

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Electromécanique
Domaine : Science et technologie
Filière : Hygiène et sécurité industrielle
Spécialité : Hygiène et sécurité industrielle

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Diagnostic Des Défaits Des Roulements Par Analyse
Vibratoire Et Leurs Impact Sur Les Machines**

Présenté par: *Mekhalfia Haroun.*
Boutouil H'maida.

Encadrant: *Hadjaj Aoul Elias Professeur U. Annaba*

Jury de Soutenance :

DJEMAI M	Maître de conf B	Annaba	Président
HADJADJ .A.Elias	Professeur	Annaba	Encadrant
KERFALI .Samir	Maître Assistant B	Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

On tient à remercier vivement toutes

les personnes qui ont

Contribué à la réalisation de ce travail de fin d'études.

Mr HADJADI Aoul Elias, le promoteur de ce

travail, sans qui ce travail n'aurait jamais eu

lieu. On le remercie pour sa disponibilité, pour ses

éclaircissements scientifiques, ainsi que

Pour ses précieux conseils.

Aux membres du jury qui ont pris

sur leur temps et aménage leurs

volonté pour examiner et porter une

critique à ce modeste travail.

A tous les enseignants du HSI.

Liste des figures

<i>N de figure</i>	<i>Titre de figure</i>	<i>page</i>
Chapitre I	<i>LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE</i>	...
Figure. I .1 :	les différents types de maintenance.....	04
Chapitre II	<i>VIBRATION</i>	...
Figure II.1 :	Origine du bruit.....	13
Figure II.2 :	Caractéristiques d’une vibration Sinusoïdale ou quelconque.....	14
Figure. II.3:	Courbe de Tendence.....	15
Figure. II.4 :	Niveau vibratoire.....	16
Figure. II.5 :	Défauts d'usinage causant le balourd.....	17
Figure. II.6 :	Les types de mauvais alignements.....	18
Figure. II.7 :	Défauts de roulements.....	19
Figure. II.8 :	Vue en coupe d’un roulement.....	21
Figure .II.9 :	défauts d’engrenages.....	22
Figure. II.10 :	Différentes méthode d’analyse.....	23
Figure. II.11 :	Domaines d'application de l’analyse vibratoire.....	25
Fig. II.12 :	Schéma de principe d’un accéléromètre.....	28
Figure. II.13 :	Courbe de réponse d’un accéléromètre.....	29
Figure II.14 :	Différents types de roulements.....	31
Figure II.15 :	Défaut de roulement – usure.....	32
Figure. II.16 :	Défaut de roulement – dentelure	33
Figure II.17 :	Défaut de roulement - Rupture de la cage.....	33
Figure. II.18 :	Défaut de roulement – bavure.....	34
Figure II.19 :	Défaut de roulement – écaillage.....	35
Figure .II.20 :	Défaut de roulement – corrosion.....	35
Figure. II.21 :	Défaut de roulement – cassure.....	36
Figure. II.22 :	Défaut de roulement – choc électrique.....	36
Chapitre III	<i>APPLICATION</i>	...
Figure.III.1 :	L’appareil de base PT 500.04	39

Figure. III.2:	Aperçu des composants du PT 500.04.....	39
Figure .III. 3:	Différente composent de la chaine de mesure.....	40
Figure .III. 4:	Amplificateur de mesure.....	41
Figure .III.5 :	Appareil de Mesure USB.....	41
Figure .III.6 :	Capteur de mesure avec câble de raccordement.....	42
Figure.III.7 :	Capteur de référence avec rotation support magnétique.....	42
Figure.III.8 :	Capteur de vitesse de ou référence.....	42
Figure.III.9 :	Extrait de la vue en plan.....	43
Figure.III.10.	L'appareil PT 500.04 (le stand).....	44
Figure.III.11	Spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement	46
Figure.III.12	Spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm).....	47
Figure.III.13	Spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm).....	47
Figure.III.14	Spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm).....	48
Chapitre IV	EVALUATION DES RISQUES	...
Figure. IV.1.:	Plan par étapes gestion des risques / analyse des risques.....	56
Figure. IV.2:	Typologie des méthodes d'analyse de risques.....	58
Figure. IV.3 :	Classification des principales méthodes d'analyse de risque qualitatives.....	58
Figure. IV.4 :	Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon.....	61
Figure. IV.5 :	L'analyse des défaillances.....	63
Figure. IV.6 :	Décomposition fonctionnellement de système.....	69
Figure. IV.7:	Décomposition du système en organes les plus élémentaire.....	69

Liste des tableaux

<i>N du tableau</i>	<i>Titre du tableau</i>	<i>Page</i>
Chapitre II :	Vibration	...
Tableau II .1.	Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements.....	20
Chapitre III :	Applications	...
Tableau.III.1.	désignations des éléments du stand.....	43
Tableau III.2	La géométrie du roulement (en mm).	45
Chapitre IV :	Evaluation des risques	...
Tableau IV.1 :	Indice de la fréquence F.....	65
Tableau IV.2 :	Indice de gravité G.....	65
Tableau IV.3 :	Indice de la criticité.....	65
Tableau IV.4 :	Indice de non-détection D.....	66
Tableau IV.5 :	Exemple d'un tableau de type AMDEC.....	67
Tableau IV.6	Tableaux AMDEC De la pompe.....	70

Table des matières

<i>N°</i>	<i>Article</i>	<i>page</i>
	<i>Remerciements</i>	I
	<i>Liste des figures</i>	II
	<i>Liste des tableaux</i>	III
	<i>Résumer</i>	IV
	<i>Introduction générale</i>	V
	<i>CHAPITER I : La Maintenance industrielle</i>	
<i>I.1</i>	Introduction.....	01
<i>I.2</i>	La maintenance.....	01
<i>I.2.1</i>	Définition de la maintenance.....	01
<i>I.2.2</i>	But de la maintenance.....	02
<i>I.2.3</i>	Les différents types de maintenances.....	02
<i>I.2.3.a)</i>	La maintenance corrective.....	02
<i>I.2.3.b)</i>	La maintenance préventive.....	03
<i>I.2.4</i>	Les formes de la maintenance.....	04
<i>I.3</i>	Les objectifs de la maintenance.....	05
<i>I.3.1</i>	Contribuer à assurer la production prévue.....	05
<i>I.3.2</i>	Contribuer à maintenir la qualité du produit fabriqué.....	05
<i>I.3.3</i>	Contribuer au respect des délais.....	06
<i>I.3.4</i>	Rechercher des coûts optimaux.....	06
<i>I.3.5</i>	Respecter les objectifs humains : formation, conditions de travail et de sécurité.....	06
<i>I.3.6</i>	Préserver l'environnement et économiser l'énergie.....	06
<i>I.4</i>	Rôle de la maintenance.....	06
<i>I.4.1</i>	Court terme.....	07
<i>I.4.2</i>	Moyen terme.....	07
<i>I.4.3</i>	Long terme.....	07

I.5	Les niveaux de la maintenance.....	07
I.6	La maintenance permet d'améliorer la sécurité.....	09
I.6.1	Quel est le lien entre maintenance et sécurité ?	09
I.6.1.1	Respect les normes de sécurité.....	10
I.6.1.2	Mise en place d'un planning de maintenance.....	10
I.6.1.3	Bonnes pratiques de base	10
I.7	Conclusion.....	11
 CHAPITER II : Généralités sur les vibrations		
II.1	Introduction.....	12
II.2	Définition d'une vibration.....	12
II.3	Approche intuitive.....	13
II.3.1	Perception subjective des phénomènes.....	13
II.3.2	Le bruit.....	13
II.3.3	Origine du bruit rayonné par une machine.....	13
II.4	Caractéristiques d'une Vibration.....	14
II.4.1	L'Amplitude.....	14
II.4.2	La fréquence	14
II.5	Analyse de tendance.....	15
II.6	Les normes en valeur RMS.....	16
II.7	Principales causes de vibrations des machines.....	16
II.7.1	Le balourd.....	17
II.7.2	Le désalignement.....	17
II.7.3	Les défauts de roulements.....	18
II.7.4	Les causes des défauts de roulements.....	20
II.7.5	Les défauts d'engrenages.....	22
II.8	Techniques d'analyse.....	23
II.9	L'analyse vibratoire.....	24
II.10	Domaines d'application.....	25
II.11	Objectifs d'analyse vibratoire.....	26
II.12	Les capteurs de vibration.....	27
II.12.1	Types et caractéristiques des capteurs.....	27

<i>II.12.2</i>	Les accéléromètres.....	27
<i>II.12.2.1</i>	Principe.....	27
<i>II.12.2.2</i>	Réponse d'un accéléromètre.....	28
II.13	Les avantages est les inconvénients.....	29
<i>II.13.1</i>	Les avantages.....	29
<i>II.13.2</i>	Les inconvénients.....	29
II.14	Les effets des vibrations sur la machine « les défauts de roulements »	30
<i>II.14.1</i>	Généralité sur les roulements.....	30
<i>II.14.2</i>	Géométrie de roulement.....	30
<i>II.14.3</i>	Types majeurs de roulements et leurs utilisations.....	30
<i>II.14.4</i>	Les défauts de roulements.....	31
<i>II.14.4.a)</i>	Usure.....	32
<i>II.14.4.b)</i>	Dentelure.....	33
<i>II.14.4.c)</i>	Rupture de la cage.....	33
<i>II.14.4. d)</i>	Bavure.....	34
<i>II.14.4. e)</i>	Ecaillage.....	34
<i>II.14.4. f)</i>	Corrosion.....	35
<i>II.14.4. g)</i>	Coup, fissures, Cassures.....	35
<i>II.14.4. h)</i>	Choc électrique.....	36
<i>II.14.4.i)</i>	Jeux de paliers.....	36
II.15	Conclusion.....	37
 Chapitre III : Application		
III.1	Introduction	38
III.2	Description de l'appareil PT 500.04.....	38
III.3	Chaine de mesure.....	40
<i>III.3.1</i>	Analyseur de vibration PT500.04	40
<i>III.3.1.1</i>	Amplificateur de mesure.....	41
<i>III.3.1.2</i>	Appareil de mesure USB.....	41
<i>III.3.1.3</i>	Capteurs et transmetteurs.....	42
III.4	Structure de l'appareil.....	43
III.5	Les essais sur l'appareil PT 500.04.....	44

<i>III.5.1</i>	Description de l'expérience	44
<i>III.5.2</i>	Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier	44
<i>III.5.3</i>	Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements	46
<i>III.5.3.1</i>	Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain.....	46
<i>III.5.3.2</i>	Signatures spectrales de défaut de la bague externe.....	47
III.6	Conclusion.....	48
Chapitre IV : EVALUATION DES RISQUES		
<i>IV.1</i>	Introduction.....	51
<i>IV.2</i>	La sécurité dans l'industrie.....	51
<i>IV.3</i>	Termes et définition.....	52
<i>IV.3.1</i>	Définition d'un risque industriel.....	52
<i>IV.3.2</i>	Notion de danger.....	52
IV.4	Les différents types de risques.....	53
<i>IV.4.a)</i>	Risques mécaniques.....	53
<i>IV.4.b)</i>	Les risques dus aux vibrations.....	54
<i>IV.4.c)</i>	Le risque de surdité.....	54
<i>IV.4.d)</i>	Le risque électrique.....	54
<i>IV.4.e)</i>	Les risques dus aux rayonnements non ionisants.....	54
<i>IV.4.f)</i>	Risque chimiques.....	55
<i>IV.4.g)</i>	Risque biologiques.....	55
<i>IV.4.h)</i>	Le risque thermique.....	55
IV.5	Analyse des risques.....	56
<i>IV.5.1</i>	Les étapes de la gestion des risques.....	57
<i>Etape 1:</i>	Identification des risques.....	57
<i>Etape 2:</i>	�valuation des risques.....	57
<i>Etape 3:</i>	Définition des solutions.....	57
<i>Etape 4 :</i>	Mise en œuvre des solutions.....	57
<i>Etape 5 :</i>	Le contrôle.....	57

IV.6	Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques.....	58
<i>IV.6.1</i>	Méthodes d'analyse qualitative.....	58
<i>IV.6.2</i>	Méthodes d'analyses quantitatives.....	59
IV.7	Les méthodes d'analyse des risques.....	59
<i>IV.7.1</i>	L'analyse préliminaire des risques (APR).....	59
<i>IV.7.2</i>	HAZOP.....	60
<i>IV.7.3</i>	La méthode Nœud Papillon.....	60
<i>IV.7.4</i>	La méthode what-if.....	61
<i>IV.7.5</i>	MOSAR.....	62
<i>IV.7.6</i>	AMDEC.....	62
IV.8	L'analyse des défaillances.....	63
<i>IV.8.1</i>	La cause.....	63
<i>IV.8.2</i>	Le mode de défaillance.....	63
<i>IV.8.3</i>	L'effet.....	63
IV.9	Evaluation.....	64
<i>IV.9.1</i>	La gravité.....	64
<i>IV.9.2</i>	La fréquence.....	64
<i>IV.9.3</i>	La non-détection.....	64
<i>IV.9.4</i>	La criticité.....	64
IV.10	Démarche de l'AMDEC.....	66
<i>IV.10.1</i>	ETAPE 1 : initialisation de l'étude.....	66
<i>IV.10.2</i>	ETAPE 2 : Décomposition Fonctionnelle De La Machine.....	66
<i>IV.10.3</i>	ETAPE 3: Analyse AMDEC Du Système.....	66
<i>IV.10.4</i>	ETAPE 4 : Synthèse De L 'Etude.....	67
IV.11	Etude Du Système Moto -Pompe.....	67
<i>IV.11.1</i>	Description.....	67
<i>IV.11.2</i>	Rôle De La Pompe E-GA.301.....	68
<i>IV.11.3</i>	Principe De Fonctionnement.....	68

IV.12	L'analyse Par L'Outil « AMDEC ».....	68
IV.12.1	Application de L'AMDEC.....	68
IV.12.1.1	Analyse du système.....	69
IV.12.1.2	Décomposition du système.....	69
IV.13	Conclusion.....	72
Conclusion générale		VI

Résumé :

Ces dernières années, la surveillance et le diagnostic des machines tournantes sont devenus un outil efficace permettant de détecter précocement les défauts et de suivre leur évolution dans le temps. Parce que les erreurs sont imprévisibles et incontrôlables,

la sécurité de l'installation devient progressivement un enjeu majeur pour les entreprises et les industries. Afin d'éviter ces défaillances et d'assurer la continuité et la sécurité du personnel, des équipements et de la production, la sécurité des matériaux a émergé pour couvrir la plus grande conformité réglementaire et est liée à des normes pour réduire les erreurs et fonctionner de manière appropriée. " De plus, l'utilisation de méthodes d'analyse des vibrations est l'une des méthodes d'essai les plus importantes pour comprendre l'état de la machine. Le niveau et le comportement du signal de vibration dépendent des conditions internes de la machine électrique tournante. Analysez en comparant avec la valeur de référence.

Enfin, notre travail se termine par une évaluation des risques, ou nous avons fait appel à la méthode AMDEC, en présentant un cas de l'industrie.

Abstract :

In recent years, the monitoring and diagnosis of rotating machines have become an effective tool for detecting faults early and monitoring their development over time. Because mistakes are unpredictable and uncontrollable,

The safety of the installation is gradually becoming a major issue for companies and industries. In order to avoid these failures and to ensure the continuity and safety of personnel, equipment and production, material safety has emerged to cover the highest regulatory compliance and is linked to standards to reduce errors and operate. appropriately. "In addition, the use of vibration analysis methods is one of the most important test methods to understand the condition of the machine. The level and behavior of the vibration signal depends on the internal conditions of the machine. rotating electric machine Analyze by comparing with the reference value.

Finally, our work ends with a risk assessment, or we have used the AMDEC method, presenting a case of industry.

ملخص :

في السنوات الأخيرة، أصبحت مراقبة وتشخيص الآلات الدوارة أداة فعالة للكشف المبكر عن الأخطاء ومراقبة تطورها بمرور الوقت.

أصبح أمن المنشآت تدريجياً المشكلة الرئيسية للشركات والصناعات، لأن الأخطاء غير متوقعة ولا يمكن السيطرة عليها.

من أجل تجنب هذه العيوب ولضمان سلامة الناس والمنشآت واستمرارية الإنتاج، يظهر الأمن المادي من أجل تغطية معظم الامتثال، المتعلقة بالمعايير للحد من الأخطاء ومعالجة العمليات بطريقة مناسبة وذلك باستخدام طريقة تحليل الاهتزاز التي تعد من أهم وسائل الاختبار لفهم حالة الآلة.

يعتمد مستوى وسلوك إشارة الاهتزاز على الظروف الداخلية للآلة الدوارة. يتم التحليل عن طريق المقارنة مع قيمة مرجعية.

أخيراً، ينتهي عملنا بتقييم للمخاطر، حيث استخدمنا طريقة AMDEC، لتقديم حالة الصناعة.

Introduction générale :

Aujourd'hui, les machines électriques tournantes et particulièrement les moteurs asynchrones représentent les piliers d'une installation industrielle moderne. Elles assurent les fonctions importantes dans une chaîne de production où elles sont considérées dans de nombreuses applications industrielles comme étant équipements critiques tels que dans le cas des complexes sidérurgiques, pétrolières, ...etc. Cependant, elles sont affectées par beaucoup de défauts tels que les défauts de roulements qui représentent entre 40 à 50% des défauts.

Les machines tournantes sont composées essentiellement de plusieurs composants rotatifs tels que : le ventilateur, l'induit et les roulements. Les roulements sont essentiellement utilisés pour assurer l'alignement des arbres et pour faciliter leur rotation.

Du point de vue mécanique et dynamique les roulements sont des éléments de comportement dynamique stochastique, ce comportement est dû à leur architecture complexe. Cela les transforme en sources majeures de défauts.

D'autre part, plusieurs travaux de recherche ont montrés que la plupart des défauts de la machine électrique sont liés aux défauts de roulements où les conséquences d'un défaut de roulements sont incontournables, elles peuvent engendrer la fermeture d'une chaîne de production ou de menacer la sécurité du service. Pour ces raisons notamment, le diagnostic ainsi que le pronostic des défauts de roulements sont devenus des axes de recherche fondamentaux, dont l'objectif est la détection précoce des défauts de roulements et l'estimation du temps de vie restant avant défaillance pour éviter les substitutions inutiles des pièces et augmenter le taux de disponibilité et de fiabilité des machines. La majorité des systèmes de diagnostic et de pronostic modernes sont constitués autour de l'idée de la surveillance en temps réel des équipements. Ces techniques se basent essentiellement sur la collecte des informations sur le comportement dynamique du système.

Récemment, plusieurs techniques de diagnostic des machines électriques sont développées autour de la mesure du bruit sonore, des vibrations, de courant et de la température. Il existe quelques approches qui représentent des grandes insuffisances face aux problèmes de détection des défauts naissant où les amplitudes caractéristiques de défaut sont cachées par

des hauts niveaux de bruits et de l'effet de voisinage. En outre, d'autres approches exigent l'exploitation des équipements coûteux tels que les caméras infrarouges...etc.

L'analyse du signal de vibration est l'une des plus importantes méthodes utilisées pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, car le signal vibratoire porte des informations dynamiques sur les systèmes. Les vibrations causées par les roulements défectueux représentent la grande majorité des problèmes des machines. Chaque élément tel que la bague intérieure ou la bague extérieure a une fréquence de rotation caractéristique. Avec un défaut sur un élément particulier, une augmentation du niveau de vibration à cette fréquence peut se produire. La surveillance de ces éléments a une priorité importante pour le bon fonctionnement de la machine.

L'analyse des signaux de vibration dépend de l'efficacité de la technique de traitement. Plusieurs techniques ont été utilisées telles que: l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle.

Pour l'analyse temporelle, on trouve plusieurs techniques à savoir: facteur de crête, valeur efficace, kurtosis, et analyse d'enveloppe. Dans l'analyse fréquentiel, les techniques utilisées sont basées sur l'analyse spectrale.

L'analyse vibratoire est l'un des plus importants moyens de tests pour comprendre l'état de la machine. Le niveau et le comportement du signal vibratoire dépend des conditions internes de la machine tournante. L'analyse se fait par la comparaison avec une valeur de référence.

Le diagnostic des défauts est le contrôle du système qui supervise le comportement de tout le système et fournit suffisamment d'informations sur les organes qui ne fonctionnent pas normalement. Le diagnostic des défauts est composé de trois tâches :

- La détection de défaut: pour indiquer si le défaut existe ou non dans le système.
- L'isolation du défaut : pour déterminer la localité et le type de défaut.
- L'identification du défaut : pour estimer sa taille et sa nature de défaut.

La détection de défaut et son isolation sont les étapes les plus importantes du diagnostic de défaut. En général, le diagnostic de défaut peut être considéré comme détection rapide des défauts.

Chapitre I :

La Maintenance

Industrielle

Chapitre I : La Maintenance industrielle

I.1 Introduction :

A partir du moment de sa mise en route, la machine peut être prédisposée à l'usure, bien sûr, cette usure sera plus ou moins rapide en fonction de plusieurs paramètres, tels que la qualité des éléments la constituant, sa conception, son utilisation et entretien.

Aujourd'hui, la gestion de la maintenance est considérablement développée. Les énormes sommes engagées dans la maintenance des installations ont imposé de nouvelles approches.

Il a été aussi démontré que la durée de vie des équipements et leur taux de disponibilité dépendent essentiellement des programmes de maintenances appliqués.

De nombreux accidents se produisent lors des activités de maintenance des équipements de travail. La maintenabilité n'est pas suffisamment prise en compte lors de la conception des machines. Elle contribue pourtant à améliorer la santé et la sécurité des opérateurs de maintenance, tout en optimisant la disponibilité de l'équipement lors de son exploitation.

Les activités de maintenance sont connues pour leur grande variabilité : variabilité des intervenants, variabilité des environnements mais aussi variabilité de l'objet à maintenir : machines spéciales ou standards, fixes ou mobiles, isolées ou faisant partie d'un ensemble, machines installées en couvert, en fosse, en aérien, etc. [19]

I.2 La maintenance :

I.2.1 Définition de la maintenance :

La maintenance industrielle se définit comme suit selon la norme Afnor NF-X 60 000 : L'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Les activités de maintenance sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.

Cette définition fait apparaître d'autres notions, définies également par la réglementation Afnor :

Maintenir : on entend par là prévenir les dysfonctionnements d'une machine ;

Rétablir : corriger suite au dysfonctionnement d'une machine ;

Un état spécifié : ce qui se définit grâce à des caractéristiques et des objectifs quantifiables ;

Dans l'entreprise, la fonction de la maintenance industrielle s'articule autour de différentes actions :

- le dépannage ;
- la réparation ;
- la vérification ;
- le contrôle ;
- le déclassement ;
- la gestion. [1]

I.2.2 But de la maintenance :

La maintenance à pour but :

- Le maintien du capital machine ;
- Minimiser les arrêts et les chutes de production ;
- Améliorer la sécurité de personnel et la protection de l'environnement . [7]

I.2.3 Les différents types de maintenances :

I.2.3.a) La maintenance corrective :

D'après la norme AFNOR X60-010, la maintenance corrective se définit comme "une maintenance effectuée après défaillance". Dans cette approche, les machines fonctionnent sans dépenses particulières pour l'entretien ni la surveillance, jusqu'à l'incident. Dans la maintenance corrective, tout incident sur la machine a une influence sur l'exploitation, et

puisque les arrêts sont aléatoires, la planification dans la production est difficile. Il est donc nécessaire d'effectuer une réparation le plus tôt possible.

La maintenance curative :

Cette forme de maintenance est appliquée lorsqu'un dysfonctionnement est détecté. Elle a pour objet de réparer cette anomalie. Contrairement au palliatif qui agit dans l'urgence, il s'agit là d'une véritable restauration à long terme, de manière définitive. La maintenance curative est un dépannage prioritaire car les arrêts de production provoquent des pertes lourdes pour les entreprises.

Cette intervention apporte une amélioration des performances et des conditions de production. Elle permet la réparation du matériel endommagé sur site ou en atelier ou l'installation d'un parc de machines neuves. Cette maintenance corrective intervient aussi dans la mise en conformité de l'outil de production après le passage d'un organisme de contrôle qui veille au respect de la législation en vigueur.[4]

La maintenance palliative :

Elle a pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié : cela ne signifie pas nécessairement son état initial. Par exemple, si une fuite dans une tuyauterie industrielle ou une cuve de stockage survient, l'opération de maintenance palliative devra faire en sorte que ces outils retrouvent leur fonction requise, sans pour autant qu'ils retrouvent leur aspect d'origine. Il s'agit d'une action destinée à permettre à un bien de fonctionner provisoirement.

La maintenance palliative n'est pas une action prévue et ne fait donc pas partie d'une politique de maintenance. Ces actions de dépannage provisoire sont à distinguer de la réparation qui caractérise la maintenance curative. La maintenance palliative peut être dangereuse. Le technicien doit donc, en accord avec la direction de la société, faire la balance entre le danger que pourrait représenter l'arrêt de la production et celui inhérent à toute maintenance palliative.

I.2.3.b) La maintenance préventive :

La maintenance préventive est de la maintenance faite en amont de la défaillance. Elle permet de vérifier que les machines n'ont pas de risque de défaillance. Elle concerne les composants,

les pièces détachées, les équipements et les machines. Cette maintenance est souvent basée sur les dispositions réglementaires, la préconisation des constructeurs et le « user expérience ». [2]

La maintenance préventive systématique :

La maintenance préventive systématique était et demeure une étape essentielle dans la gestion des actifs industriels. Étudiants, professionnels de maintenance débutants ou confirmés, tous les professionnels de l'industrie devraient se familiariser avec le concept de maintenance préventive et de ses bénéfices liés à la gestion des actifs de l'entreprise. [3]

La maintenance préventive conditionnelle :

Est « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information donné par un capteur, mesure d'une usure, ...etc.) révélateur de l'état de dégradation d'un bien » AFNOR X60010.

Ce type de maintenance permet d'assurer le suivi du matériel pendant son fonctionnement dans le but de prévenir les défaillances attendues. L'intervention n'a lieu que si certains paramètres mesurables atteignent un seuil fixé au préalable et qui est révélateur l'approche certaine de la défaillance. [3]

I.2.4 Les formes de la maintenance :

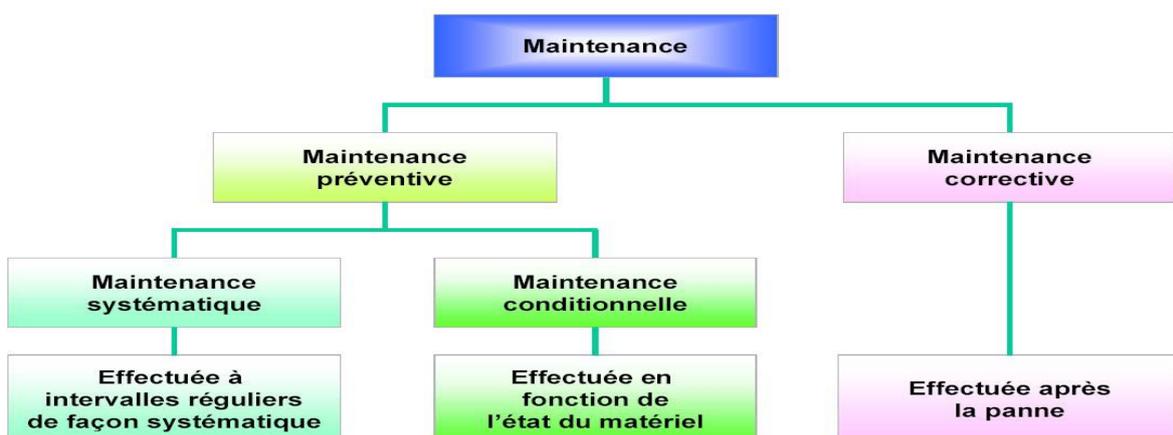


Figure I.1 : les différents types de maintenance. [3]

I.3 Les objectifs de la maintenance :

Les objectifs d'une maintenance préventive sont multiples. En plus d'assurer la sécurité des utilisateurs en évitant les imprévus dangereux et en tenant compte des critères de sécurité, ce type de maintenance permet d'améliorer les conditions de travail sur le matériel concerné.

Par ailleurs, ce processus réduit les risques de temps d'arrêt suite à une panne et les arrêts pour maintenance. En effet les interventions de maintenance préventive sont planifiées sur un calendrier afin d'arrêter l'appareil concerné un minimum de temps et si possible sur une plage horaire où il est peu ou pas utilisé. Ainsi, l'entreprise ne perd pas en production, l'utilisateur ne s'en trouve pas gêné dans son travail et le travail de la maintenance s'en retrouve facilité.[5]

I.3.1 Contribuer à assurer la production prévue :

Les programmes et les quantités à fabriquer doivent être étudiés conjointement par la fabrication et la maintenance, en tenant compte des arrêts planifiés pour les interventions de maintenance.

Pendant les périodes de marche, la disponibilité des outils de production doit être maximale en minimisant les arrêts imprévus. [6]

I.3.2 Contribuer à maintenir la qualité du produit fabriqué :

La qualité relève, à la fois, de la responsabilité de la production et de la maintenance. Par exemple, une erreur de conduite ou un mauvais entretien d'une machine peut conduire à une altération de la qualité du produit fabriqué. Il est donc indispensable de préciser les responsabilités de la production et de la maintenance.

En particulier, après une intervention de maintenance, la réception du matériel sera faite conjointement par les responsables de maintenance et de fabrication (réglage de démarrage, mise au point du matériel, etc.). [6]

I.3.3 Contribuer au respect des délais :

Il s'agit à la fois des délais de fabrication des produits et des délais des interventions de maintenance. Il incombe à la maintenance qu'ils soient respectés. Pour atteindre cet objectif, il faut que la maintenance estime correctement la disponibilité opérationnelle du matériel. [6]

I.3.4 Rechercher des coûts optimaux :

En plus des trois objectifs précédents, la maintenance doit assurer la disponibilité des équipements de production à des coûts optimaux, d'où intervention de la notion de rentabilité . Cet objectif ne peut être atteint qu'en planifiant correctement les interventions de maintenance :

Préparation et ordonnancement des travaux, désignation du personnel qualifié pour ces travaux, préparation des outillages et des pièces de rechange, etc. [6]

I.3.5 Respecter les objectifs humains : formation, conditions de travail et de sécurité :

La formation du personnel dans les spécialités spécifiques de la maintenance, l'amélioration des conditions de travail du personnel et le respect des consignes de sécurité doivent être parmi les priorités de la maintenance. [6]

I.3.6 Préserver l'environnement et économiser l'énergie :

La maintenance doit lutter contre les pollutions et nuisances, et entreprendre des actions pour réduire la consommation d'énergie. [6]

I.4 Rôle de la maintenance :

La maintenance doit assurer la rentabilité des investissements matériels de l'entreprise, en maintenant le potentiel d'activités en tenant compte de la politique de maintenance définis par l'entreprise. [8]

I.4.1 Court terme :

Objectifs essentiels :

- Réduire les durées d'immobilisations ;
- Réduire les coûts des interventions.

I.4.2 Moyen terme :

Elaboration d'un plan de prévisions des interventions à l'immobilisation des équipements.

I.4.3 Long terme :

Réalisation d'opérations directement liées à la politique générale de l'entreprise et fin de minimiser l'ordonnancement :

- Des charges ;
- Des stocks ;
- Des investissements.

I.5 Les niveaux de la maintenance :

Dans l'application de la maintenance, les différents cas à intervenir sont repartis selon leurs importances en cinq niveaux.

Un niveau de la maintenance se définit par rapport :

- A la nature de l'intervention,
- A la qualification de l'intervenant,
- Aux moyens mis en œuvre. [9]

Selon « AFNOR X60-010 » donne, à titre indicatif, 5 niveaux de maintenance, en précisant la responsabilité, la production ou la maintenance :

- 1er Niveau :

Réglage simple, prévus par le constructeur aux organes accessibles sans aucun

Démontage ou ouverture de l'équipement, ou échange d'éléments consommables en toute sécurité.

Exemples :

- Echanges en toutes écrite d'élément consommables tels que : fusibles, voyants...

- Dégradation d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, Sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation. [9]

- **2ème Niveau :**

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet, et opérations minutieuses De maintenance préventive, tel que graissage ou contrôle de bon fonctionnement.

Exemples :

- Graissages d'une machine;
- Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitement thermique;
- Remplacement d'une électrovanne sur un système desserrage de pièce.

Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien de qualification moyenne, sur place avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance. [9]

- **3ème Niveau :**

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineure set toutes opérations courantes de maintenance préventive telle que réglage général ou réalignent des appareils de mesure...etc.

Exemples :

- Remplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une sur tension;
- Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine. [9]

- **4ème Niveau :**

Tous les travaux importants de maintenance convective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la construction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de

mesure utilisés pour la maintenance et éventuellement la vérification des étalons de travail par les organismes spécialisés.

Exemples:

- Révision générale d'un compresseur;
- Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage;

- 5ème Niveau :

Rénovation, reconstruction, et modernisation ; par définition, ces travaux sont donc effectués par le constructeur ou par le reconstruteur.

Exemples :

- Révision générale de la chaufferie d'une usine;
- Rénovations d'une ligne de conditionnement. [9]

I.6 La maintenance permet d'améliorer la sécurité :

I.6.1 Quel est le lien entre maintenance et sécurité ?

La maintenance est un facteur significatif pour la sécurité. Il semble évident que la mise en service d'un équipement non conforme aux règles et normes de sécurité représente un risque réel pour les opérateurs de l'équipement. Cependant, le vieillissement de la machine est un processus inéluctable, entraînant systématiquement la dégradation de ses caractéristiques. Ce phénomène peut être lié au fonctionnement même de l'équipement, ou simplement au passage du temps. Ainsi, les normes de sécurité d'un équipement initialement non défectueux sont remises en question.

La maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié, et cela concerne également la sécurité nécessaire au bon fonctionnement de la machine. La maintenance ne sert donc pas uniquement à assurer le bon fonctionnement du bien, mais également à garantir la sécurité des intervenants.[19]

- Il existe plusieurs solutions de procéder à cette amélioration :

I.6.1.1 Respect les normes de sécurité :

Les normes de sécurité sont parfois difficiles à respecter, du fait de la nature aléatoire et urgente des pannes ou autres événements nécessitant une intervention : c'est la raison pour laquelle il est désormais obligatoire d'intégrer la planification des risques dès la conception des machines et des bâtiments, à travers un plan de prévention. [19]

I.6.1.2 Mise en place d'un planning de maintenance :

Ceux-ci doivent être mis en place dès la création du planning de maintenance dans le cas d'opérations longues (plus de 400 heures sur une période de 12 mois) ou difficiles, voire en amont (opérations dangereuses). Il s'agit ainsi de prévoir tous les risques et potentiels accidents, en dressant une liste des précautions et recommandations à destination des opérateurs afin de leur permettre de travailler dans l'environnement le plus sécurisé possible ; il convient également de prévoir la signalisation nécessaire à destination des acteurs extérieurs. La création de plans de maintenance permet d'obtenir une routine qui offre aux techniciens un cadre et une possibilité d'intervenir sur un terrain connu, ce qui minimise donc les incertitudes et les risques. [19]

I.6.1.3 Bonnes pratiques de base :

Enfin, quelques bonnes pratiques sont essentielles pour assurer la sécurité des techniciens ; il est nécessaire dans un premier temps de permettre aux opérateurs de travailler dans un environnement aussi serein que possible, sans pression inacceptable. L'on peut également citer divers dispositifs de prévention : mise en place de formations de prévention des risques, de dispositifs d'aide à la manutention pour éviter les blessures, d'équiper l'usine avec le matériel adéquat (éclairage, revêtements), et les bons gestes à réaliser avant de procéder à l'opération. [19]

I.7 Conclusion :

La maintenance en tant que technologie mal menée gagne de jour en jour ses titres de noblesse et devient une fonction clef de l'entreprise. Par son effet, elle agit comme facteur de productivité, élément de sécurité, argument de promotion et réputation de la classe de l'entreprise. Dans ce chapitre, nous avons exposé une vue générale sur les différents types de maintenance industrielle ainsi leur choix qui devenue avec le temps de plus en plus importante. Pour être efficace, il faut d'abord avoir une idée aussi claire que possible des mécanismes qui influent sur les grandeurs significatives (nombre de pannes, temps de réparation, délais logistiques, coûts de maintenance préventive, coûts du stockage des matières, actions de communication, etc.). Il faut ensuite mesurer ces grandeurs et construire des indicateurs pour juger de l'état du système.

Chapitre II :
Généralités sur
les vibrations

Chapitre II : Généralités sur les vibrations

II.1 Introduction :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement, ainsi une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations, en observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puis qu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmes de production.

Dans ce chapitre on présente une étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement.

II.2 Définition d'une vibration :

- Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne. La vibration d'un système peut être libre ou forcée. [20]
- La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont :

« NF E 90-001 ; NF E 90 002 ». [21]

II.3 Approche intuitive :

II 3.1 Perception subjective des phénomènes :

A proximité d'une machine :

- On peut entendre le bruit et sentir les vibrations de la machine.
- Ces deux indicateurs peuvent fournir des indications sur un changement de comportement de la machine.
- La quantification et la qualification des vibrations sont des moyens privilégiés pour la maintenance conditionnelle. [20]

II.3.2 Le bruit :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources.

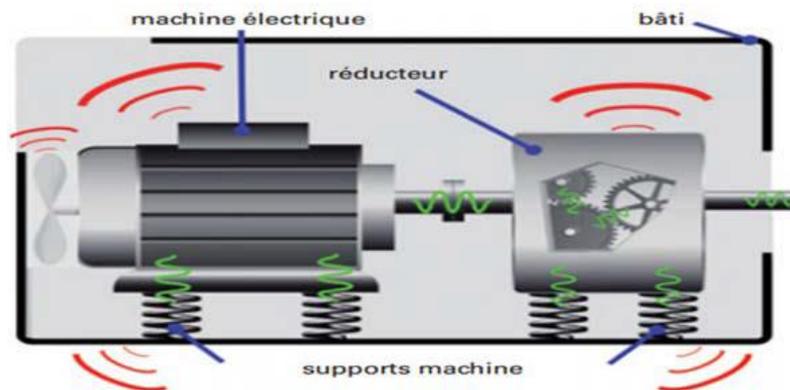


Figure II.1 : Origine du bruit . [20]

II.3.3 Origine du bruit rayonné par une machine :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources que l'on peut répartir en 2 groupes :

- Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont l'énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.
- Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnement en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique. [20]

II.4 Caractéristiques d'une Vibration :

II.4.1 L'Amplitude :

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal

vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs d'amplitude :

L'Amplitude crête (A_c) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

L'Amplitude crête à crête (A_{cc}) : Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée amplitude double. Il est noté que :

$$A_{cc} = 2A_c$$

L'Amplitude efficace (A_{eff}) ou RMS (Root Mean Square) : Elle indique l'énergie donnée par le mouvement vibratoire. [10]

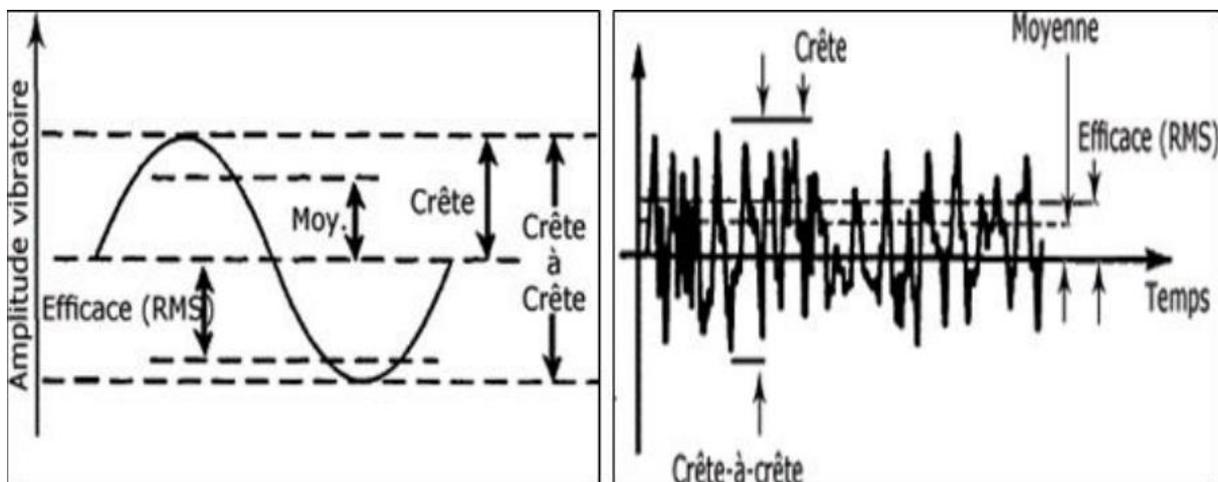


Figure II.2 . Caractéristiques d'une vibration Sinusoïdale ou quelconque. [10]

II.4.2 La fréquence :

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence

s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz.

La fréquence f est l'inverse de la période T qui est la durée d'un cycle. [10]

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{hz})$$

II.5 Analyse de tendance :

Les machines se détériorent rarement sans signes précurseurs ; les signes d'une détérioration imminente sont présents bien avant que la détérioration ne cause l'arrêt de la machine.

Une analyse de tendance consiste à tracer le niveau de vibration en fonction du temps afin de déterminer la date d'arrêt de la machine pour réparation. La figure suivante vous montre une courbe en forme de baignoire. Elle représente un tracé typique du suivi en fonction du temps des vibrations sur une machine industrielle. [16]

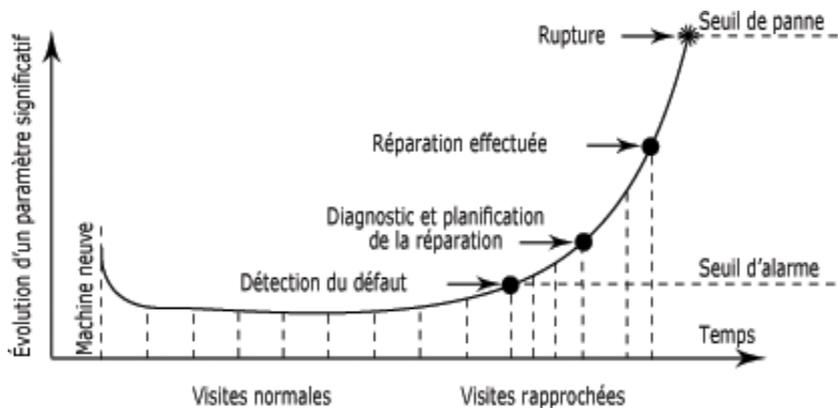


Figure II.3 : Courbe de Tendance. [16]

Si la mesure enregistrée est inférieure au niveau limite déterminé (seuil d'alarme), la fréquence des mesures, qu'elle soit hebdomadaire, mensuelle ou autre, demeure inchangée. Par contre, si la mesure enregistrée est supérieure au seuil d'alarme, la fréquence des mesures

doit augmenter dans le but de suivre plus précisément l'évolution de la vibration et la tendance générale de l'anomalie constatée.

De là, si la tendance persiste, la cause du défaut devra être trouvée et la réparation effectuée au moment jugé le plus opportun, c'est-à-dire selon l'urgence de la situation et les arrêts de production déjà planifiés. [16]

II.6 Les normes en valeur RMS :

L'amplitude efficace (**A_{eff}**) aussi appelée **RMS** (root mean square, en anglais) ;

Classes de vibration pour différentes tailles de machines tournantes valeur RMS de la vitesse .[17]

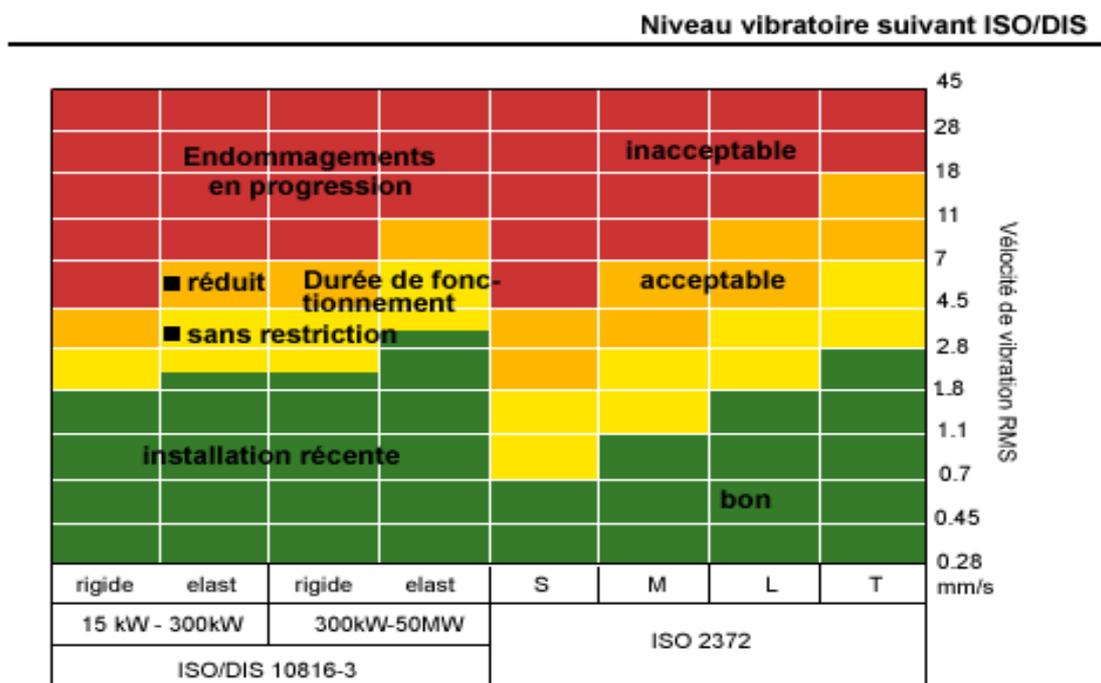


Figure II.4 : Niveau vibratoire. [17]

II.7 Principales causes de vibrations des machines :

Le déséquilibre de masse, le frottement du rotor, le désalignement de l'arbre, les défaillances des engrenages et les défauts de palier sont des exemples de défauts pouvant conduire à la panne de la machine.

Outre la détection de l'apparition précoce et la gravité d'un défaut, il existe des systèmes qui peuvent également être conçus pour identifier les composants qui se détériorent et estimer l'intervalle de temps pendant lequel l'équipement surveillé peut encore fonctionner avant la défaillance. Ces systèmes mesurent et interprètent en continu des signaux (par exemple, vibration, émission acoustique, thermographie infrarouge, etc.), qui fournissent des informations utiles pour identifier la présence de symptômes defectueux. [10]

II.7.1 Le balourd :

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Ces efforts se traduisent par des vibrations liées à la fréquence de rotation. Les vibrations induites par le déséquilibre sont la cause d'erreurs fondamentales dans des systèmes en mouvement et peuvent induire des surcharges considérables sur les outils de coupe lors d'opérations d'usinage.

Les déséquilibres proviennent en général de défauts d'usinage, d'assemblage des rotors ou de montage. En fonctionnement, les rotors peuvent aussi se déformer sous l'effet d'échauffements dissymétriques causant le balourd. Le balourd se manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pic qui a une fréquence égale à la fréquence de rotation F_0 .

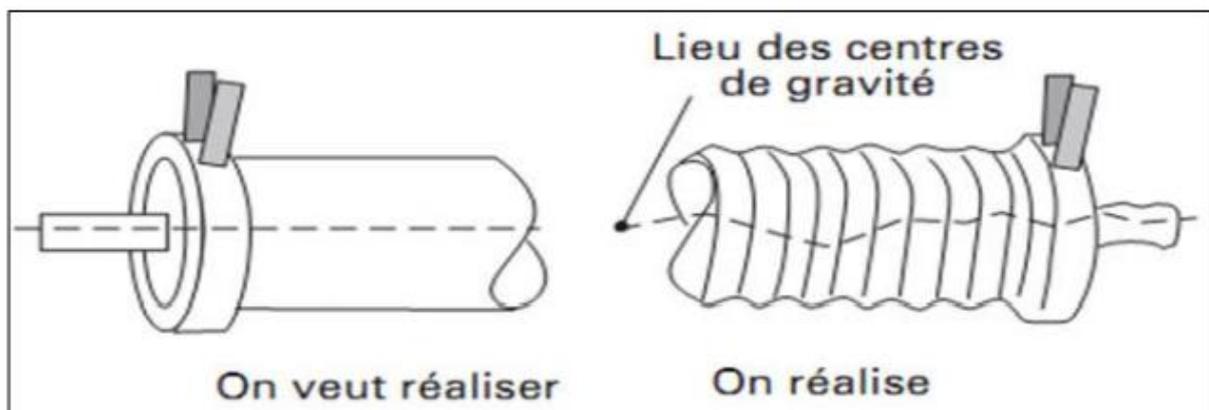


Figure II.5 : Défauts d'usinage causant le balourd. [10]

II.7.2 Le désalignement :

Un arbre est une partie essentielle de la machine tournante ; il est utilisé pour transmettre la puissance et le mouvement.

Le désalignement de l'arbre est un problème commun dans les machines tournantes qui cause plus de 70% des problèmes de vibration.

Il se produit lorsque les axes de rotation de deux (ou plus) arbres de machines ne sont pas alignés. Cela augmente les forces axiales et radiales sur les roulements, joints et accouplements, en induisant ainsi l'usure de ces composants et une flexion de l'arbre en réduisant la quantité de puissance transmise.

Même si initialement, ou après ajustement, l'arbre est aligné, pendant le fonctionnement, divers facteurs tels que la croissance thermique, la pression de la tuyauterie et les mouvements de fondation modifieront l'alignement.

Le désalignement se manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pique qui a une fréquence égale à 2 fois la fréquence de rotation ($2F_0$). [10]

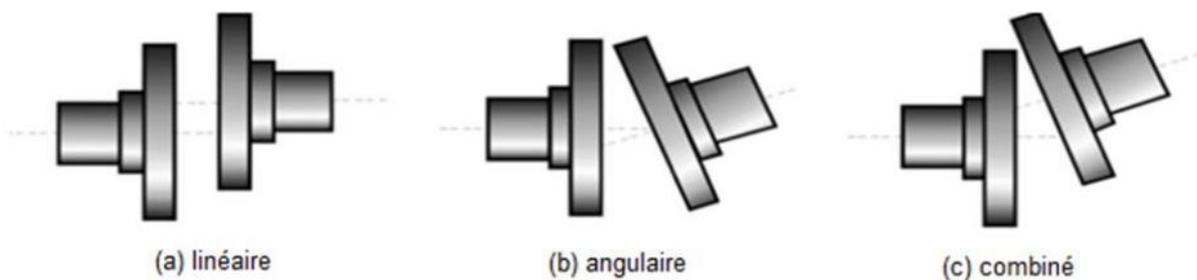


Figure II.6 : Les types de mauvais alignements. [10]

II.7.3 Les défauts de roulements :

Les paliers sont des composants critiques des machines tournantes et la surveillance de leur état est importante pour éviter les défaillances catastrophiques et réduire les temps d'arrêt des machines [16].

Douze avaries principales peuvent être retenues et proviennent de quatre familles de causes :

- Avaries liées à la charge et à la vitesse appliquée : écaillage, grippage, coloration et détérioration des cages.
- Avaries liées à la lubrification : grippage, rupture des bagues par contraintes thermiques, coloration, détérioration des cages et écaillage,

- Avaries liées au montage : empreintes des corps roulants par déformation plastique, traces de coups, certaines détériorations des cages, corrosion par contact, certains écaillages provenant des défauts d'alignement et de circularité.
- Avaries liées à l'environnement : usure, empreintes, corrosion, cratères, cannelures créées par le passage d'un courant électrique.



Figure II.7 : Défauts de roulements. [10]

Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage et puis à la ruine du roulement. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Celles-ci

correspondent aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut. Elles sont données en écrivant que les vitesses aux points de contact entre billes et bagues sont nulles. Elles dépendent du diamètre des éléments roulants (d), du diamètre moyen du roulement (D), du nombre d'éléments roulants (N), de l'angle de contact (φ) et de la fréquence de rotation (f_r). Elles sont données par les formules :

Tableau II .1. Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements. [10]

Défaut	Fréquence
Un défaut localisé sur la bague externe	$f_{be} = \frac{N}{2} f_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (3)
Un défaut localisé sur la bague interne	$f_{bi} = \frac{N}{2} f_r \left[1 + \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (4)
Un défaut localisé sur un élément roulant	$f_{er} = \frac{D}{d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \varphi \right)^2 \right]$ (5)
Un défaut localisé sur la cage	$f_c = \frac{1}{2} f_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \varphi \right]$ (6)

II.7.4 Les causes des défauts de roulements :

- **Défauts de construction :** les alliages constitutifs des éléments de roulements contiennent des imperfections et des défauts de structure dus aux différentes conditions environnementales (physiques et chimiques) de fabrication.
- **Défauts de montage :** le montage de roulement sur un arbre ou dans un palier doit être effectué avec grand soin, un désalignement avec l'élément affût peut entraîner l'endommagement d'un des éléments de roulement.
- **Circulation des courants électriques :** les roulements métalliques sont conducteurs

D'électricité par nature. À cause de phénomène de décharge diélectrique, des micros trous ou des stries perpendiculaires se produisent dans les points de décharge. [10]

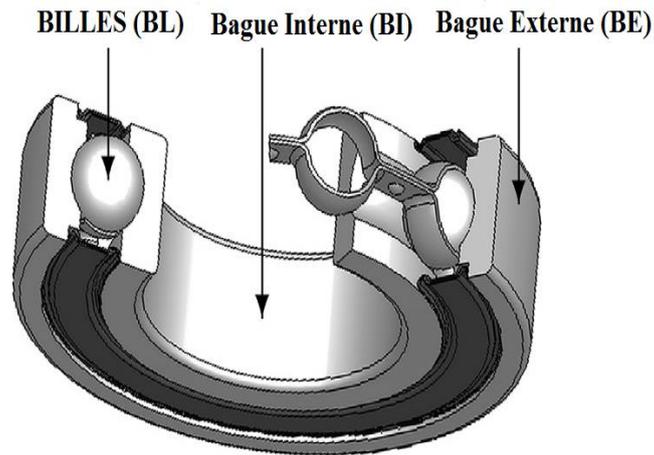


Figure II.8 : Vue en coupe d'un roulement. [10]

- **Corrosion** : les facteurs corrosifs comme les acides et la vapeur favorisent la dégradation des matériaux métalliques constituant, et engendrent des pertes de parties de métal qui se développent avec le temps. Contamination : pendant leur fonctionnement, les machines peuvent être exposées aux contraintes climatiques et environnementales comme : l'humidité, poussière, l'huile...etc. Ces contaminants peuvent entrer dans le roulement et dégradent également les surfaces de contact par abrasion ou indentation et entraînent l'écaillage ou la fissuration des éléments constituant de roulements. Ici, le facteur humain est une des raisons principales de contamination si le montage n'est pas fait avec soin. [10]
- **Défauts de lubrification** : l'huile de lubrification ou la graisse sont essentielles pour la protection des surfaces des éléments constitutifs d'un roulement. La dégradation des qualités lubrifiantes de la graisse (comme la viscosité) par contamination ou par élévation de la température de fonctionnement engendre un contact métal-métal qui favorise l'écaillage des pistes ou encore l'éclatement des billes. En outre, si la quantité de la graisse occupe tout le volume libre interne du roulement, les billes se bloquent, et se glissent sur les pistes de roulement, ceci favorise la dégradation rapide des pistes de roulements. [10]
- **Élévation de la température de fonctionnement** : l'augmentation de la température de fonctionnement pendant une longue durée du temps conduit à la dégradation des qualités lubrifiantes et de refroidissement de la graisse qui vont par la suite résulter la

dilatation des bagues et puis la déformation. De ce fait, l'homogénéité de l'épaisseur du film d'huile va se modifier, ce qui favorise la dégradation au niveau des points de contact. [10]

II.7.5 Les défauts d'engrenages :

Les engrenages sont des composants importants de presque toutes les machines utilisées dans l'environnement industriel. Par conséquent, la détection d'un défaut dans ces organes doit être détectée à l'avance pour éviter une défaillance catastrophique.



Figure II.9 : défauts d'engrenages. [10]

Le défaut d'engrenage se manifeste généralement dans les spectres vibratoires par un pique qui a une fréquence égale à :

$$f = z \cdot f_0$$

Après avoir décrit les principales manifestations vibratoires des défauts de fonctionnement des machines, cet article examine les stratégies de détection, de surveillance et la démarche de diagnostic s'appuyant sur l'analyse vibratoire et permettant de déduire une politique et des gestes de maintenance. [10]

II.8 Techniques d'analyse :

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance, il existe différentes techniques d'analyse (figure II.1) tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc...

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils.[12]

Pourcentage d'utilisation de différentes méthodes dans le monde

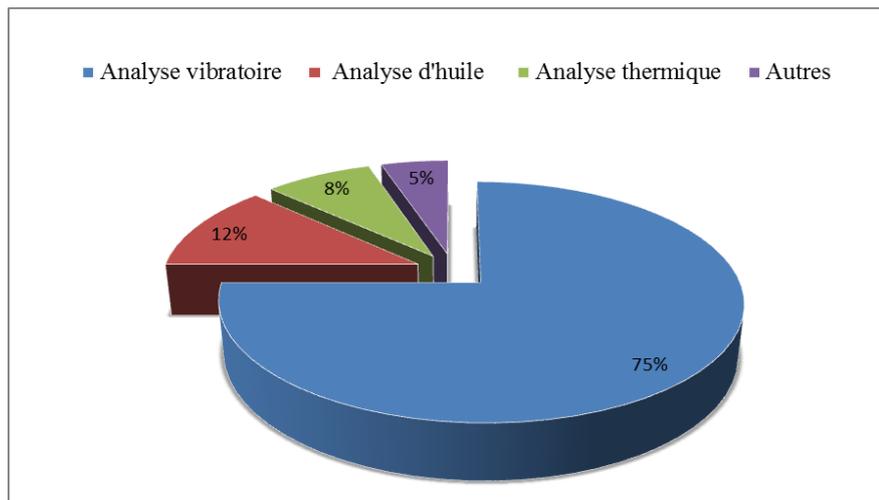


Figure II.10 : différentes méthode d'analyse .[12]

- **L'analyse vibratoire** : est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.
- **L'analyse d'huile** : est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, moteurs thermiques...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser (particules d'usure) pour déduire l'état de l'équipement.

- **La thermographie infrarouge** : suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance jusqu'alors réservée au contrôle d'installations électriques. Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

- **L'analyse acoustique** : permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.[13]

- **Le contrôle par ultrasons** : permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

Choix d'une technique d'analyse :

Chaque méthode a son champ d'application privilégié. Par exemple, l'analyse vibratoire convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquences déterminées (situées généralement entre quelques Hertz et plusieurs dizaines de KHz). Elle couvre aussi les défauts spécifiques aux roulements (à plus hautes fréquences). Au-delà de 20 KHz, il est souvent préférable d'utiliser un contrôle par ultrasons ou par émission acoustique. L'analyse acoustique se limite à la détection de bruits dans les fréquences audibles, mais lorsque la dégradation d'un roulement se manifeste en une fréquence audible, il est souvent trop tard pour intervenir. [14]

II.9 L'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire est la plus largement utilisée car elle est adaptée aux plusieurs composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc...) et de sa structure.

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. Une vibration est caractérisée principalement par sa fréquence, son amplitude et sa nature.[11]

II.10 Domaines d'application :

L'analyse vibratoire s'applique aux secteurs d'activité suivants :

- Les machines rotatives en générales afin de détecter les défauts suivants :

Balourd, Jeu, Roulement (piste interne, externe, cage ou éléments roulants), Délignage, Engrenages, Courroies, Graissage, Frottement, Résonance, Structure, Electrique, Cavitation.

- Turbomachines
- Eoliennes
- Ventilateurs
- Pompes
- Peinture industrielle
- Pharmaceutique
- Traitement des eaux
- Industrie papetière
- Cimenterie
- Ascenseurs, élévateurs, escaliers mécaniques, trottoirs roulants
- Analyse de structure
- Agro-alimentaire... [22]



Figure II.11 : domaines d'application de l'analyse vibratoire. [22]

L'analyse vibratoire a plusieurs avantages dans le domaine de maintenance elle nous aide à:

- Evaluation réelle de l'état de la machine
- Supprimer les arrêts des machines afin de réaliser des diagnostics.
- Améliorer la disponibilité et le rendement des machines par la surveillance.
- Réduire les coûts de la maintenance.
- Simplifier le planning de la maintenance en réduisant le temps et la durée des arrêts.
- Optimiser l'utilisation des machines en gérant la durée de vie des composants.
- Protéger les machines de casses de composants. [22]

Les inconvénients :

- L'interprétation des Spectres est parfois difficile.
- L'installation est relativement coûteuse spécialement dans le cas d'une surveillance continue. [22]

II.11 Objectifs d'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel,
- soit dans le domaine fréquentiel,
- soit dans les deux à la fois. [14]

Les avantages :

- détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- autorise une surveillance continue,
- permet de surveiller,
- l'équipement à distance. [14]

Les inconvénients :

- spectres parfois difficile interpréter,
- dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses. [14]

II.12 Les capteurs de vibration :

II.12.1 Types et caractéristiques des capteurs :

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- Sa **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple + 3 % ou + 3 dB de [3–8000] Hz).
- Sa **gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- Sa **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple 8 mV par μm). Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique. [14]

II.12.2 Les accéléromètres :

II.12.2.1 Principe :

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 3.8], est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique

proportionnelle à cette accélération. Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles ;
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB) ;
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse ;
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération. [14]

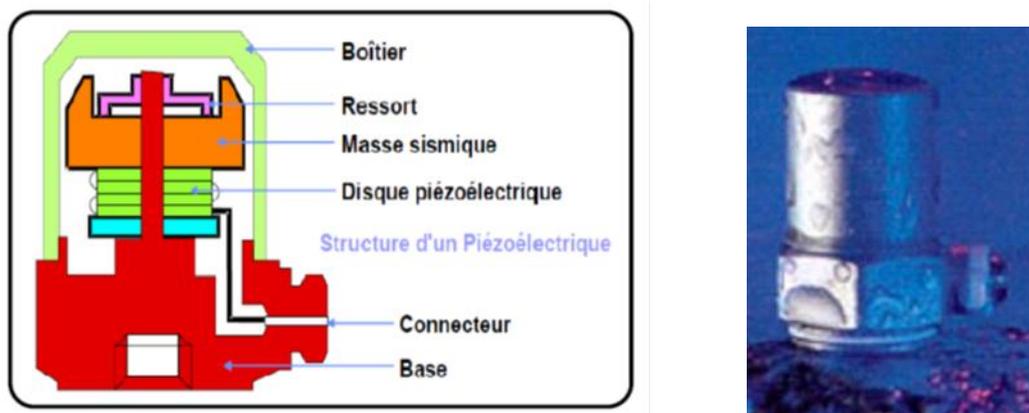


Figure. II.12 : schéma de principe d'un accéléromètre. [14]

II.12.2.2 Réponse d'un accéléromètre :

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la figure II.13 montre l'existence de deux zones :

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée avec une bonne sensibilité. Cette zone définit la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.
- Une zone englobant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est fautive. [14]

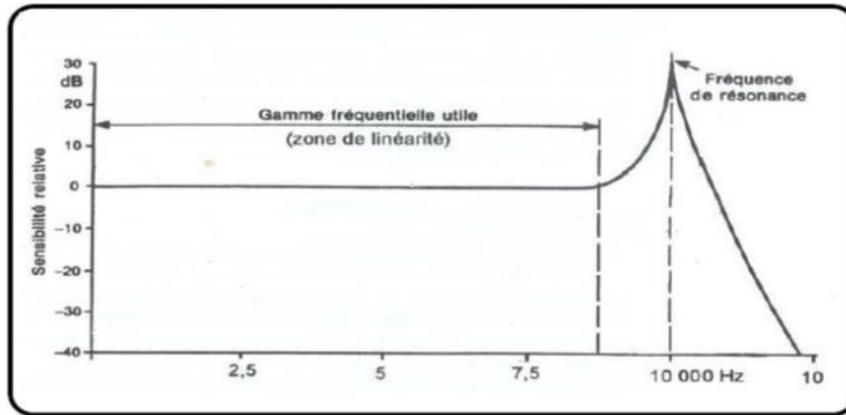


Figure II.13 : courbe de réponse d'un accéléromètre .[14]

II.13 Les avantages est les inconvénients :

II.13.1 Les avantages :

- ❖ Facile à installer
- ❖ Petit, léger
- ❖ Supporte les hautes températures
- ❖ Pas de pièce mobile [14]

II.13.2 Les inconvénients :

- ❖ Nécessite une double intégration pour le déplacement
- ❖ Nécessite une source extérieure
- ❖ Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre
- ❖ Médiocre pour les faibles vitesses. [14]

II.14 Les effets des vibrations sur la machine « les défauts de roulements » :

II.14.1 Généralité sur les roulements :

Le roulement est l'un des éléments essentiels dans presque toute machine tournante. Son intérêt réside dans le fait que cet élément est conçu pour réduire le frottement de rotation de l'arbre, pour transférer des charges sur des paliers fixes et pour supporter des charges radiales et axiales. Il peut être aussi utilisé pour assurer un positionnement précis de l'arbre, et corriger des défauts d'alignement. Pour cette raison, la plupart des machines tournantes sont équipées de roulements pour supporter la charge et maintenir les jeux entre les éléments fixes et rotatifs des machines.

Les roulements, dont on ne peut jamais négliger l'importance, sont d'après l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE) les éléments les plus susceptibles de tomber en panne dans une machine électrique. Leur défaillance est l'un des problèmes les plus courants qui se produisent avec une probabilité élevée, jusqu'à 90 % dans les petites machines.[15]

II.14.2 Géométrie de roulement :

Un roulement est un corps formé par deux bagues concentriques appelées bagues intérieure et extérieure comportant des chemins de roulement entre lesquelles existent des corps roulants uniformément espacés par une cage. Cette cage est placée entre les bagues et a pour rôle de réduire les frottements en empêchant les éléments de se frotter les uns contre les autres . En fonction de l'application envisagée, les organes de roulement peuvent être des billes, des rouleaux ou des aiguilles. Chaque type de roulement possède des caractéristiques spécifiques en termes de charges radiales et axiales supportées, de vitesse limite ou encore de défaut d'alignement admissible. Certains roulements possèdent de plus une flasque qui est une couverture latérale, couvrant l'espace entre les deux bagues extérieure et intérieure. [15]

II.14.3 Types majeurs de roulements et leurs utilisations :

La grande variété des applications où les roulements sont utilisés a imposé la conception de plusieurs architectures de roulements selon l'application visée. Les roulements rigides à billes (à rouleaux cylindriques) sont les roulements les plus répandus. Ils sont conçus pour des

charges radiales, mais peuvent supporter une petite charge axiale. Les roulements à rouleaux peuvent supporter des charges plus élevées. Ces derniers offrent une plus grande capacité de charge grâce au contact linéaire provoquant ainsi une charge plus importante. Les rouleaux peuvent prendre différentes formes sphériques, cylindriques ou coniques. Les roulements à aiguilles possèdent une forme cylindrique et sont suffisamment fin pour résoudre le problème où l'espace radial est fin. Ils sont quant à eux utilisés lorsqu'un rapport charge/encombrement important est requis.

D'autres types de roulements existent encore tels que les roulements d'orientation, les roulements éco énergétiques, les butées. Il existe même des roulements spéciaux qui sont conçus pour des applications spécifiques tels que les roulements en poly-acétal dont les billes sont en verre pour résister à la corrosion. [15]



Figure II.14 : Différents types de roulements. [15]

II.14.4 Les défauts de roulements :

Un modèle théorique pour le calcul de la durée de vie des roulements est souvent fourni par les constructeurs. Cependant, la contribution de nombreux facteurs, dévie les conditions normales de fonctionnement en provoquant des détériorations prématurées, et modifie la

durée de fonctionnement prédite. Divers techniques de surveillance de l'état de machine sont basés sur l'acoustique, les ultrasons, la température, le courant, l'électrostatique, les forces et les vibrations, qui peuvent estimer l'état de la machine. Cependant, le suivi des niveaux de vibration et d'émission acoustique est le plus utilisé pour détecter des défauts de roulement et pour faire une estimation sur la durée résiduelle des machines rotatives. Dans la plupart des cas, les défauts des roulements commencent par une perte locale de matériau sur une surface mate (bague intérieure et extérieure, éléments roulants). [15]

II.14.4.a) Usure :

L'usure provient généralement de trois causes principales. L'usure peut provenir de particules qui pénètrent entre le corps roulant et les bagues intérieure et extérieure. 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 extérieure et intérieure et sur le corps roulant. L'usure peut encore se manifester à cause d'une lubrification légère ou manquante. Dans une telle situation, le lubrifiant n'est pas capable d'atteindre l'intérieur du roulement et on a besoin d'une ré lubrification fréquente. Les parties usées du roulement sont réfléchissantes comme un miroir.

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 intérieure et circulaires sur le chemin de la bague extérieure. 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. [15]

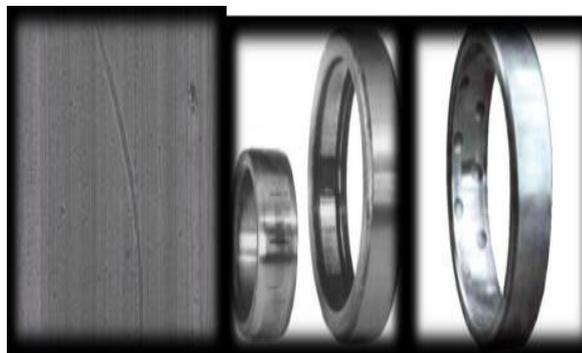


Figure II.15 : Défaut de roulement – usure .[15]

II.14.4.b) Dentelure :

Le défaut 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 apparaît, dont la distance entre les fissures est égale à la distance entre les corps roulants. [15]

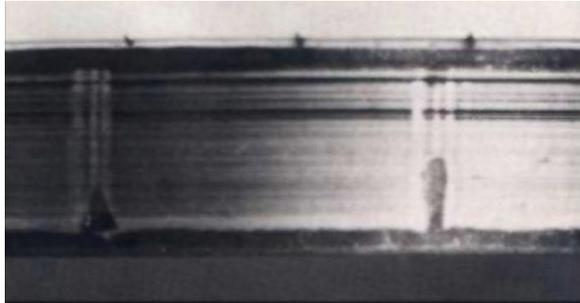


Figure II.16 : Défaut de roulement – dentelure . [15]

II.14.4.c) Rupture de la cage :

L'évolution rapide de ce type de défaut en rend la surveillance difficile. Dans la plupart des cas, un roulement dont la cage est cassée va très vite se détériorer.

Les éléments roulants (billes ou rouleaux) n'étant plus maintenus, ils vont se regrouper et créer un fléchissement de l'arbre ou, notamment dans le cas de rouleaux, se mettre en travers, entraînant ainsi le blocage immédiat du rotor. [18]



Figure II.17 : Défaut de roulement - Rupture de la cage.[18]

II.14.4.d) Bavure :

Ce phénomène apparaît sous forme d'un transfert de matière d'une surface à une autre. Cela peut être causé par plusieurs facteurs : un manque de lubrification, la 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. [15]

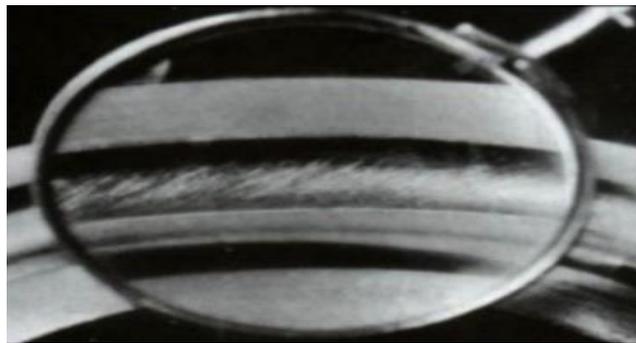


Figure II.18 : Défaut de roulement – bavure .[15]

II.14.4.e) Ecaillage :

Il se caractérise par des traces de fissuration et d'arrachement de fragments de matière. Il apparaît normalement à cause du vieillissement du roulement. Mais l'écaillage arrive aussi à cause d'une grande différence de température entre la bague intérieure et extérieure et, de même, si le boîtier qui porte le roulement possède la forme ovale, on obtient le même résultat ; il faut alors 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. [15]



Figure II.19 : Défaut de roulement – écaillage. [15]

II.14.4.f) Corrosion :

Elle se manifeste par des taches d'oxydation sur l'alésage, le diamètre extérieur et les faces d'appui du roulement. Elle apparaît après la présence d'eau ou d'humidité pour une longue période dans le roulement. La corrosion peut entraîner la cassure d'une bague ou du corps roulant. Pour la corriger, il faut utiliser un meilleur lubrifiant antirouille. [15]

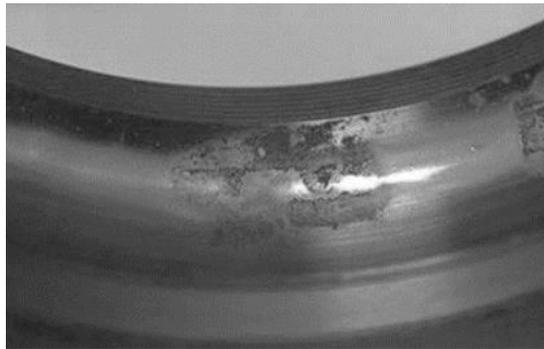


Figure II.20 : Défaut de roulement – corrosion. [15]

II.14.4.g) Coup, fissures, Cassures :

Ils se manifestent avec des ruptures des bagues et des traces visibles d'outils ; ils proviennent dans la plupart des cas d'une mauvaise manipulation du roulement, par exemple un coup de marteau au moment du montage. La cassure peut encore provenir d'une corrosion ou d'une bavure. [15]

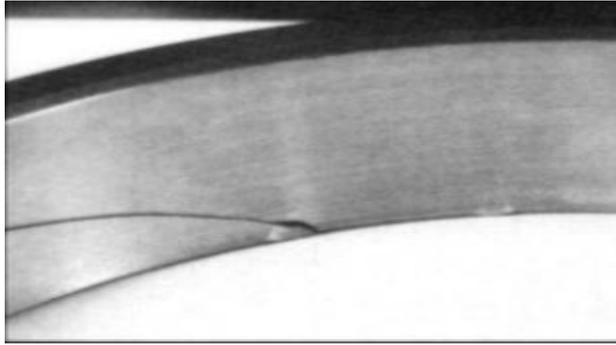


Figure II.21 : Défaut de roulement – cassure. [15]

II.14.4.h) Choc électrique :

Le passage d'un courant électrique dans un roulement en rotation ou non peut endommager ses différentes parties. [15]

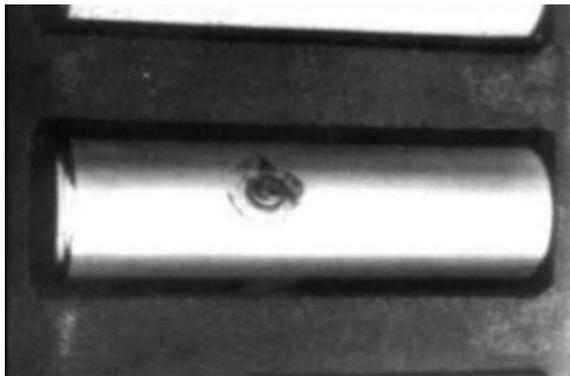


Figure II.22 : Défaut de roulement – choc électrique. [15]

II.14.4.i) Jeux de paliers :

Les typologies vibratoires liées à des jeux de palier se caractérisent selon l'importance du défaut par :

– l'excitation des résonances hautes fréquences des différents éléments constitutifs du roulement et palier par chocs. La fréquence de répétition correspond à la fréquence de rotation et à la fréquence de cage dans le cas d'un jeu interne conséquent entre éléments roulants et cage (usure ou rupture de cage). Cependant, si la bague tournante ou les éléments tournants présentent des altérations, nous avons vu précédemment que l'augmentation du jeu fonctionnel interne se manifestait par une diminution de l'étendue de la zone de charge avec,

pour conséquence, une forte augmentation du nombre de bandes latérales associées à la fréquence de défaut de l'élément altéré.

Globalement, ces excitations de résonances se traduisent par une forte élévation de la valeur efficace et crête de l'accélération hautes fréquences.

– un peigne de raies basses et moyennes fréquences plus ou moins étendu de pas correspondant à la fréquence de rotation, dû à la troncature par la fonction de transfert de la force d'excitation sinusoïdale induite par le déséquilibre résiduel (ou non) de la ligne d'arbres.
[18]

II.15 Conclusion :

L'analyse vibratoire est aujourd'hui un outil performant dans un monde industrie recherchant un maximum de productivité. Elle est la méthode la plus puissante pour éviter les pannes mécanique des défauts mécanique et les détecte de manier plus précise.

L'analyse vibratoire offre trois principaux niveaux d'analyse : la surveillance, le diagnostic et le suivi de l'endommagement. De nombreux travaux de recherches se développent encore aujourd'hui autour de nouvelles techniques d'analyse vibratoire. Elles reposent souvent sur des méthodes de traitement avancées du signal. Ces techniques se sont également améliorées grâce à la connaissance du système mécanique en terme vibratoire.

Dans ce chapitre, nous représentons la méthode de l'analyse vibratoire, qui permettra de mettre en évidence un grand nombre des défauts causeront les pannes dans les machines tournantes par l'identification de leurs fréquence.

Le but de cette méthode est d'éviter les arrêts de production non programmé, augmenté la durée de vie des équipements et assurer un contrôle de qualité permettent de mettre une procédure de maintenance efficace.

Chapitre III :

Application

Chapitre III : Application

III.1.Introduction :

Ce chapitre présente la partie expérimentale du projet. Méthodes de diagnostic des défauts des roulements et le principe de fonctionnement du stand utilisé pour les expériences liées à ces pannes.

Le Stand expérimental de ce travail monté au niveau du laboratoire des systèmes électro mécanique (LSELM) (bloc C).

III.2. Description de l'appareil PT 500.04 :

Un analyseur de vibrations assisté par ordinateur a été développé pour interpréter la série PT500 de tests de diagnostic de machine, mais le compteur peut également être utilisé avec de nombreux autres tests liés aux vibrations. Le système se compose de deux capteurs d'accélération, d'un capteur de vitesse de rotation, d'un amplificateur de mesure de gain réglable et d'un logiciel d'analyse.

Les caractéristiques du logiciel d'analyse sont: l'oscilloscope est testé en fonction du temps, l'analyse spectrale est testée en fonction de la fréquence et l'instrument est utilisé pour mesurer l'amplitude des vibrations. Le logiciel peut utiliser les différentes techniques décrites au chapitre 3 pour appliquer différentes méthodes d'analyse aux signaux de vibration et comparer leur efficacité. Par conséquent, il est facile de déterminer les avantages et les inconvénients de ces différentes technologies. [23]



Figure.III.1 :L'appareil de base PT 500.04. [14]

L'accessoire **PT 500.04** comprend :

- 1 appareil de mesure USB ;
- 1 CD-ROM avec logiciel ;
- 2 capteurs d'accélération avec câble de raccordement ;
- 2 adaptateurs de fixation M8 pour le capteur d'accélération ;
- 1 capteur de référence avec support magnétique et câble de raccordement ;
- 1 amplificateur de mesure avec bloc d'alimentation secteur ;
- 1 marque réfléchissante pour le capteur de référence ;
- 1 clé ;
- 1 câble D-sub 37 broches. [23]

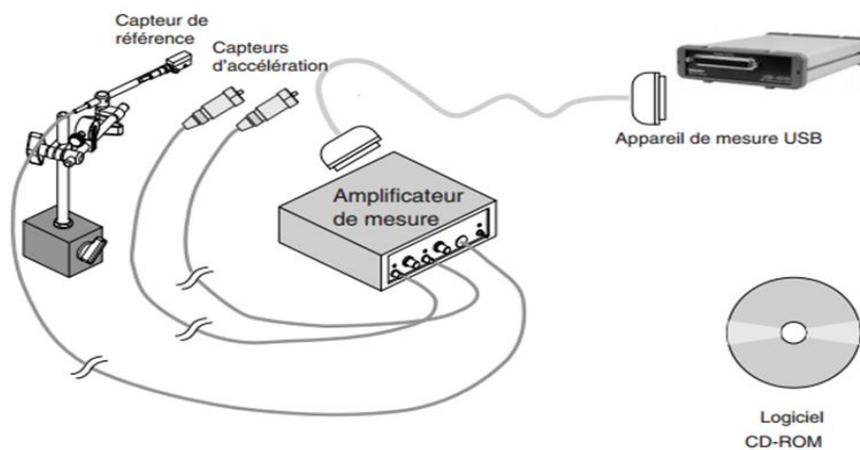


Figure. III.2: Aperçu des composants du PT 500.04.[14]

III.3. Chaîne de mesure :

III.3.1. Analyseur de vibration PT500.04 :

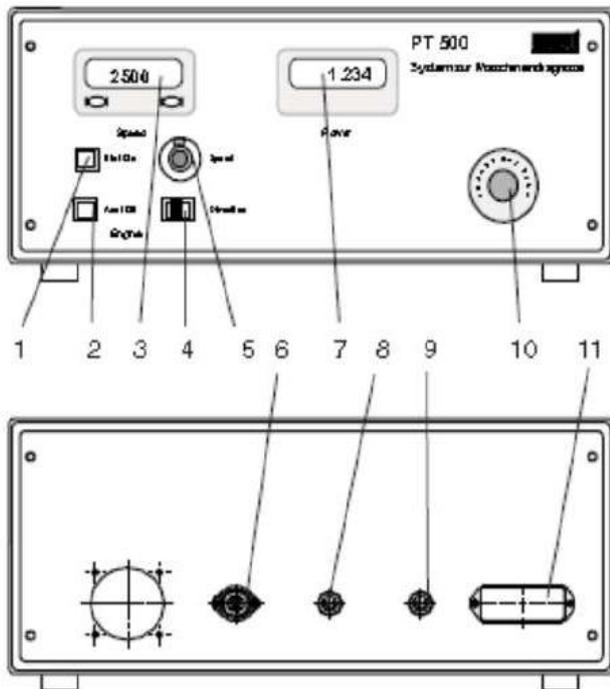
L'analyseur de vibration PT500.04 constitue le cœur de notre système de diagnostic de machines. Il comprend les composants suivants:

- * Amplificateur de mesure ;
- * la carte d'acquisition des données ;
- * Logiciel pour l'analyse ;
- * Capteur de vibration ;
- * Capteur de référence. [23]



Figure .III. 3: différents composants de la chaîne de mesure . [23]

III.3.1.1. Amplificateur de mesure :



- 1 Interrupteur de mise en marche du moteur ;
- 2 Interrupteur de mise en arrêt du moteur ;
- 3 Affichage de la vitesse de rotation ;
- 4 Commutateur du sens de rotation ;
- 5 Bouton de réglage de la vitesse de rotation ;
- 6 Raccord du moteur ;
- 7 Affichage de la puissance absorbée ;
- 8 Raccord du Câble de terre (pour PT500.04) ;
- 9 Raccord du capteur de vitesse de rotation ;
- 10 Bouton d'arrêt d'urgence ;
- 11 Raccord de l'alimentation en tension avec interrupteur. [23]

Figure .III. 4: Amplificateur de mesure. [23]

III.3.1.2. Appareil de mesure USB :

- 12 Connecteur D-sub 37 broches pour le raccordement à l'amplificateur de mesure.
- 13 Port USB pour le raccordement au PC.



Figure .III.5 : Appareil de Mesure USB. [23]

III.3.1.3 Capteurs et transmetteurs :

➤ **Capteur d'accélération :**

Les capteurs d'accélération sont des capteurs piézo-électriques avec une électronique intégrée. Les capteurs convertissent les vibrations mesurées en énergie électrique signaux.

Ils se caractérisent par :

- La sensibilité nominale est de 100 mV / g.
- Les capteurs fonctionnent dans une plage de température De -40 °C à +85 °C.
- Le capteur est d'abord vissé dans la pièce jointe adaptateur en utilisant les tiges filetées.
- Les câbles de connexion coaxiale doivent être fixés à la douille sur le capteur. [23]



Figure .III.6 : Capteur de mesure avec câble de raccordement. [23]

➤ **Capteur de référence :**



Figure.III.7 : Capteur de référence avec rotation support magnétique. [23]



Figure.III.8 : capteur de vitesse de ou référence. [23]

III.4. Structure de l'appareil :

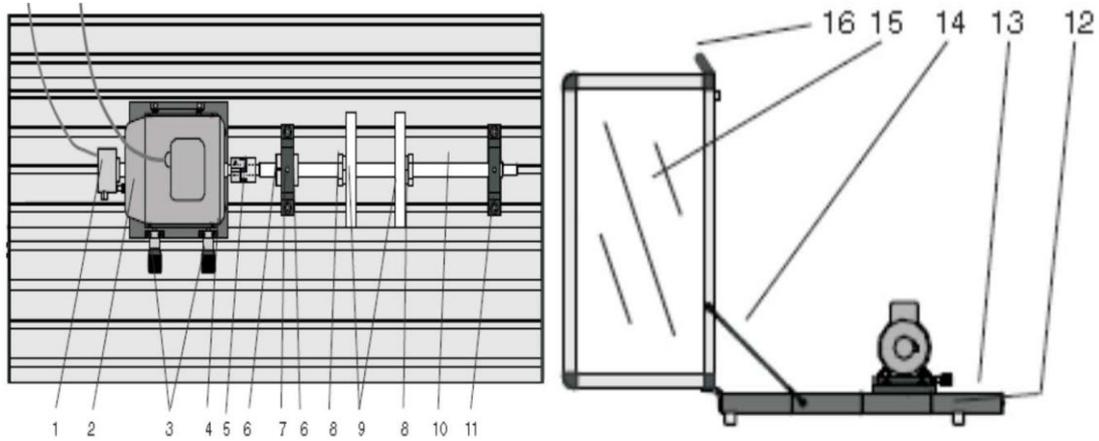


Figure.III.9 : Extrait de la vue en plan. [24]

Tableau.III.1. désignations des éléments du stand : [14]

1	Encodeur	9	Disques de masse
2	Dispositif d'entraînement avec moteur Triphasé	10	Arbre long (arbre court non illustré)
3	Dispositif de réglage pour l'alignement horizontal de l'entraînement	11	Vis de fixation sur le support de palier
4	Vis de fixation du dispositif d'entraînement	12	Pieds en caoutchouc
5	Accouplement élastique à griffes	13	Plaque de fixation avec rainures en T(en aluminium)
6	Bague d'arrêt pour la fixation axiale	14	Câble de retenue du capot de protection
7	Support de palier	15	Capot de protection
8	Kit de serrage	16	Poignée du capot de protection *) petites pièces d'équilibrage non Représentées

III.5. Les essais sur l'appareil PT 500.04 :



Figure.III.10. l'appareil PT 500.04 (le stand). [14]

III.5.1. Description de l'expérience :

Pour mesurer les effets des vibrations engendrées par le fonctionnement ou les dysfonctionnements d'un roulement à billes, il faut placer des capteurs externes au roulement. La méthode la plus couramment utilisée est de placer sur le carter de la machine, auprès des roulements à surveiller, des accéléromètres mesurant les accélérations subies. Notons que le positionnement des capteurs revêt un caractère essentiel pour une bonne détection des défauts. Les accéléromètres sont souvent de nature piézo-électrique : une masse est utilisée pour convertir une accélération en effort qui, lui-même, est converti en charge électrique par un cristal piézo-électrique. Cette charge est ensuite intégrée par un conditionneur pour donner une tension représentative de l'accélération mécanique.

Les accéléromètres piézo-électriques sont de nature très sensible, ce qui permet une mesure efficace. Cependant, ils nécessitent un étalonnage très précis. Il en va de même pour les conditionneurs. [31]

III.5.2. Géométrie et caractéristiques du roulement à étudier :

Les caractéristiques et la géométrie de roulement à étudier coté accouplement, et les multiples de fréquences des défauts sont mentionnés dans les tableaux ci-dessus :

Diamètre intérieure	Diamètre Extérieure	Epaisseur	Diamètre de bille	Diamètre moyen de roulement
25	52	15	8	39

Tableau III.2: La géométrie du roulement (en mm). [31]

Les signaux vibratoires ont été acquit à l'aide des accéléromètres, qui ont été attachés sur le boîtier avec des bases magnétiques. Des accéléromètres ont été placés à la position 6 heures sur le palier côté accouplement. Les signaux vibratoires ont été recueillis en utilisant un enregistreur DAT à 16 canaux, et ont été post-traités dans un environnement MATLAB.

Les données numériques ont été recueillies à 12 KHz (fréquence d'échantillonnage de signal). L'étude a été faite pour une vitesse de rotation égale à 1730 tr/min.

Les fréquences caractéristiques qui se trouvent dans le contenu spectral de vibration sont:

f_{be} : La fréquence de la bague extérieur $f_{be} = fr \cdot Nb \cdot 2(1 - Db \cdot Dm \cdot \cos(\alpha))$;

f_{bi} : La fréquence de la bague interne $f_{bi} = fr \cdot Nb \cdot 2(1 + Db \cdot Dm \cdot \cos(\alpha))$;

f_{bille} : La fréquence de rotation des bille $f_{bille} = fr \cdot Dm \cdot 2 \cdot (1 - (Db \cdot Dm \cdot \cos(\alpha))^2)$;

f_r : La fréquence de rotation ;

N_b : Le nombre de billes ;

D_b : Le diamètre de la bille

D_m : Le diamètre au centre des billes (diamètre moyen) $Dm = D_{bag-ext} + D_{bag-int} \cdot 2$;

A : l'angle de contact (le roulement est à gorge profonde, une charge radiale $\alpha = 0$).

On déterminer la fréquence de rotation ***f_r*** lorsque la vitesse de rotation 1730 tr/min

f_r = 173060 = 28.83 Hz. [31]

III.5.3. Caractérisation des signatures spectrales des défauts des roulements :

III.5.3.1. Caractérisation des signatures spectrales de roulement à l'état sain :

Dans cette première étape, nous allons analyser le spectre de signal de roulement dans son état sain.

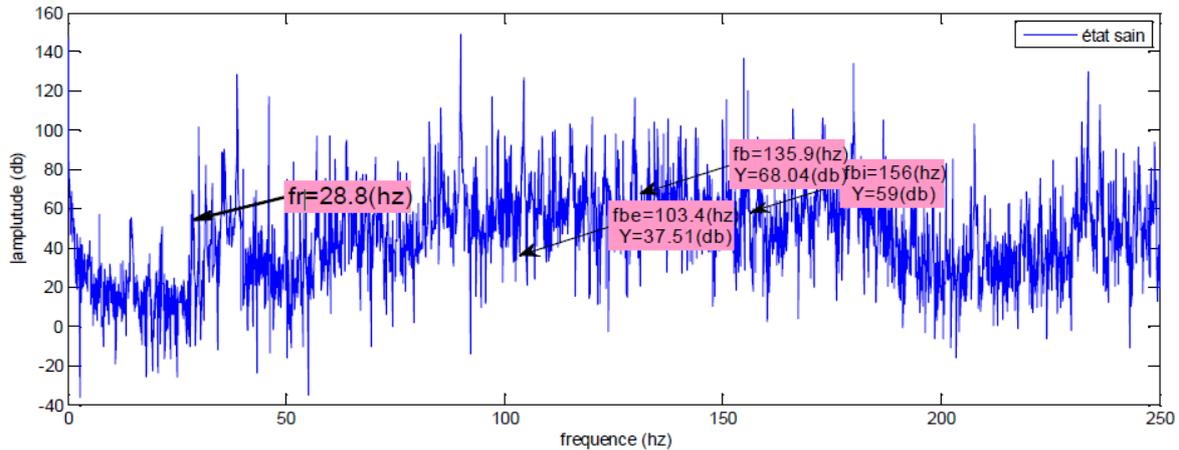


Figure III.11 : spectre de roulement à l'état sain avec les fréquences caractéristiques des défauts de roulement. [31]

La figure présente le spectre de roulement à l'état sain, elle montre des raies des fréquences correspondantes respectivement à la :

- $f_r = 28.83$ Hz : fréquence de rotation de moteur.
- $f_{bi} = 156$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague interne, son amplitude est 59 dB.
- $f_{be} = 103.4$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bague externe, son amplitude est : 37.51 dB.
- $f_{bille} = 135.9$ Hz : fréquence caractéristique de défaut de la bille, son amplitude est : 68.04 dB. [31]

Remarque :

Pour la détection et l'identification d'un défaut il suffit juste de faire une comparaison entre les spectres obtenus dans chaque cas avec celui de référence. Cette comparaison nous montre s'il y a une variation des amplitudes de certaines raies ou bien l'apparition des nouvelles fréquences, nécessite de connaître le spectre sain pour chaque charge. [31]

III.5.3.2. Signatures spectrales de défaut de la bague externe :

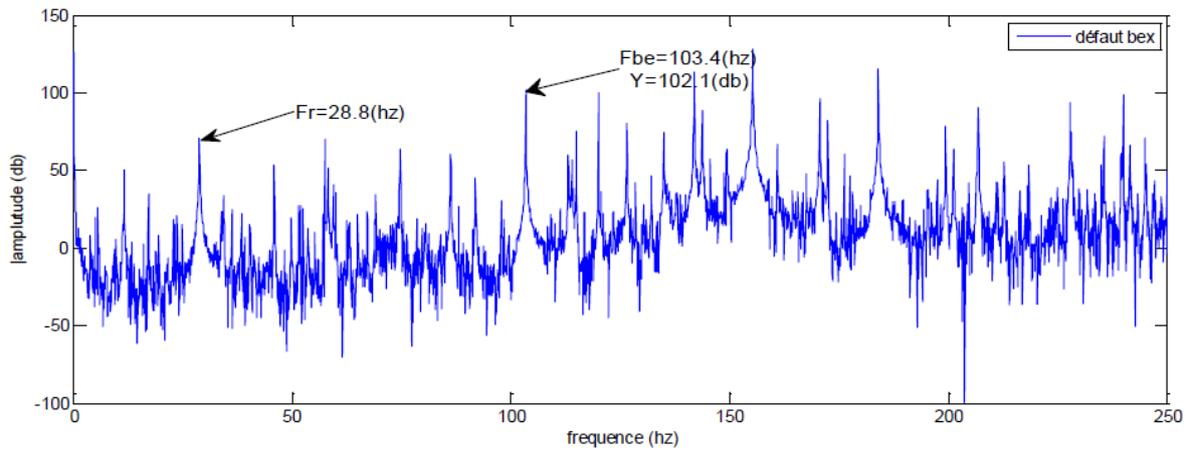


Figure III.12 : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à 0.1778 (mm). [31]

Cette figure présente le spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égale à **0.1778** (mm) , en comparant ce spectre avec celui de la référence on voit qu'il y a une variation d'amplitude de raie de fréquence ***f_{be}* =103.4 Hz** de **37.51 dB** dans l'état sain à **102.1 dB** dans l'état défaillant, ce qui nous montre l'existence d'un défaut sur la bague externe de diamètre **0.1778** (mm).

Dans ce qui suit on présentera l'évolution d'amplitude de raie de fréquence ***f_{be}* =103.4 Hz** en fonction de diamètre de défaut. [31]

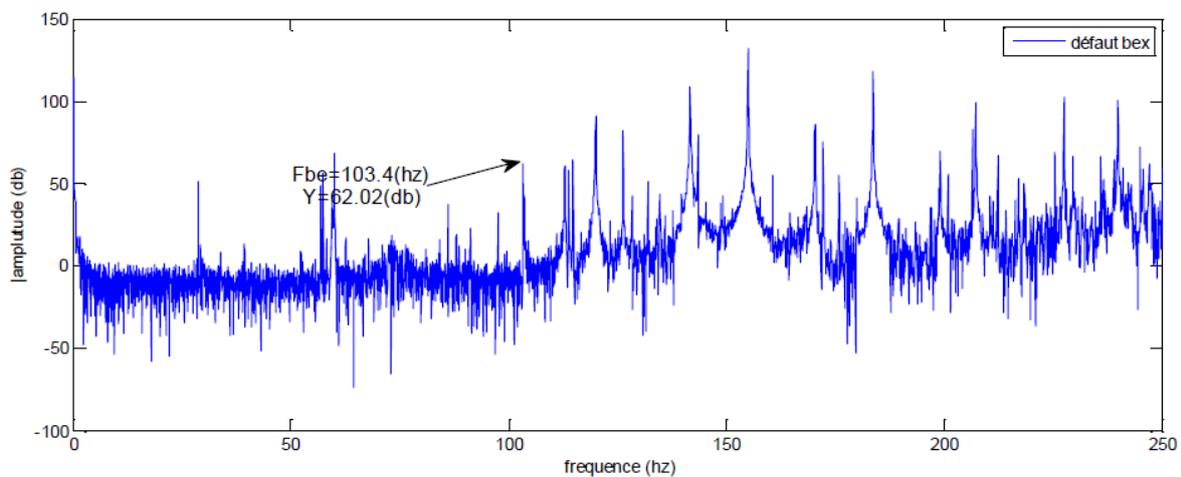


Figure III.13 : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.3556 (mm). [31]

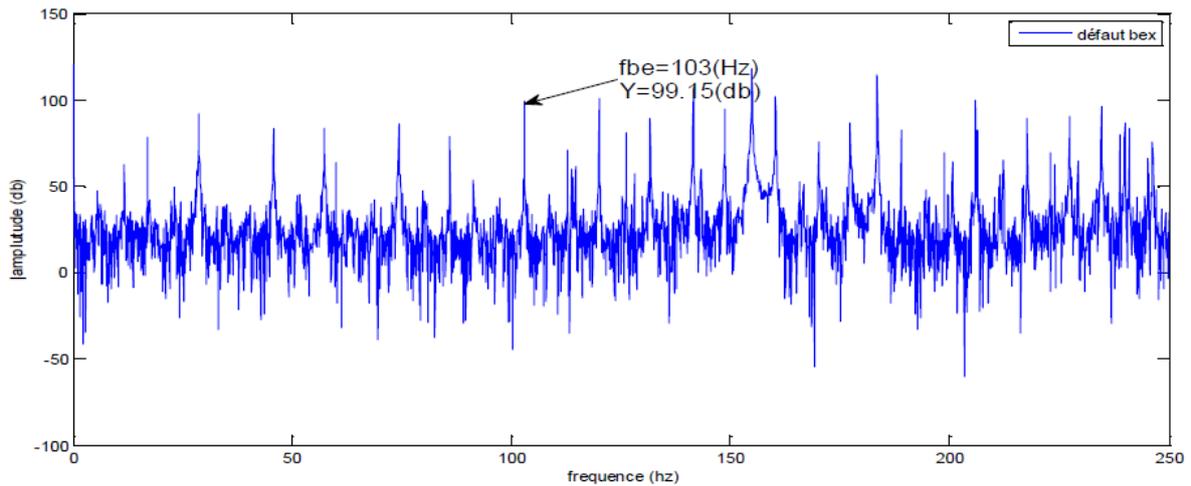


Figure III.14 : spectre de défaut de roulement affectant la bague externe pour un diamètre de défaut égal à 0.5334 (mm). [31]

III.6 Conclusion:

Le but principal de l'analyse des vibrations est d'éviter autant que possible les pannes. Étant donné que le roulement est l'un des composants les plus importants des machines tournantes, une plus grande attention sera accordée aux défauts de ces composants.

De plus, l'analyse des vibrations mettra en évidence un grand nombre de problèmes qui conduiront à une réduction de la durée de vie des composants de la machine:

Résonance structurelle, déséquilibre, mauvaise fixation des roulements, tension excessive de la courroie et désalignement de l'axe.

Chapitre IV :
EVALUATION
DES RISQUES

Chapitre IV : EVALUATION DES RISQUES

IV.1 Introduction :

Les activités sur un site industriel génèrent des risques qui se retrouvent sous le vocable de « risques industriels » et qui ont un impact ; sur les salariés et dans ce cas, il s'agit des risques professionnels ; sur l'environnement extérieur, les populations avoisinantes et sur les biens et dans ce cas, il s'agit de risques environnementaux.

Ces risques industriels sont la conséquence du fonctionnement habituel de l'entreprise. Ils sont qualifiés de « risques majeurs » quand ;la gravité des conséquences qu'ils sont susceptibles de causer à l'environnement extérieur est importante, la probabilité d'apparition est faible.

Dans ce chapitre on va traiter les risques industrielles, l'évaluation des risques ainsi les méthodes d'analyse des risques.

IV.2 La sécurité dans l'industrie :

La sécurité industrielle consiste à maîtriser voire minimiser les risques au sein de l'industrie, et à garantir la sécurité des biens et des personnes, étant donné qu'il s'avère que les activités industrielles présentent des dangers inhérents devant être contrôlés.

Les risques majeurs (**INDUSTRIEL**) de l'industrie sont liés aux accidents, lesquels peuvent avoir un impact important sur l'environnement et nuire à des régions entières outre l'emplacement où est basée l'entreprise dans laquelle les sinistres ont lieux.

La sécurité industrielle s'engage donc à la protection des travailleurs (avec les vêtements nécessaires, par exemple) et leur pilotage (suivi) médical, la mise en place de contrôles techniques et la formation ciblée sur la maîtrise des risques.

Il y a lieu de mentionner que la sécurité industrielle est toujours relative puisqu'il est impossible de garantir qu'aucun accident n'ait lieu. Quoi qu'il en soit, elle a pour principale mission de travailler dans le but de prévenir voire d'éviter les sinistres.

Un aspect très important de la sécurité industrielle est l'usage de statistiques permettant de mieux comprendre quels sont les secteurs les plus touchés concernant les

accidents pour ainsi prendre des précautions toutes particulières dans ce sens. De toute façon, tel que mentionné

ci-haut, la sécurité absolue ne peut jamais être garantie.

L'innovation technologique, la substitution des machines, la capacitation des travailleurs et les inspections habituelles sont quelques-unes des activités liées à la sécurité industrielle.

N'oublions pas que, souvent, les entreprises décident de ne pas investir en matière de sécurité rien que pour économiser de l'argent, mettant ainsi la vie des travailleurs en péril. De même, l'État est tenu de contrôler la sécurité, bien que, par négligence ou corruption, ce ne soit pas toujours le cas. [24]

IV.3 Termes et définition :

IV.3.1 Définition d'un risque industriel :

Le risque industriel majeur est un événement accidentel se produisant sur un site industriel et entraînant des conséquences immédiates graves pour le personnel, les biens et l'environnement. Afin d'en limiter la survenue et les conséquences, les établissements les plus dangereux sont soumis à une réglementation stricte et à des contrôles réguliers. [25]

IV.3.2 Notion de danger :

La norme IEC 61508 définit le danger comme : « une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes ».

Selon le référentiel OHSAS 18001 [OHSAS18001, 1999] : « un danger est un source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments ». Les dangers liés à un système sont inhérents au fonctionnement ou au dysfonctionnement du système, soit extérieur au système.

Le danger se définit comme une propriété intrinsèque inhérente à un type d'entité ou un type d'événement qui a la potentialité de provoquer un dommage.

La définition du mot danger que proposait par la 3SF [3SF, 1974] pour un système

Donné: « Le danger inhérent à un système est défini par le répertoire (la liste) des événements

Redoutés qu'il est susceptible d'engendrer ». La nature qualitative et descriptive du danger apparaît clairement dans cette définition. [25]

IV.4 Les différents types de risques :

Généralement les risques sont classés par nature : le risque thermique, le risque de surpression et le risque chimique...etc. [24]

IV.4.a) Risques mécaniques :

La norme NF EN 292-1 définit les risques mécaniques : « On appelle ainsi l'ensemble des facteurs physiques qui peuvent être à l'origine d'une blessure par l'action mécanique d'éléments de machines, d'outils, de pièces, ou de matériaux solides ou de fluides projetés. »

Par action mécanique, il faut comprendre le mouvement qui peut être celui de l'objet ou celui du corps ou une partie du corps humain. À l'origine de ce risque, il y a le principe de la conservation de l'énergie ; et c'est la diminution de l'énergie mécanique lorsqu'il y a contact avec le corps humain qui cause la blessure.

On peut regrouper les risques mécaniques en plusieurs familles, en fonction de la nature des atteintes au corps humain.

Ce sont :

- les risques de choc ;
- les risques d'écrasement ;
- les risques d'entraînement ;
- les risques de coupure, piqûre, sectionnement ;
- les risques de projection de solides et de liquides.

Très souvent, les accidents produits ont pour origine plusieurs de ces risques, cas par exemple des engrenages ou des courroies en mouvement qui présentent des risques d'entraînement suivis d'écrasement. [24]

• **Les sources des risques mécaniques :**

Les salariés se déplacent et bougent en permanence ; ils utilisent des machines et des appareils pleins de mécanismes mobiles. Dès lors, rien d'étonnant que les risques mécaniques soient présents un peu partout dans les entreprises comme dans la vie de tous les jours.

Les risques mécaniques prennent une certaine importance lors des travaux suivants :

- les opérations manuelles avec des outils simples ou des machines-outils portatives ;
- les opérations faisant appel à des équipements de travail nombreux et variés. [24]

IV.4.b) Les risques dus aux vibrations :

Les vibrations sont un phénomène mécanique, couramment rencontré en milieu de travail. Elles sont à l'origine de deux risques qui conduisent à des maladies professionnelles, que sont les pathologies dues aux vibrations et celles dues aux bruits qui seront étudiées plus loin dans ce chapitre. [24]

IV.4.c) Le risque de surdité :

La surdité a pour origine les bruits qui sont la perception par les oreilles des vibrations transmises par l'air. Il en résulte une certaine analogie entre le risque de surdité et ceux dus aux vibrations ; cette analogie se limite au phénomène vibratoire causal, mais les atteintes et les pathologies qui en résultent sont totalement différentes. D'où la nécessité de consacrer une partie distincte pour le risque de surdité qui possède ses propres caractéristiques et ses mesures de prévention spécifiques. [24]

IV.4.d) Le risque électrique :

La « fée électricité » apporte beaucoup de bienfaits, facilite la vie quotidienne et permet le progrès dans tous les domaines : industriel, scientifique, médical, artistique... Actuellement, on ne peut pas envisager la vie moderne sans électricité. Cependant, le courant électrique présente aussi des dangers et les morts d'hommes par électrocution ou les incendies et les explosions dus à l'électricité sont fort nombreux. Mal maîtrisé, le courant électrique devient un véritable danger public ; par contre, correctement utilisé et en prenant un minimum de précautions, l'homme peut profiter des bienfaits que l'électricité, depuis sa découverte, ne cesse de lui apporter. [24]

IV.4.e) Les risques dus aux rayonnements non ionisants :

Par rayonnements non ionisants, il faut comprendre les émissions électromagnétiques variées, allant des ondes radio aux rayonnements gamma et cosmiques, dont la lumière visible. Ils peuvent présenter des risques professionnels aux salariés qui y sont exposés. Sous cette rubrique seront traités également les risques présentés par les champs électriques et magnétiques variables (alternatifs) bien qu'ils ne soient pas des rayonnements électromagnétiques à proprement parler.

Les risques présentés par les deux rayonnements électromagnétiques, les rayons X et gamma ont été étudiés dans la partie précédente traitant des rayonnements ionisants. [24]

IV.4.f) Risque chimiques :

Tout produit chimique crée un risque pour tous ceux qui, de près ou de loin, s'y trouvent exposés. de nos jours, plus de 6 millions de produits chimiques sont fabriqués et utilisés de par le monde pour un tonnage de l'ordre de 400 millions de tonnes. Les États-Unis à eux seuls fabriquent plus de 1 200 nouveaux produits par an. Ces chiffres expliquent l'importance des risques chimiques dans le monde. Les produits chimiques présentent deux familles de risques qui sont :

- les risques d'intoxication accidentelle ou chronique.
- les risques d'incendies-explosions dus aux réactions chimiques dangereuses. [24]

IV.4.g) Risque biologiques :

Les risques biologiques sont les infections ayant pour origine les micro-organismes pathogènes rencontrés en milieu de travail. De nombreuses activités professionnelles exposent les salariés aux microbes pris dans un sens général et certains germes engendrent des pathologies qui sont considérées comme des maladies professionnelles et prises en charge comme telles. [24]

IV.4.h) Le risque thermique :

Un incendie se déclare lorsque trois facteurs sont réunis : un combustible, un comburant et une source de chaleur. L'exposition à ce risque peut provoquer des brûlures à des degrés variables selon l'intensité de l'incendie et la distance à laquelle on se situe de celui-ci. L'effet

sur l'Homme est donc immédiat (brûlures) ; les biens matériels se trouvent aussi endommagés. De plus, si l'incendie atteint des réserves de produits chimiques, un nuage toxique pour la santé humaine et pour l'environnement, peut s'en dégager. Enfin, les eaux d'extinction de l'incendie peuvent parfois conduire, elles aussi, à une pollution des sols et des eaux superficielles. Pour prévenir cette pollution, il est nécessaire de mettre en place des bassins de confinement, selon l'article précité, le bassin doit être capable de retenir l'ensemble. [24]

IV.5 Analyse des risques :

L'objectif final d'une analyse des risques est de maîtriser les risques présentés par une activité de façon à ce que seuls des « risques acceptables » soient pris. Il est donc plus indiqué de parler de gestion des risques. [24]

- **Plan par étape :**

Afin d'atteindre cet objectif, un certain nombre d'étapes doivent être franchies (voir schéma du plan par étape).



Figure. IV.1.: Plan par étapes gestion des risques / analyse des risques.

IV.5.1 Les étapes de la gestion des risques :

Pour une excellente gestion des risques, il est indispensable de réaliser une étude spécifique. Le respect de certaines de ces étapes permet à l'entreprise de gérer les risques de manière à ce qu'ils ne puissent constituer un obstacle à ses projets. [26]

- **Etape 1: Identification des risques :**

L'identification comprend l'identification de toutes les parties à risque. Dans cette optique, l'entreprise doit établir une liste de tous les risques potentiels. Il doit distinguer les risques les plus importants d'une part et les risques moins importants d'autre part. À l'aide de cette liste, elle peut analyser leur pertinence. [26]

- **Etape 2: Évaluation des risques :**

Cette étape consiste à évaluer le risque en fonction de la gravité du risque et à déterminer l'étendue de son impact potentiel et des dommages connexes. En plus de cela, il permet également de mesurer le coût associé aux risques identifiés. À cette fin, une collecte de données et une analyse statistique doivent être effectuées. [26]

- **Etape 3: Définition des solution :**

Les entrepreneurs ont plusieurs solutions possibles pour trouver la solution la plus adaptée. En étudiant la possibilité d'éliminer ou de limiter son impact, il peut définir une solution en fonction du risque lui-même. Il peut considérer les caractéristiques du projet et apporter quelques modifications pour éviter les risques. [26]

- **Etape 4 : Mise en œuvre des solutions :**

Après avoir déterminé la solution la plus appropriée, il est nécessaire de continuer à l'exécuter. Il est important de définir le coût de mise en œuvre de la solution en fonction des méthodes dont dispose l'entreprise. Les dépenses connexes doivent être réduites, sinon cela peut entraîner des dépenses supplémentaires pour l'entreprise. [26]

- **Etape 5 : Le contrôle :**

La gestion des risques nécessite un suivi régulier. Ce suivi vise à garantir la fiabilité de chaque étape. Cela permet de mettre en place des solutions à moyen et à long terme. [26]

IV.6 Méthodes d'analyse et d'évaluation des risques :

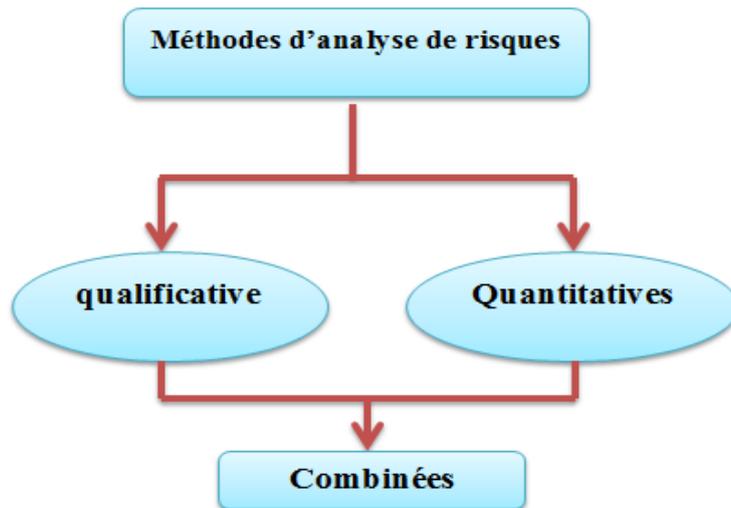


Figure. IV.2: Typologie des méthodes d'analyse de risques.

IV.6.1 Méthodes d'analyse qualitative :

- L'APR ;
- L'AMDEC ;
- L'Arbre de Défaillances ;
- L'Arbre d'Evénements.

Restent des méthodes qualitatives même si certaines mènent parfois aux estimations de fréquences d'occurrence avant la classification des risques.

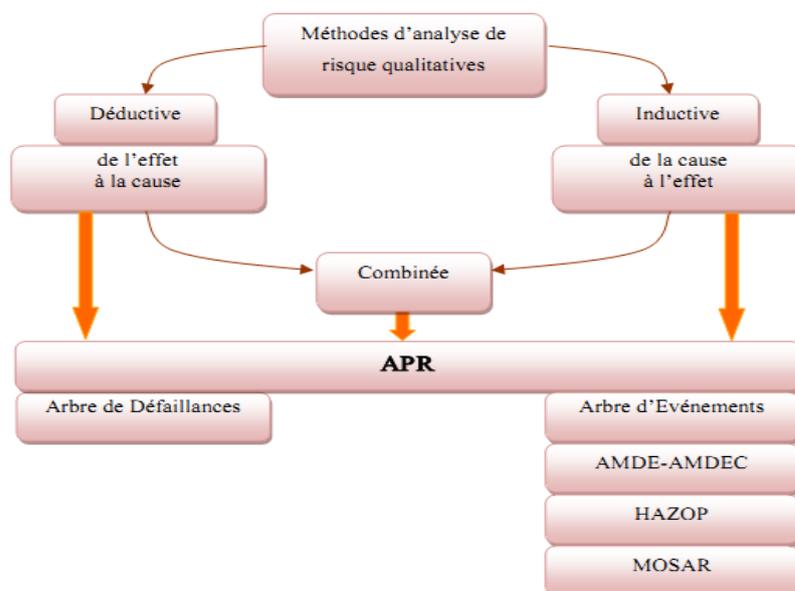


Figure. IV.3 : Classification des principales méthodes d'analyse de risque qualitatives.[27]

IV.6.2 Méthodes d'analyses quantitatives :

L'analyse quantitative s'appuie sur des outils mathématiques et vise à évaluer la fiabilité et la sécurité de fonctionnement, etc. Cette évaluation peut se faire par des calculs probabilistes (par exemple, lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'un événement terrible) ou en recourant à des modèles différentiels probabilistes (par exemple, chaînes de Markov, réseaux de Pétri, automates à états finis, etc.).

Les analyses quantitatives ont de nombreux avantages car elles permettent:

- Évaluer la probabilité des composantes de la sûreté de fonctionnement ;
- fixé des objectifs de sécurité ;
- jugé de l'acceptabilité des risques en intégrant les notions de périodicité des contrôles, la durée des situations dangereuses, la nature d'exposition, etc.
- apporter une aide précieuse pour mieux juger du besoin d'améliorer la sécurité ;
- hiérarchiser les risques ;
- Comparer et ensuite ordonner les actions à entreprendre en engageant d'abord celles permettant de réduire significativement les risques ;
- Chercher de meilleures coordinations et concertation en matière de sécurité entre différents opérateurs (sous-systèmes interagissant) ou équipes (exploitation, maintenance, etc.).

Quoique l'utilité des méthodes quantitatives soit indiscutable, ces dernières présentent tout de même un certain investissement en temps, en efforts et également en moyens(logiciels, matériels, financiers, etc.). Il peut s'avérer que cet investissement soit disproportionné par rapport à l'utilité des résultats attendus, le cas échéant l'analyse quantitative est court-circuitée pour laisser la place aux approximations qualitatives (statistiques, retour d'expérience, jugement d'expert, etc.). [27]

IV.7 Les méthodes d'analyse des risques :

IV.7.1 L'analyse préliminaire des risques (APR) :

L'analyse Préliminaire de Risque (Danger) a été développée au début des années 1960 dans les domaines aéronautique et militaire.

Selon la norme **CEI-300-3-9 (CEI 300-3-9, 1995)** : « L'APR est une technique d'identification et d'analyse de la fréquence du danger qui peut être utilisée lors des phases amont de la conception pour identifier les dangers et évaluer leur criticité ». [14]

IV.7.2 HAZOP :

C'est une méthode de revue systématique en groupe de travail permettant d'identifier et d'analyser les dysfonctionnements d'une installation de procédés et la mise en place de mesures compensatoires. Cette méthode d'analyse de risques est la plus utilisée mondialement dans les industries chimiques, pharmaceutiques, oil & gas, notamment lors de la conception d'une nouvelle installation, la modification ou revue d'une installation existante.

L'intérêt de la méthode HAZOP son :

- ✓ Méthode accessible et facile à mettre en œuvre ;
- ✓ Méthode rigoureuse et logique ;
- ✓ Elle est effective pour les fautes techniques et les erreurs humaines ;
- ✓ Elle utilise l'expérience des occupants lors du processus d'analyse ;
- ✓ Elle reconnaît l'existence des systèmes de protection existants et développe des recommandations pour de nouveaux.

La méthode HAZOP présente également des limites :

Son succès dépend de la composition de l'équipe d'analyse et de leurs connaissances,

C'est une méthode optimisée pour les dangers dans les processus, et nécessitant certaines modifications pour être adaptée à d'autres types de dangers,

Cela requiert un développement des descriptions procédurières qui ne sont pas souvent disponibles en détail. [28]

IV.7.3 La méthode Nœud Papillon :

Le Nœud Papillon est une approche de type arborescente largement utilisée dans les pays européens comme les Pays-Bas qui possèdent une approche probabiliste de la gestion des risques. Le Nœud Papillon est utilisé dans différents secteurs industriels par des entreprises comme SHELL qui a été à l'origine du développement de ce type d'outils.

Le nœud papillon est une connexion d'un Arbre de Défaillances et d'un Arbre d'évènements, généralement établie lorsqu'il s'agit d'étudier des évènements hautement critiques. [28]

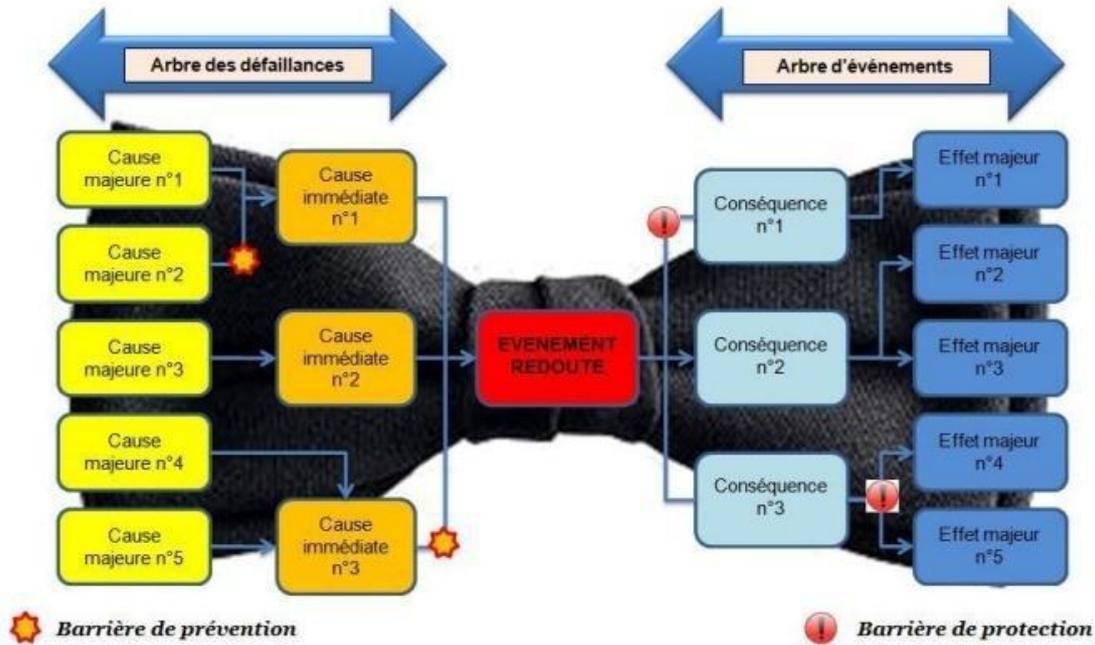


Figure. IV.4 : Représentation de scénarios d'accident selon le modèle du nœud papillon. [28]

IV.7.4 la méthode what-if (que se passe-t-il si ?) :

What-if en anglais.

Que se passe-t-il si en français.

C'est une méthode qualitative bien établie et largement utilisée pour identifier et analyser les dangers, les scénarios de risque et les contrôles existants et nécessaires.

Bien que développé à l'origine pour les études sur différents risques, l'analyse des dangers et les variations sont largement utilisées dans de nombreuses autres industries, y compris l'énergie telle que l'énergie électrique, la fabrication, la haute technologie, la transformation des aliments, le transport et les soins de santé, en mentionnant quelques-uns.

La méthode peut être appliquée à un système, à un processus ou à une opération ou à une focalisation plus spécifique, comme un équipement, une procédure ou une activité.

La méthode what-if est une méthode dérivée de l'HAZOP. Elle suit donc globalement la même procédure, La principale différence concerne la génération des dérives des paramètres de fonctionnement.

Ces dérives ne sont plus envisagées en tant que combinaison d'un mot clé et d'un paramètre, mais fondées sur une succession de questions de type : « QUE (what) se passe-t-il SI (IF) tel paramètre ou tel comportement est différent de celui normalement attendu ? ».

La méthode consiste à subdiviser l'installation, à examiner en sections et à poser, pour chaque section, une série de questions qui concernent toujours les mêmes aspects. De cette façon, la méthode acquiert plus de structure. [28]

IV.7.5 MOSAR :

La méthode MOSAR (Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques) a été mise au point par Pierre PERILHON au CEA. Elle est utilisée dans divers domaines, en particulier dans l'étude des risques d'installations à hauts risques (nucléaire, chimique, etc.). En effet, la méthode a été effectivement appliquée dans

Le domaine nucléaire et notamment à EDF (Centres de recherches et d'essais) et au CEA (Installations d'essais).

MOSAR contient deux modules hiérarchiques, un module macro « module 'A' » et un module micro « Module 'B' ». [14]

IV.7.6 AMDEC :

C'est un outil d'analyse qui permet d'améliorer la qualité des produits fabriqués ou des services rendus et favorise la maîtrise de la fiabilité en vue d'abaisser le coût global. (Est régie par la norme AFNOR X 60-510). [14]

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser systématiquement les défaillances potentielles d'un dispositif puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives à apporter au dispositif.

Pour chaque défaillance, trois critères de définition :

- la fréquence d'apparition de la défaillance (indice F) ;
- la gravité des conséquences que la défaillance génère (indice G) ;
- la non-détection de l'apparition de la défaillance, avant que cette dernière ne produise les conséquences non désirées (indice D). [28]

IV.8 L'analyse des défaillances :



Figure. IV.5 : L'analyse des défaillances. [29]

Il s'agit d'identifier les schémas du type :

IV.8.1 La cause :

C'est l'anomalie qui conduit au mode de défaillance.

La défaillance est un écart par rapport à la norme de fonctionnement.

Les causes trouvent leurs sources dans cinq grandes familles. On en fait l'inventaire dans des diagrammes dits "diagrammes de causes à effets"

Chaque famille peut à son tour être décomposée en sous-familles.

Un mode de défaillance peut résulter de la combinaison de plusieurs causes.

Une cause peut être à l'origine de plusieurs modes de défaillances. [29]

IV.8.2 Le mode de défaillance :

Il concerne la fonction et exprime de quelle manière cette fonction ne fait plus ce qu'elle est sensée faire. L'analyse fonctionnelle recense les fonctions, l'AMDEC envisage pour chacune d'entre-elles sa façon (ou ses façons car il peut y en avoir plusieurs) de ne plus se comporter correctement. [29]

IV.8.3 L'effet :

L'effet concrétise la conséquence du mode de défaillance.

Il dépend du point de vue AMDEC que l'on adopte :

- effets sur la qualité du produit (AMDEC procédé) ;
- effets sur la productivité (AMDEC machine) ;
- effets sur la sécurité (AMDEC sécurité) ;

Un effet peut lui-même devenir la cause d'un autre mode de défaillance. [29]

IV.9 EVALUATION :

L'évaluation se fait selon 3 critères principaux :

- la gravité,
- la fréquence,
- la non-détection.

Ces critères ne sont pas limitatifs, le groupe de travail peut en définir d'autres plus judicieux par rapport au problème traité.

Chaque critère est évalué dans une plage de notes.

Cette plage est déterminée par le groupe de travail. [30]

IV.9.1 La gravité :

Elle exprime l'importance de l'effet sur la qualité du produit (AMDEC procédé) ou sur la productivité (AMDEC machine) ou sur la sécurité (AMDEC sécurité).

Le groupe doit décider de la manière de mesurer l'effet.

IV.9.2 La fréquence :

On estime la période à laquelle la défaillance est susceptible de se reproduire.

IV.9.3 La non-détection :

Elle exprime l'efficacité du système permettant de détecter le problème.

IV.9.4 La criticité :

Lorsque les 3 critères ont été évalués dans une ligne de la synthèse AMDEC, on fait le produit des 3 notes obtenues pour calculer la criticité. [30]

$$C = G \times F \times D$$

C : Criticité ;

G : Gravité ;

F : Fréquence ;

D : Non-détection.

Le groupe de travail doit alors décider d'un seuil de criticité. Au-delà de ce seuil, l'effet de la défaillance n'est pas supportable. Une action est nécessaire.

Tableau IV.1 : Indice de la fréquence F. [14]

Valeurs de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance pratiquement inexistante sur des installations similaires en exploitation, au plus un défaut sur la durée de vie de l'installation
2	Défaillance rarement apparue sur du matériel similaire existant en exploitation un défaut par année. ou Composant d'une technologie nouvelle pour lequel toutes les conditions sont
3	Défaillance occasionnellement apparue sur du matériel similaire existant en exploitation un défaut par trimestre.
4	Défaillance fréquemment apparue sur un composant connu ou sur du matériel similaire existant en exploitation un défaut par mois ou Composant d'une technologie nouvelle pour lequel toutes les conditions ne

Tableau IV.2 : Indice de gravité G. [14]

Valeurs de G	Gravité de la défaillance
1	1 Défaillance mineure : aucune dégradation notable du matériel
2	Défaillance moyenne nécessitant une remise en état de courte durée
3	Défaillance majeure nécessitant une intervention de longue durée ou Non-conformité du produit, constatée et corrigée par l'utilisateur du moyen de production
4	Défaillance catastrophique très critique nécessitant une grande intervention Non-conformité du produit, constatée par un client aval (interne à l'entreprise) Ou Dommage matériel important (sécurité des biens).
5	Sécurité/Qualité : accident pouvant provoquer des problèmes de sécurité des personnes, lors du dysfonctionnement ou lors de l'intervention Ou Non-conformité du produit envoyé en clientèle

Tableau IV.3 : Indice de la criticité. [14]

Valeurs	Définition
1-12	Négligeable
14-30	Acceptable (Moyenne)
32-64	Indésirable (Elevée)
66-80	Inacceptable (interdit)

Tableau IV.4 : Indice de non-détection D. [14]

Valeurs de D	Non-détection de la défaillance
1	Les dispositions prises assurent une détection totale de la cause initiale ou du mode de défaillance, permettant ainsi d'éviter l'effet le plus grave provoqué par
2	Il existe un signe avant-coureur de la défaillance mais il y a risque que ce signe ne soit pas perçu par l'opérateur. La détection est exploitable
3	La cause et/ou le mode de défaillance sont difficilement décelables ou les éléments de détection sont peu exploitables. La détection est faible
4	Rien ne permet de détecter la défaillance avant que l'effet ne se produise : il s'agit du cas sans détection

IV.10 Démarche de l'AMDEC :

La démarche pratique de l'AMDEC se décompose en 4 étapes :

IV.10.1 ETAPE 1 : Initialisation De L 'Etude :

- ✓ la définition de la machine à analyser ;
- ✓ la définition de la phase de fonctionnement ;
- ✓ la définition des objectifs à atteindre ;
- ✓ constitution de groupe de travail ;
- ✓ la définition de planning des réunions ;
- ✓ la mise au point des supports de travail. [30]

IV.10.2 ETAPE 2 : Décomposition Fonctionnelle De La Machine :

- ✓ Découpage arborescent du système ;
- ✓ Inventaire des Fonctions de service ;
- ✓ Inventaire des fonctions élémentaires. [30]

IV.10.3 ETAPE 3: Analyse AMDEC Du Système :

- ✓ Analyse des mécanismes de défaillances (Modes de défaillance, causes, effets, détections éventuelles)
- ✓ Evaluation de la CRITICITE (Estimation des Temps d'intervention, des fréquences 'apparition des défaillances, évaluation des critères de cotation, calcul de la criticité).[30]

IV.10.4 ETAPE 4 : Synthèse De L 'Etude :

- ✓ Hiérarchisation des défaillances (liste des pannes résumées, défaillances de causes communes, classement par catégories, symptômes observables.)
- ✓ Liste des points critiques et plan de maintenance éventuel. [30]

Le tableau ci-dessous est donc donnée à titre d'exemple les démarches pratiquent de la méthode AMDEC.

Tableau IV.5 : Exemple d'un tableau de type AMDEC. [14]

Analyse mode défaillances et leur effet et leur criticité									
Système :				Date :					
Sous système :									
L'élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détections	Criticité			
						F	G	D	C

IV.11 Etude Du Système Moto -Pompe :

Etude De La Pompe Choisie : POMPE E.GA.301:

IV.11.1 Description :

La pompe EGA .301 est une pompe centrifuge, horizontale, à une seule roue formée, à double aspiration, l'aspiration est verticale et le refoulement est orienté vers le haut, elle est entraînée par un moteur asynchrone à cage.

La série EGA .301 vent dire:

E: unité éthylène.

GA: pompe.

300 : la section purification.

1: pompe N°: 1. [14]

IV.11.2 Rôle De La Pompe E-GA.301:

Notre pompe se trouve à l'unité d'éthylène dans la section purification, cette pompe a pour but essentielle, d'aspirer l'éthylène (on était liquide) de fond de ballon de reflex, FA-305 et de le refouler vers la colonne DA -302, à un débit nominale 246m³/h, ce débit est appeler "reflux", le reflux a pour but essentielle, de faire une bonne pureté du C₂H₄ (éthylène) au niveau de colonne DA-302, cette pureté directement reliée à la pression et la température de pompage. Aussi on peut appeler la GA -301: pompe de refoulement. [14]

IV.11.3 Principe De Fonctionnement :

Lorsque le moteur est lancé et que le rotor tourne, le liquide (l'éthylène) pompé arrive par les corps d'aspiration sous une charge, les aubes de la roue accélèrent le liquide à des vitesses très élevées en lui faisant acquérir une énergie de pression, la pression provoque le déplacement de liquide à la sortie de diffuseurs et le pénètre dans le corps de refoulement qui dispose verticalement par rapport à l'axe, et de là s'écoule dans la tuyauterie de refoulement. [14]

IV.12 L'analyse Par L'Outil « AMDEC »:

IV.12.1 Application de L'AMDEC: (Moto pompe centrifuge E-GA 301) :

L'étude a été réalisée pour l'intérêt économique spécialisé dans la fabrication des hydrocarbures. Elle porte essentiellement sur une motopompe en vue d'optimiser sa fiabilité et sa disponibilité puisqu'aujourd'hui, l'intérêt économique de la fonction maintenance réside dans l'anticipation des anomalies potentielles, plus que dans les actions correctives, c'est-à-dire dans la maîtrise de l'ensemble des éléments du processus de fabrication.[14]

IV.12.1.1 Analyse du système :

Dans un premier lieu on a décomposé fonctionnellement le système :



Figure. IV.6 : Décomposition fonctionnelle de système.

IV.12.1.2 Décomposition du système :

L'*AMDEC* est une méthode de réflexion créative qui repose essentiellement sur la décomposition fonctionnelle de système en éléments simples jusqu'au niveau des composants les plus élémentaires.

On a décomposé le système en deux sous-systèmes.

Chaque sous-système est décomposé jusqu'aux organes les plus élémentaires.[14]

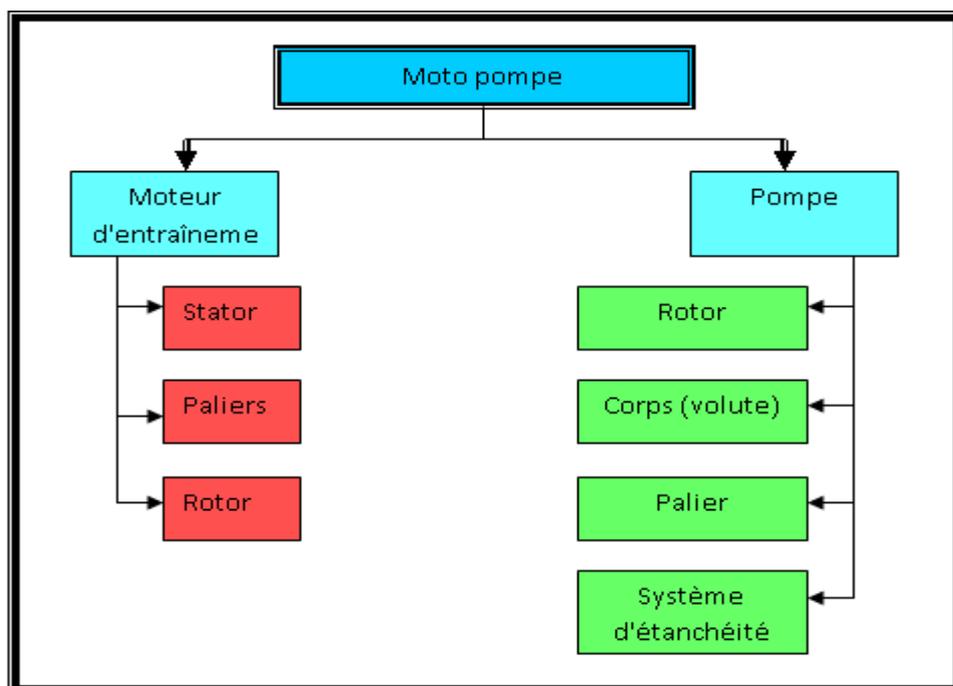


Figure. IV.7: Décomposition du système en organes les plus élémentaire.

Tableau IV.6 Tableaux AMDEC De la pompe. [14]

AMDEC: ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEURS CRITICITES											
Système: moto pompe. Sous-système: pompe.		Date:									
L'éléments	Fonctions	Mode de défaillance	Nature de défaillance	Causes	Effets	Détection	Criticité				Actions correctives.
							F	G	D	C	
Les paliers et les Roulement	Porte et garder la position de l'arbre de la pompe	Usure des paliers.	Mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais alignement. - mauvais lubrification. - Mauvais qualité d'huile. - vibration et choc. - déplacement de la durée de vie. 	<ul style="list-style-type: none"> - débit insuffisant. - diminution de rendement. - mauvais rotation de rotor. 	Alarme (visuel). et bruit.	2	4	2	16	<ul style="list-style-type: none"> - Changer les roulements et le filtre d'huile. - lubrifier les paliers.
Système D'étanchéité	Pour assurer une bonne étanchéité (Élimination des fuites).	Fuite à l'étanchéité.	Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> - jeu trop élevé entre la chemise de la garniture et l'arbre. - joints torique détérioré. - présence de l'impureté dans le liquide. - grippage de la partie mobile. 	<ul style="list-style-type: none"> - débit insuffisant. - diminution de rendement. - destruction de la pompe. 	Alarme (visuel).	2	5	2	20	Placer correctement les joints et vérifier les filtres.
		Usure	Mécanique	Fin de la durée de vie des joints.	Perte de performance.	Alarme (visuel).	1	4	3	12	Changement périodique.

AMDEC: ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEURS CRITICITES											
Système: moto pompe. Sous-système: pompe.		Date:									
L'éléments	Fonctions	Mode de défaillance	Nature de défaillance	Causes	Effets	Détection	Criticité				Actions correctives.
							F	G	D	C	
Les paliers et les Roulement	Porte et garder la position de l'arbre de la pompe	Usure des paliers.	Mécanique	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvais alignement. - mauvais lubrification. - Mauvais qualité d'huile. - vibration et choc. - déplacement de la durée de vie. 	<ul style="list-style-type: none"> - débit insuffisant. - diminution de rendement. - mauvais rotation de rotor. 	Alarme (visuel). et bruit.	2	4	2	16	<ul style="list-style-type: none"> - Changer les roulements et le filtre d'huile. - lubrifier les paliers.
Système D'étanchéité	Pour assurer une bonne étanchéité (Élimination des fuites).	Fuite à l'étanchéité.	Hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> - jeu trop élevé entre la chemise de la garniture et l'arbre. - joints torique détérioré. - présence de l'impureté dans le liquide. - grippage de la partie mobile. 	<ul style="list-style-type: none"> - débit insuffisant. - diminution de rendement. - destruction de la pompe. 	Alarme (visuel).	2	5	2	20	Placer correctement les joints et vérifier les filtres.
		Usure	Mécanique	Fin de la durée de vie des joints.	Perte de performance.	Alarme (visuel).	1	4	3	12	Changement périodique.

IV.13 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons appliqué la méthode AMDEC

La méthode AMDEC est une méthode d'analyse permettant de mettre en évidence de manière prospective un certain nombre d'organes ou de machines critiques pour la sécurité ou la fiabilité du système après un inventaire des éventuels défauts de base. AMDEC fournit notre système:

- Une autre vision du système ;
- Soutenir la prise de décision et l'amélioration ;
- Informations à gérer en termes de recherche de sécurité opérationnelle et de mesures à prendre.

À l'issue de la recherche et de l'analyse des risques des entreprises industrielles, nous avons conclu que zéro risque et éviter les dommages sont impossibles. Il faut toujours comprendre la racine du problème et utiliser des méthodes d'analyse des risques pour mener des recherches .afin de recommander objectivement une méthode appropriée.

L'analyse des risques reste une étape très importante dans le domaine de la sécurité, elle nous permet d'utiliser différents outils et méthodes pour identifier les risques et les différentes sources de dangers.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Les vibrations sont presque partout dans les pompes, les ventilateurs, les turbines et les compresseurs.

Les vibrations des machines en rotation raccourciront la durée de vie de l'équipement, dans les cas extrêmes, elles endommageront l'équipement et entraîneront même une panne catastrophique.

De plus, l'observation des phénomènes vibratoires permet de découvrir ces problèmes et d'éviter des pannes imprévues, parfois très coûteuses. L'analyse vibratoire est généralement utilisée pour contrôler les machines tournantes, en particulier pour surveiller les parties fragiles ou importantes du système, mais cela permet également d'établir une procédure qui comprend la détection de l'apparition de défauts sans démonter le système. Les machines sont fabriquées en échantillonnant des signaux de vibration à l'aide de capteurs de vibration. Utilisez ensuite les seuils d'alarme prédéfinis pour définir le processus de contrôle.

Nous ne cherchons généralement pas plus loin la cause profonde du problème.

Cependant, dans la plupart des cas, il est également possible d'analyser les erreurs.

L'analyse des vibrations est l'une des méthodes et techniques qui permet aux ingénieurs de concevoir une procédure de maintenance efficace en remplaçant la maintenance méthodologique ou systématique de ces caractéristiques particulières.

Le cadre de diagnostic et de pronostic des défauts de roulements est un enjeu majeur dans une industrie moderne, il a pour objectif de maintenir la production, augmenter le taux de disponibilité et de fiabilité des machines afin d'éviter les arrêts non-programmés et les substitutions indésirables des pièces de rechange.

L'objectif de cette thèse est de mettre en œuvre une méthode de diagnostic automatique des pannes de roulements pour moteurs asynchrones.

Les machines tournantes dominent le système de production et peuvent occuper une position stratégique. Par conséquent, le suivi de son état de fonctionnement est essentiel pour atteindre les objectifs fixés par l'entreprise.

L'analyse des vibrations permet de détecter l'apparition de défauts sans démonter la machine en échantillonnant le signal de vibration à l'aide d'un capteur de vibrations. Le contenu de fréquence de vibration de cette analyse est l'information clé pour diagnostiquer les défauts des machines tournantes et caractériser la dynamique structurelle.

Les résultats expérimentaux obtenus sont clairs et efficaces, nous permettant de faire un bilan complet de l'état de santé de la machine. Cela signifie également économiser les pièces de rechange, en particulier le volume de production.

Dans cette étude, les résultats de mesure montrent que l'utilisation de méthodes d'analyse vibratoire nous permet de détecter avec précision les défauts à l'aide de l'analyse spectrale.

L'utilisation de cette méthode peut faire un bon diagnostic, localiser rapidement le composant défectueux, la cause du défaut et réduire les temps d'arrêt de la machine.

Cette méthode est très importante dans la maintenance de l'état.

Dans un environnement industriel, le système de production devient de plus en plus complexe, et il est impossible de se débarrasser des interférences ou des pannes. Ces défauts affecteront la qualité du produit et peuvent provoquer l'arrêt immédiat d'une ou plusieurs machines. La plupart des techniques de diagnostic des défauts visent à identifier les défauts de manière précise.

Le diagnostic des pannes de ces machines repose principalement sur la surveillance des symptômes liés aux différentes conditions de dégradation. Ces symptômes peuvent être extraits et extraits de diverses sources d'informations, dont l'analyse des vibrations, qui occupe une place importante dans l'industrie. C'est à travers cette méthode que nous avons investi dans le diagnostic précoce de la défaillance des roulements, élément sensible des machines tournantes. Les recommandations pour les outils de traitement du signal sont au centre de cette recherche, qui comprend la surveillance de l'état des roulements pour différentes conditions de fonctionnement (c.-à-d. Les changements de vitesse).

Le but de la méthode de diagnostic et de prédiction basée sur la surveillance des vibrations des machines tournantes est de fournir des connaissances sur l'état de fonctionnement réel de la machine à tout moment sans arrêter la ligne de production.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] ARTIS - parc d'activités des estuaires - espace du mortier ; consulter le 04/03/2021 ;
- [2] VAGANET magazine ; consulter le 06/03/2021 ;
- [3] Magazine Moteur Et Pneumatiques ;
- [4] Le Garrec ; concepteur et fabricant des systèmes fluides 2021 ;
- [5] Promo soft Informatique ; les objectifs de la maintenance préventive 30 novembre 2014 ;
- [6] Alain Bouleger – Christian Pachaud : analyse vibratoire en Maintenance Surveillance et Diagnostic des machine 2^{ème} édition AFNOR 2003 DUNOD ;
- [7] Cours 5^{ème} génie mécanique, Université de M'sila, 2007.
- [8] Mémoire de master ; thème : utilisation de la gmao pour la planification de la Maintenance préventive ; le10 /06/2018 M'SILA ;
- [9] TPM attitude ; consulter le 13/03/2021 ;
- [10] Cours de : Meca 06- MÉCANIQUE DE VIBRATION ; Université des Frères Mentouri Constantine ; Institut des Sciences et Techniques Appliquées ; DR. DEBBAH YOUNES
- [11] SAOUDI ABOUBAKER - DECHA MOUNIR. « La transformée en ondelettes et L'analyse en enveloppe pour le diagnostic des défauts dans les roulements à bille». mémoire de master de UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA.(2018).
- [12] TAHAR BELKHIR et MED MOHCEN BEN SACI « La maintenance des équipements Par l'analyse vibratoire » mémoire de master de UNIVERSITE KASDI MARBAH OURGLA (2016).
- [13] KHOUALDIA Kaaïs. « Prédiction des modes de défaillances des machines tournantes Par analyses vibratoires ».thèse de doctorat de Université Badji-Mokhtar Annaba(2020).
- [14] HADJADJ AOUL MERIEM AMEL. «Diagnostic De La Combinaison Des Défauts Balourd Et Désalignement Et Evaluation Des Risques». Thèse de Master Université Badji-Mokhtar Annaba(2020).
- [15] SOUHAYB KASS. «Diagnostic vibratoire autonome des roulements». THESE De Doctorat De L'UNIVERSITE DE LYON (2019).
- [16] Maxi cour article ; consulter le 16/05/2021.
- [17] Norme ISO10816-3 ; suivi vibratoire de la machine .

- [18] Alain Boulenger • Christian Pachaud . «Aide-mémoire ; surveillance des machines par Analyse des vibrations» Paris, Dunod, 2009.
- [19] INRS ; Prévention des risques en maintenance Critères à intégrer dès la conception Des machines ; ED 6270 mars 2017.
- [20] DJEBAILI ABDELAZIZ . «Diagnostic des défauts des roulements par L'analyse de vibration». Thèse de Master Université Badji-Mokhtar Annaba(2017).
- [21] Patrick Fayet.pdf ; spécial vibrations partie 1 ; « comment capter les vibrations ».
- [22] Cours de : Dr. BOURAS ABDELKARIM. «Techniques de détection des défaillances». Université Badji-Mokhtar Annaba(2019).
- [23] PT500_04f - V1.1.pdf Manuel d'instruction PT 500.04 Analyseur de vibrationsassisté Par ordinateur (11/2011)
- [24] Benlemdek Imen. Mémoire master « Impact et analyses des caractéristiques Mécaniques Des moteurs d'entraînement en vue d'une prévention efficace» UNIVERSITÉBADJI UNIVERSITE BADJI MOKTAR-ANNABA (2017)
- [25] INRS : Prévention Et Risques Industriels.
- [26] Méthodologie pour l'analyse et la prévention du risque d'accidents technologiques Induits par l'inondation(Natech) d'un site industriel.
- [27] Technique de l'ingénieur : méthode d'analyse des risques.2006
- [28] HAMDAOUI RYM . Mémoire master « Contrôle et diagnostic des défauts des Installations électriques au niveau de l'usine FERTIAL.ANNABA » ; université BADJI UNIVERSITE BADJI MOKTAR-ANNABA (2017)
- [29] NOUREDDINE LAGHZAOUI. « la méthode AMDEC » Université Sidi Mohamed Bno Abdullah Ecole Supérieur De Technologie (2017).
- [30] Essounni maria et Lazaar imane. Projet de Fin d'Etudes. « Application de l'AMDEC Sur la machine « WMT » ».Faculté des Sciences et Techniques de Fès.2013.
- [31] MOKHTARI Yaakoub « Diagnostic des défauts mécaniques du moteur asynchrone Par l'analyse vibratoire ». Thèse de Master Université Mohamed Khi der de Biskra (2019).

