	• Mauvais graissage	→	→	/	→
	▪ Début d'écaillage	→	→	→	/
	▪ Marquage important	→	→	/	/
	• Très dégradé	→	/	/	→

ANNEXE -3

A3 : Classification des machines

D'une manière générale les normes répartissent les machines selon des groupes ou classe, cette classification est basée sur des nombreux paramètres dont les principaux sont :

- ✚ Le type de machine :
 - ✓ Classique (moteur électrique ,pompe, ...).
 - ✓ Spéciale (mouvement alternatif).
- ✚ La taille : définie par la puissance.
- ✚ La vitesse de rotation.

Le paramètre vibratoire utilisé pour la classification des machines est : un niveau globale en mm/s RMS entre 10et 1000 Hz.

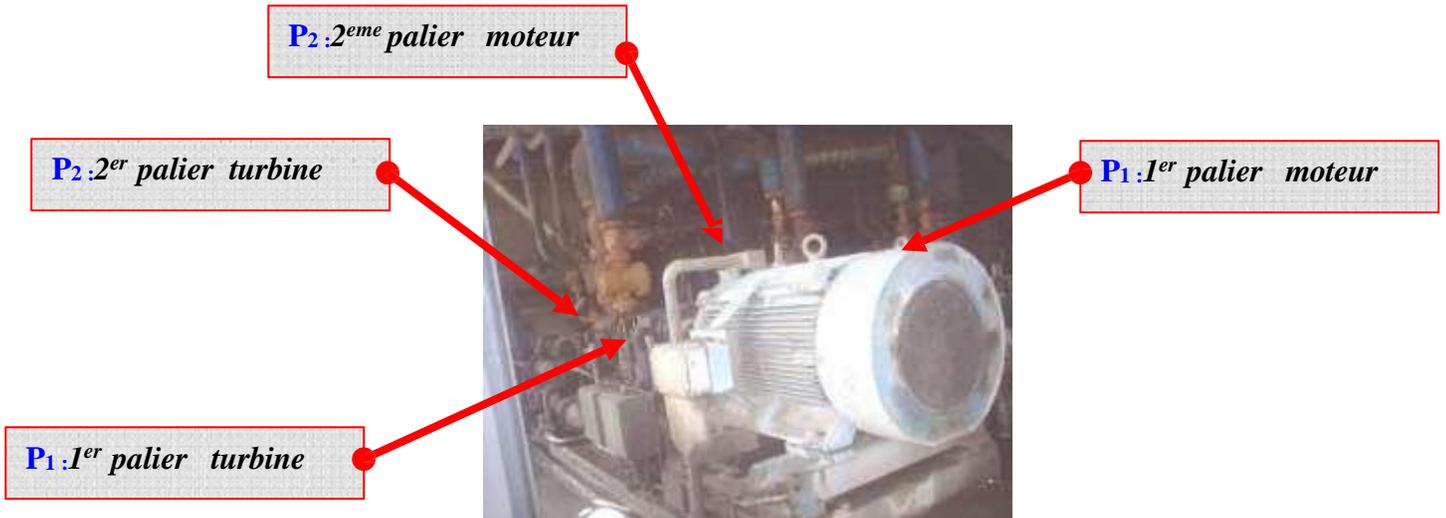
Le tableau ci-dessus est un exemple de classification des machines « extrait de la norme français E 90 -300 ». Les machines sont classées en 6 groupes :

GROUPE I	Eléments de moteurs ou de machines qui, dans leurs conditions normales de Fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machines. Les moteurs électriques produits en série, de puissance allant jusqu'à 15 KW, Sont des exemples typiques de machines de ce groupe.
GROUPE II	Machines de taille moyenne, en particuliers moteurs électriques de Puissance comprise entre 15 et 75 KW sans fondations spéciales : Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300KW) Sur fondation spéciales.
GROUPE III	Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses Tournantes montées sur des fondation rigides et lourdes relativement rigides Dans le sens de la vibration.
GROUPE IV	Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses Tournantes montées sur des fondations relativement souples dans le sens de la Vibration (exemple : groupes turbo générateurs, particulièrement ceux qui sont Installés sur des fondations légères).
GROUPE V	Machines et dispositifs d'entraînement mécaniques avec effets d'inertie non équilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces),montés sur des fondations relativement rigides dans la direction des vibrations.
GROUPE VI	Machines et dispositifs d'entraînement mécaniques avec effets d'inertie non Equilibrés (dus au mouvement alternatif des pièces), montés sur des fondations Relativement souples dans la direction des vibrations ; machines avec masses Tournantes accouplées souplement telles que : arbres de broyeurs ; machines ; Telles que centrifugeuses avec déséquilibres variables, capables de fonctionner Isolément, sans l'aide d'éléments de liaison, cribles, machines à tester la fatigue Dynamique et générateurs de vibrations pour les industries de transformations.

ANNEXE - 4

A4 : Les points de mesures

A4 : 1. Points de mesures d'une turbine (partie moteur) :



A4 : 2. Ventilateur tirage-soufflage :

