

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du

Diplôme de Master Sciences et Techniques

Spécialité : Génie Mécanique et Productique

Thème :

Maintenance préventive des ventilateurs process par l'analyse vibratoire

Présenté par :

BOUSRHIRI Hafid

Encadré par :

-EL MAJDOUBI Mohammed, Professeur département Génie Mécanique, FST Fès

-HMDIDOUCH Hamid, Encadrant de la société LAFARGE-HOLCIM

Effectué à : LafargeHolcim

Soutenu le : Lundi 12-06-2017

Devant le jury :

• Pr. M.EL MAJDOUBI	Faculté des Sciences et Technique de Fès
• Pr. J. ABOUCHITA	Faculté des Sciences et Technique de Fès
• Pr. I. MOUTAOUAKKIL	Faculté des Sciences et Technique de Fès

Année Universitaire : 2016-2017

Année Universitaire: 2016-2017

Remerciement

Au terme de mon stage effectué à la Société LAFARGEHOLCIM MAROC, j'aimerais remercier vivement la société qui m'a accueilli, ainsi que Mr. HAMID HMIDOUCH responsable de service de maintenance mécanique, de m'avoir confié ce travail, de m'avoir encadré pendant les quatre mois de stage et pour l'aide efficace qu'il nous a apportée à l'élaboration de ce projet, j'ai ainsi bénéficié de son expérience.

Nous tenons également à remercier tout le personnel du service maintenance, Je m'adresse également mes remerciements à tous les opérateurs pour leur accueil.

Je remercie profondément à mon encadrant à la FSTF Mr. EL MAJDOUBI Mohammed pour sa disponibilité et sa contribution efficace et son orientation très utile pour la réussite de mon projet.

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants de la FSTF qui ont contribué à ma formation pendant ces Cinq années et particulièrement aux enseignants du département du Génie Mécanique.

Dédicace

- ☞ A mes chers parents en reconnaissance de leurs efforts et encouragement pendant toute la période de mes études.
- ☞ A mon encadrant Mr. HMIDOUCH HAMID et tout Personnel de la société LAFARGEHOLCIM.
- ☞ A mon encadrant Mr. EL MAJDOUBI Mohammed, je le remercie énormément leur aide précieux et leur conseils avisés.
- ☞ A tous mes amis, qui m'a beaucoup aidé pour réaliser mon thème de stage. Merci pour les instants inoubliables que nous avons partagés ensemble.
- ☞ A toute ma grande famille ; Merci pour l'intérêt que vous portez pour moi ; A tous ceux qui m'aiment...

Résumé

Cette étude est consacrée à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire, domaine d'activité qui constitue une part de plus en plus importante des dispositions permettant de rentabiliser l'instrument de production industriel. Elle propose une méthodologie expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire des défauts des machines tournantes.

L'augmentation des vibrations permet de détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques des vibrations de la machine permet d'en identifier la cause.

Dans notre travail, nous appliquons une méthodologie de l'analyse vibratoire en maintenance préventive en utilisant les méthodes de suivi et de diagnostic des défauts des ventilateurs par l'analyse au niveau global et l'analyse spectrale. D'après l'étude expérimentale appliquée au niveau de l'entreprise LAFARGEHOLCIM les résultats ont montré que les ventilateurs étudiés présentent des anomalies.

Ainsi nous terminons notre étude par une analyse AMDEC sur le travail présenté sur ce mémoire.

Sommaire :

Remerciement.....	2
Dédicace	3
Résumé	4
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
Chapitre 1	14
Présentation de l'organisme d'accueil.....	14
1. Présentation de Holcim-Maroc.....	15
1.1 Industrie du ciment au Maroc	15
1.2 Historique de Holcim Maroc.....	16
1.3 La fusion Lafarge-Holcim :	17
1.4 Classement mondial :	17
1.5 Holcim Fès	17
1 L'organigramme de Holcim Fès	19
Chapitre 2	20
Processus de fabrication du ciment	20
1. LE CIMENT.....	20
1.1 Définition	20
1.2 . Les matières premières du ciment	21
2. LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT	21
2.1. Extraction.....	22
2.2 Concassage	23
2.3. Pré-homogénéisation	23
2.4. Broyage et homogénéisation de la farine crue	23
2.4.1. Dosage cru.....	23
2.4.2. Broyage cru	23
2.4.3 Dépoussiérage	23
2.4.4. Homogénéisation	23
2.5. Production et stockage du clinker	23
2.5.1 La tour de préchauffage	24
2.5.2. Le four rotatif	25

2.5.3. Le refroidisseur à clinker	25
2.6. Broyage du ciment	26
2.7. Ensachage et expédition du ciment	26
2.7.1 Ensachage.....	26
2.7.2. Expédition	27
4.2. CPJ 45 : Ciment Portland composé avec Ajouts.....	28
Chapitre 3 :	29
Concepts et définition de la maintenance	29
I. Introduction :	29
1. Définition :	30
1.1 La fonction maintenance :	30
1.2 Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance :	30
1.3 Les différents types de maintenance :	31
1.3.1 -La maintenance corrective :	31
1.3.2 Maintenance palliative :	31
1.3.3 Maintenance curative :	31
1.3.4 La maintenance préventive :	32
a. Maintenance préventive systématique (périodique) :	32
b. Maintenance préventive conditionnelle :	33
i. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle :	33
ii. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle :	34
II. Conclusion :	34
Présentation de l'analyse vibratoire	34
I. Introduction :	34
1. L'analyse vibratoire :	35
a) L'analyse vibratoire en tant qu'outil de diagnostic :	35
b) Les applications industrielles :	35
2. Vibration :	36

A.	Origine des vibrations :	37
B.	Nature des vibrations :	37
➤	Les vibrations périodiques :	37
➤	Les vibrations transitoires	38
➤	Les vibrations aléatoires :	38
C.	Caractérisation d'une vibration :	39
➤	La fréquence :	39
➤	Exemple :	40
➤	L'amplitude :	40
D.	Grandeurs physiques caractérisant une vibration.....	41
E.	Critères de sélection des trois grandeurs.....	42
2.1	Choix du mode d'investigation.....	43
2.1.1	Mesure du niveau global :	43
2.1.2	Analyse spectrale :	44
3.	Les capteurs de vibration :	44
3.1	Types et caractéristiques des capteurs :	44
i.	Les proximètres :	45
ii.	Vélocimètres :	46
iii.	Les accéléromètres :	46
a.	Principe :	46
b.	Réponse d'un accéléromètre :	47
3.2	Choix de l'emplacement de capteurs :	48
3.2.1	Emplacement :	48
3.2.2	Consignes pour la fixation des capteurs :	49
3.2.3	Modes de fixation :	49
4.	ETUDE DES PRINCIPAUX DEFAUTS	50
4.1	Déséquilibre : défaut de balourd.....	51
4.1.1	Définition :	51

➤ Balourds statique et dynamique :	51
4.2 Défaut d'alignement.....	52
4.1 Définition	52
i. Désalignement d'arbres accouplés.....	52
i. Désalignement des paliers.....	52
4.3 Défauts de serrage	53
4.4 Défauts de transmission par courroies	53
4.4.1 Prise de mesure	54
i. Signature vibratoire.....	54
II. Conclusion	54
Chapitre 4:	55
Analyse vibratoire des ventilateurs	55
I. Introduction :	56
1. Démarche utilisée :	56
1.1 Etape 1 :	57
1.1.1. Définir.	57
➤ Définition générale de ventilateur :.....	57
➤ Utilisation.....	57
➤ Sens général de l'écoulement d'aire :	58
➤ Conception d'un model en CATIA :.....	61
1.1.2. Présentation de l'appareil.....	62
➤ Surveillance de la machine :	62
➤ Caractéristiques :.....	62
1.1.3. Capteur de Vibration Utilisé (accéléromètre)	63
1.2 Etape 2 :	64
1.2.1 Mesurer.	64
➤ Objectif :	64
➤ Principe de fonctionnements des ventilateurs DOPOL :	64

➤	Principe de fonctionnements des ventilateurs BK4 :	65
A.	Point de mesure :	65
B.	Les caractéristiques techniques des ventilateurs DOPOL et BK4.	65
C.	Suivi d'état des ventilateurs :	66
1.2.2	Etude de cas du ventilateur 525.	68
A.	Les caractéristiques techniques du ventilateur 525	68
1.3	Etape 3 :	71
1.3.1	Analyser :	71
➤	Dans cette étape on va analyser les résultats de ventilateur 525 :	71
i.	l'analyse en niveau global : (Paliers : Moteur et poulies de transmission).....	71
ii.	Pour avoir plus de détails nous passons à l'analyse spectrale :	71
iii.	Interprétation :	71
iv.	Proposition et actions préconisées :	72
A.	Analyse en Niveau Global (Paliers arbre d'entraînement ventilateur) :	73
B.	Analyse des Spectres relevés sur le palier ventilateur.	73
1.4	Etape 4.....	75
1.4.1	Innover ou Améliorer et Contrôler:	75
➤	Équilibrage :	75
➤	Maintenance préventive :	75
Chapitre 5	76
ETUDE AMDEC	76
1.	Définition de l'AMDEC.....	76
2.	Type d'AMDEC.....	76
3.	Analyse de défaillance	77
4.	Evaluation	77
5.	Démarche pratique de l'AMDEC :	79
6.	APPLICATION :	79
6.1	Etude du système ventilateur :	79

6.1.1	Description :	79
6.1.2	Décomposition fonctionnelle :	80
6.1.3	Identification des modes de défaillances :	80
6.1.4	Recherche des causes	80
6.1.5	Tableau d'analyse AMDEC :	81
6.1.6	Synthèse	87
7.	Diagramme d'Ishikawa	87
CONCLUSION GÉNÉRALE		88
	Bibliographie	89

Liste des figures

Figure 1:Cimenterie de Fès Ras El Ma.....	18
Figure 2:Organigramme de l'usine Holcim-Fès Ras El Ma	19
Figure 3:Les composants du ciment	21
Figure 4:Processus de fabrication du ciment	22
Figure 5:Carrière de la cimenterie Ras El Ma	22
Figure 6:Tour de préchauffage de la cimenterie de Fès.....	24
Figure 7: Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès	26
Figure 8:Broyeur du coke de pétrole de la cimenterie de Fès	27
Figure 9 : L'organigramme des différents types de maintenance.....	31
Figure 10: Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement.	32
Figure 11:Décomposition d'un signal aléatoire.....	39
Figure 12 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c).....	41
Figure 13 : Grandeurs physiques caractérisant une vibration	42
Figure 14:Représentation spectrale ou fréquentielle d'un signal.	44
Figure 15:proximètre monté sur un palier.	45
Figure 16:proximètres et leur driver	45
Figure 17:schéma de principe d'un vélocimètre.	46
Figure 18:schéma de principe d'un accéléromètre.....	47
Figure 19:courbe de réponse d'un accéléromètre	47
Figure 20: Fixation du capteur sur palier.....	48
Figure 21:Choix directionnel pour la prise de mesure.	48
Figure 22:direction favorisée pour transmission par poulies courroies.....	48
Figure 23: Choix de l'emplacement du capteur.	49
Figure 24: les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes.....	49
Figure 25:l'emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement.	49
Figure 26:réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation.....	50
Figure 27:principaux défauts de balourd.....	50
Figure 28:défaut de balourd.....	51
Figure 29:Défauts d'alignement d'arbres.....	52
Figure 30:Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.	52
Figure 31:défaut d'usure d'accouplement.	53
Figure 32:Défaut de courroie.	53
Figure 33:direction de mesure favorisée pour transmission par poulies courroies.	54
Figure 34:Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroies.....	54
Figure 35:types des ventilateurs.	57
Figure 36:sens générale de l'écoulement d'air.....	58
Figure 37:conception d'un module de ventilateur en CATIA.	61
Figure 38 :le SKF Machine Condition Advisor.....	62
Figure 39:les différents paramètres de l'appareil.	62
Figure 40:capteur de vibration utilisé.	63

Figure 41:ventilateurs DOPOL.	64
Figure 42:ventilateur BK4.	65
Figure 43: point de mesure pour un ventilateur.	66
Figure 44:Critères vibratoires de sécurité selon la norme "ISO10816".....	68
Figure 45 : Schéma synoptique du ventilateur 525.....	69
Figure 46:Spectre du palier moteur.	71
Figure 47:Spectre au point 4RH.....	72
Figure 48:Spectre de palier arbre ventilateur.	74
Figure 49 : schéma ventilateur.	79
Figure 50:diagramme d'Ishikawa.	88

Liste des tableaux

Tableau 1:Composition chimique du CPJ 35.....	27
Tableau 2:Composition chimique du CPJ 45.....	28
Tableau 3:Composition chimique du CPA 55.....	28
Tableau 4 :Différents types de vibrations :	39
Tableau 5;Les types des ventilateurs et leurs rendements.....	59
Tableau 6:suivi des vibrations de ventilateur DOPOL 1.	66
Tableau 7: suivi des vibrations de ventilateur DOPOL 2.	67
Tableau 8:suivi de vibration de ventilateur BK4.....	67
Tableau 9:caractéristique technique du ventilateur 525.....	68
Tableau 10:Fréquences du ventilateur et moteur.....	70
Tableau 11:Présentation des résultats de mesures effectuées.	71
Tableau 12 : Présentation des résultats de mesures effectuées.....	73
Tableau 13:Grille de l'échelle de gravité.	78
Tableau 14 : Grille de l'échelle de fréquence.	78
Tableau 15 : Grille de l'échelle de non détection.....	78
Tableau 16:Tableau des actions correctives.....	87

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'activité de maintenance des installations industrielles fait appel depuis une vingtaine d'années à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance. Parmi celles-ci on peut citer la thermographie infrarouge, pour la détection de défauts d'origine électrique ou mécanique, l'analyse des huiles pour le suivi de dégradation et la contamination des fluides hydrauliques ainsi que l'évaluation du stade d'usure des pièces mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécanique.

La maintenance joue un rôle très important dans le domaine industriel, la plus part des industries appliquent la politique de maintenance pour réduire ou éliminer les réparations inutiles, empêcher les pannes des installations industrielles et minimiser l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises.

La maintenance préventive conditionnelle est la plus utilisable dans les différents organismes industriels car sa surveillance et son suivi ne nécessitent pas l'arrêt de production. Généralement la machine tournante en opération génère des efforts qui causent par fois la défaillance des éléments de la machine. Pour réaliser un bon diagnostic, il faut choisir l'outil de la maintenance préventive conditionnelle tel que l'analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographies, etc

Parmi les outils de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des Techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. La finalité de ce type de surveillance est destinée à assurer la sécurité de l'installation en évitant des Dégradations importantes par le déclenchement d'alarmes, lorsque le niveau des vibrations Atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette Dernière. Il existe différentes techniques d'investigations utilisées dans le domaine du suivi vibratoire des machines tournantes.

Chapitre 1

Présentation de l'organisme d'accueil

1. Présentation de Holcim-Maroc

1.1 Industrie du ciment au Maroc

L'industrie cimentière est l'une des activités industrielles la plus structurée et la mieux répartie sur le territoire national. Elle réalise en moyenne 46 % de la production et 50 % de la valeur ajoutée du secteur « matériaux de construction ».

Le marché national est réparti entre les différents acteurs, avec une prédominance de LAFARGE dans le nord-est, CIMENT DU MAROC dans le sud et HOLCIM dans le nord-est.

Les années 90 ont constitué pour cette industrie, une période de restructuration, de développement et d'investissement. Les progrès réalisés ont permis au Maroc, d'une part, de rompre avec l'importation du ciment et d'autre part, de promouvoir à partir de 1994, l'exportation du clinker et du ciment.

Holcim est l'un des plus grands producteurs mondiaux du ciment. Le siège central se trouve à Zurich. Son ancien nom était Holderbank.

Holcim a été fondée en 1912 sous le nom de « financière Glaris » dans le village d'Holderbank du canton d'Argovie. C'est un groupe suisse leader dans les produits de matériaux de construction pour un usage varié, présent dans plus de 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats et du béton. Il compte plus de 90 000 employés à travers le monde.

Holcim Maroc est un groupe cimentier national présent dans différentes régions du pays et dispose d'une capacité de production de 4,5 millions de tonnes. Parmi ses activités :

- **Ciment** : Trois cimenteries (Oujda, Settât, Fès), un centre de broyage, d'ensachage et de distribution (Nador) et un centre d'ensachage et de distribution (Casablanca).
- **Béton** : Avec 9 centrales (Fès, Nador, 2 à Rabat, 2 à Tanger et 3 à Casablanca).
- **Granulat** : Une carrière dans la région de Benslimane.
- **Ecoval** : Plateforme de prétraitement des déchets dans la région d'El Gara à 40 Km de Casablanca.
- **Batipro distribution** : Premier réseau de distribution de matériaux de construction au Maroc initié par Holcim Maroc.
- **Mateen** : Société de promotion immobilière lancée en 2007 par Holcim Maroc et deux opérateurs immobiliers marocain et français.

1.2 Historique de Holcim Maroc

1972	Les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la SNMC, organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.
1980	Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 tonnes par an.
1985	Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.
1989	Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
1990	Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et lancement de l'activité BPE avec l'installation d'une première centrale à béton à Fès.
1993	Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an. Prise de contrôle majoritaire du capital de la CIOR par Holcim Ltd dans le cadre du programme de privatisation.
1997	Installation d'une centrale à béton à Rabat et d'une autre à Casablanca.
2001	Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.
2004	Extension de la cimenterie de Fès.
2005	Démarrage du centre d'ensachage et de distribution de Settat.
2006	Extension du centre de Nador.
2007	Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval.
2008	Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.
2010	Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.
2012	Doublement de la capacité de production clinker de l'usine de Fès
2014	Accord de fusion Lafarge-Holcim.

1.3. La fusion Lafarge-Holcim :

Le 7 Avril 2014, Holcim et Lafarge (groupe français de matériaux de construction) ont annoncé leur intention de procéder au rapprochement des deux sociétés dans le cadre d'une fusion qui par la suite est officiellement lancée le 15 juillet 2015 sous le nom de LafargeHolcim.

Suite à la fusion, le groupe LafargeHolcim deviendra un leader mondial avec une forte présence dans toutes les régions et les principaux pays du monde, au service des besoins des clients. Le groupe deviendra un partenaire privilégié dans le secteur du bâtiment et des infrastructures, à l'écoute des consommateurs tout le long de la chaîne logistique.

Pour réaliser son ambition stratégique, le groupe combiné a identifié trois éléments fondamentaux : les personnes, l'intégrité ainsi que la santé et la sécurité.

Suite à la fusion, le groupe bénéficiera d'un portefeuille large et diversifié de produits et services de matériaux de construction répondant aux principaux besoins tant dans les marchés émergents que dans les marchés développés. Ce portefeuille, ajouté à la large implantation géographique de LafargeHolcim, sa forte capacité d'innovation, son approche centrée sur le client et l'étendue de son activité, place le groupe dans une position favorable pour une croissance rentable.

1.4. Classement mondial :

Holcim Fès est une usine très performante, c'est pour cela, elle a été nommée <<**BEST PERFORMER**>> pour l'année 2014 et a été classée par conséquent la deuxième au monde sur 77 usines.

L'usine a abouti à ce classement sur la base de trois volets fondamentaux :

- L'efficacité : l'efficacité de la production, MTBF, la consommation de l'énergie thermique et la consommation de l'énergie électrique.
- La durabilité : la protection de l'environnement, la gestion des matières premières, la qualité des produits, les dépenses d'investissement.
- Le coût : le coût de la production, les frais de la maintenance, le coût de l'énergie thermique, le coût de l'énergie électrique.

1.5 Holcim Fès



Figure 1: Cimenterie de Fès Ras El Ma

La cimenterie de Fès est située dans la localité de Ras El Ma à 25 km de l'ouest de la ville de Fès sur un terrain en propriété de la CIOR et à 340 km du port de Nador à partir duquel elle est alimentée en coke de pétrole.

L'usine est également raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

Depuis 1996, l'usine de Fès Ras El Ma produit et commercialise différentes qualités de ciment.

L'usine de Fès, d'une capacité annuelle de broyage ciment de 1 000 000 de tonnes de ciment, utilise le procédé de fabrication à voix sèche intégrale. Le four, principal équipement de la cimenterie, a été mis en service en 1993. La cimenterie comporte des ateliers de concassage, broyage, homogénéisation et stockage de la farine, cuisson et stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment et ensachage expédition du ciment

A l'issue de la fermeture du centre de Doukkarat en 2004, et dans la perspective d'évoluer au même rythme que celui du volume du marché de la région du centre nord, Holcim Maroc a lancé un projet d'extension de grande envergure, d'un montant dépassant les 320 millions de Dirhams.

Un nouveau broyeur à ciment vertical, technologie à ce jour unique au Maroc, a porté la capacité de la cimenterie de Ras El Ma de 600 000 à 1 million de tonnes de ciment par an.

L'investissement comporte aussi :

- La construction d'un tronçon de route de 7km pour relier la cimenterie à la ville de Fès.
- La réalisation, en partenariat avec l'ONCF, d'un tronçon de voie ferrée pour desservir la cimenterie.
- L'embellissement de la cimenterie suivant un concept d'architecture industrielle.
- L'aménagement de l'entrée de la cimenterie afin de garantir sécurité et bien-être aux chauffeurs et aux visiteurs.

1 L'organigramme de Holcim Fès

L'organigramme de la cimenterie de Fès Ras El Ma se présente sous la forme de la figure 3 :

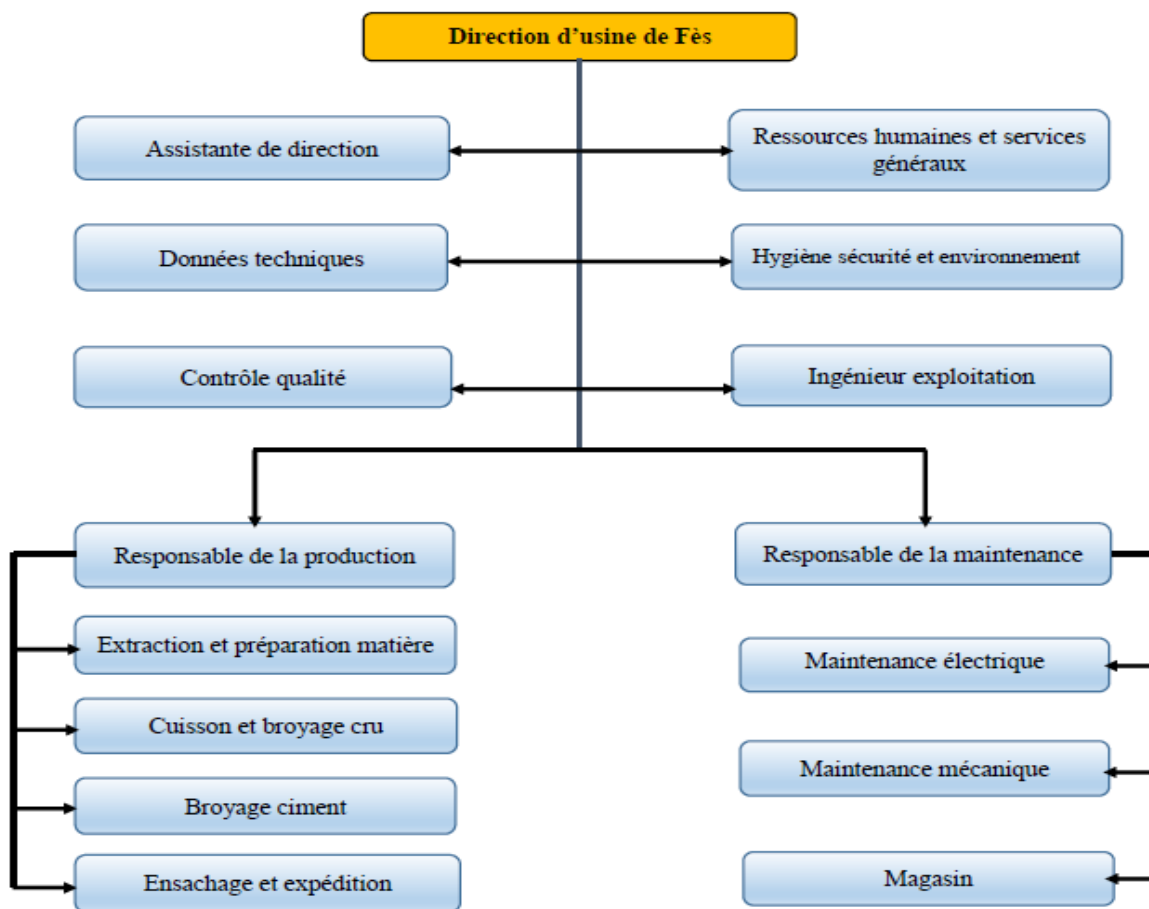


Figure 2: Organigramme de l'usine Holcim-Fès Ras El Ma

Chapitre 2

Processus de fabrication du ciment

1. LE CIMENT

1.1 Définition

Selon la norme NF P 15-301 de 1994, le ciment se définit comme suit :

<< Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. >>

1.2 . Les matières premières du ciment

L'usine de Holcim s'est installée à Ras El Ma en raison de la richesse de cette région en calcaire. Les matières premières (Figure 3) qui rentrent dans la fabrication du ciment sont presque toutes des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport, et sont essentiellement composées de calcaire et d'argile ou de toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), de l'oxyde ferrique (Fe₂O₃), la pouzzolane (matière volcanique) et les matières de correction (le sable et les minerais de fer).



Figure 3: Les composants du ciment

2. LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

La fabrication du ciment est un procédé complexe qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 °C des mélanges de calcaire, d'Argile et minerai de fer. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers.

Ce clinker constitue la matière première du ciment, pour y aboutir il faut broyer le clinker avec un peu de gypse selon le type de ciment souhaité, le ciment, produit et stocké dans des silos, passe à la dernière étape de fabrication, il s'agit de l'ensachage avant d'être expédié dans des sacs ou en vrac selon le besoin du client.

La production du ciment s'opère selon un processus en six étapes :

- Extraction des matières premières.
- Concassage et pré-homogénéisation des matières crues.
- Broyage et homogénéisation de la farine crue.
- Production du clinker.
- Broyage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

Le schéma de la figure 4 résume le processus de fabrication du ciment de la carrière à l'expédition :

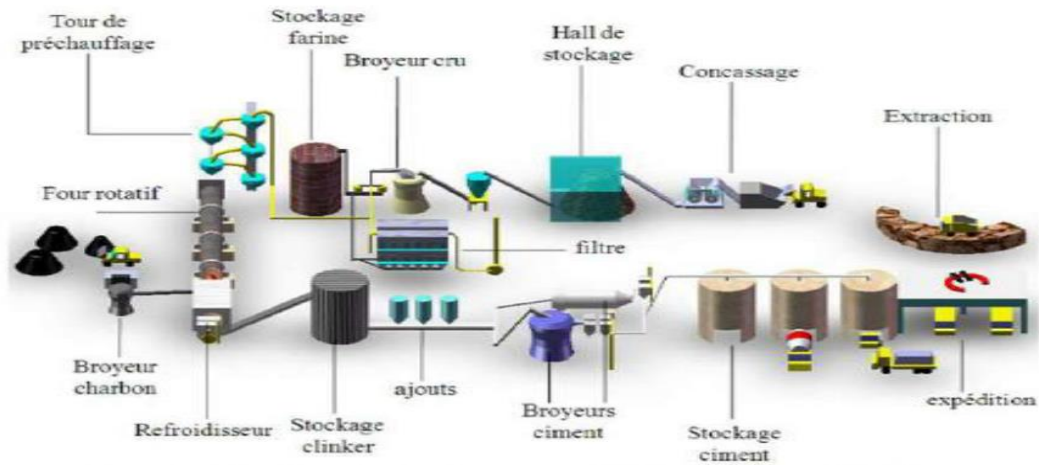


Figure 4: Processus de fabrication du ciment

2.1.Extraction

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières qui subissent des transformations pour fabriquer le produit fini, le ciment est alors fabriqué à partir de quatre composantes chimiques principales : carbonates de calcium, alumine, silice et oxyde de fer.

Ces éléments se trouvent généralement dans la nature sous forme de calcaire, d'argile, de schiste, de minerai de fer et de sable.

Constituant la matière première principale, le calcaire, l'argile et le schiste sont extraites dans des carrières situées dans les régions de l'usine (Figure 5). Le minerai de fer et le sable,

sont des matières de correction, elles sont exploitées dans des carrières relativement éloignées de l'usine ou livrées par des fournisseurs.



Figure 5: Carrière de la cimenterie Ras El Ma

Afin d'extraire la matière première, l'abattage à l'explosif est aujourd'hui la technique la plus simple et la plus répandue dans les carrières de roche massives. Elle permet de fragmenter des volumes importants de roche pour la reprise et le traitement du matériel abattu.

2.2 Concassage

Le concasseur a pour rôle d'optimiser et de faciliter le stockage et la manutention des matières premières, les blocs extraits (calcaire et argile) au niveau de la carrière sont introduits dans un concasseur pour réduire leurs dimensions de 1.3 m jusqu'à 80 mm à la sortie. Les concasseurs utilisés dans les usines de Holcim (Maroc) sont à impact à battoirs ou marteaux. Ce type de concasseur est adapté aux caractéristiques initiales et finales des matières à concasser.

2.3. Pré-homogénéisation

La pré-homogénéisation est une opération qui a pour but d'avoir un mélange avec une composition chimique régulière des matières premières.

Les matières extraites de carrière (calcaire et argile), puis concassées doivent donc être soigneusement mélangées (pré-homogénéisées). Pour cela, elles sont mises en dépôt au moyen d'un stacker qui permet de mettre ces matières dans la bonne proportion, par couches successives, ce qui donne un lit (tas) de pré-homogénéisation.

Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les modifications par les correcteurs nécessaires à apporter au mélange des matières premières.

2.4. Broyage et homogénéisation de la farine crue

2.4.1. Dosage cru

Cette étape a pour but de déterminer et de réaliser un pré dosage des quatre constituants de base du clinker. Pour cela, il existe quatre trémies assurant le stockage des matières premières.

2.4.2. Broyage cru

Le broyage des matières est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine.

À l'intérieur du broyeur cru, la matière subit des actions mécaniques par quatre galets qui écrasent les morceaux sur une assiette pour l'obtention de la farine, et les particules trop lourdes retombent sous plateau de broyage dans un élévateur à godets qui les recyclent dans le broyeur, les particules fines entraînées par le flux de gaz sont dirigées vers le séparateur monté sur le broyeur.

2.4.3 Dépoussiérage

Une fois la matière broyée, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela on dispose de filtres à manches qui libèrent la matière des gaz, cette opération de dépoussiérage s'effectue avec un rendement de 99,8%. En outre, cette opération est presque utilisée dans toutes les unités de production.

2.4.4. Homogénéisation

La farine produite est transportée à travers des aéroglesseurs vers un silo de stockage dont le rôle est d'homogénéiser la farine. Ce silo dont la capacité de stockage est de 6000 t est équipé d'un système de fluidisation.

2.5. Production et stockage du clinker

Le clinker est un produit artificiel obtenu par la cuisson de la farine crue dans un four rotatif. La production du clinker se fait en quatre étapes :

- 1- Le séchage et le préchauffage de la farine crue.
- 2- La décarbonatation partielle de la farine crue.
- 3- La clinkérisation.
- 4- Le refroidissement du clinker.

La ligne de cuisson comprend trois éléments :

- Une tour de préchauffage à cinq étages (Figure 6), ce nombre peut augmenter dans le cas d'augmentation de la capacité de production.
- Un four rotatif.
- Un refroidisseur à grilles.

2.5.1 La tour de préchauffage

Les gaz chauds formés dans le four sont tirés par un ventilateur et circulant à grande vitesse dans les cyclones de la tour échangeur. La farine est injectée à la partie supérieure et descend par gravité dans les cyclones successifs pour pénétrer ensuite dans un précalcinateur qui contient les gaz de combustion du coke de pétrole issus des deux brûleurs situés à la partie inférieure de la tour. Ensuite la matière entre dans la boîte à fumée décarbonatée de 85 à 90%. L'échange thermique au sein de la tour s'accompagne des effets suivants :

- Evaporation de l'eau libre ;
- Dégagement de l'eau de constitution des argiles ;
- Décarbonatation partielle de la farine ;

Un système de canons à air est installé dans des différents points du préchauffeur afin d'éviter le

colmata
ge des
dépôts
éventuel
s de la
matière,
voir
Figure
6.



Figure 6: Tour de préchauffage de la cimenterie de Fès

2.5.2. Le four rotatif

Le four est un réacteur en forme de tube rotatif incliné de 3%. Le chauffage est assuré par une flamme au charbon installé à l'autre extrémité du four. La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée à 90%, poursuit son parcours dans le four et y entre à 1000°C environ, est chauffée jusqu'à la température de frittage ou clinkérisation de 1450 °C. Dès lors les minéraux qu'elle contient, réagissent pour donner des nouvelles combinaisons minéralogiques principalement des silicates et des aluminates de calcium : le clinker.

On distingue trois zones au sein du four :

- 1) La zone de décarbonatation (appelée aussi zone de transition) : c'est la zone à l'entrée du four, qui correspond à la phase de déshydratation de la farine crue, c'est à ce niveau qu'il y a passage de la farine de son état liquide à l'état solide.
- 2) La zone de cuisson : c'est la zone la plus importante et la plus chaude du four. En effet, la température de cette zone peut dépasser 1500 °C, ce qui permet la combinaison de $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ (ou C2S) avec la chaux libre pour donner les cristaux de $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ (C3S).
- 3) La zone de clinkérisation : les cristaux issus de la zone de cuisson poursuivent leur chemin et grossissent et granulent, formant ainsi du clinker. La chaleur nécessaire pour la réalisation de ces réactions est assurée par la combustion du coke de pétrole. La rotation et l'inclinaison du four permettent la progression de la matière.

2.5.3. Le refroidisseur à clinker

Le clinker sortant du four passe sur la grille vibrante du refroidisseur où il est trempé rapidement par l'air froid soufflé par le bas de la grille.

Ce processus permet la récupération de la chaleur du clinker. L'air chaud généré est réintroduit dans le four pour aider à la combustion. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. Il existe plusieurs types de refroidisseurs : refroidisseurs à grilles, utilisé dans l'usine Ras El MA, refroidisseurs rotatifs, refroidisseurs planétaires, ...

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté jusqu'au hangar du stockage.

2.6. Broyage du ciment

À la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5 à 40 mm environ, ce dernier et les ajouts (gypse et pouzzolane) sont introduits au niveau d'un broyeur vertical à galets (Figure 8), dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment dont la finesse évolue de 2800 à 4000 cm²/g.



Figure 7: Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès

Le dosage du clinker et des ajouts se fait à l'entrée du broyeur par un système de dosage automatique.

Les caractéristiques des différentes lignes de gamme de ciment obtenues sont conformes aux normes marocaines de production du ciment. Cette conformité est assurée grâce à des dosages mesurés et des tests de laboratoire effectués tout au long du processus de production.

2.7. Ensachage et expédition du ciment

Le ciment produit est stocké dans des silos pour alimenter par la suite les ateliers d'ensachage pour les livraisons en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en vrac.

2.7.1 Ensachage

L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de suppresseurs au niveau des silos de stockage. Le ciment est ensuite transporté par des aéroglistisseurs et des élévateurs à godets puis

passé dans des cribles pour l'élimination des corps étrangers. L'installation d'ensachage a été rénovée récemment et comporte trois ensacheuses automatiques.

2.7.2. Expédition

L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50 Kg et en vrac soit par route soit par voie ferrée. Le chargement du ciment en vrac par camion ou wagons citernes se fait directement à partir des silos de stockage.

L'usine de Holcim Fès possède en plus des équipements cités ci-dessus, d'un broyeur de coke de pétrole qui réduit la dimension des blocs du combustible.

C'est un broyeur à boulets (Figure 8), dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Des boulets sont placés avec le produit dans un tambour rotatif. Le broyage résulte du frottement et du choc créés par la chute des boulets contre le combustible et par la collision des particules entre elles. L'intensité du broyage dépend principalement du régime du tambour, de la taille et de la matière des boulets ainsi que la durée du séjour du combustible dans le broyeur.

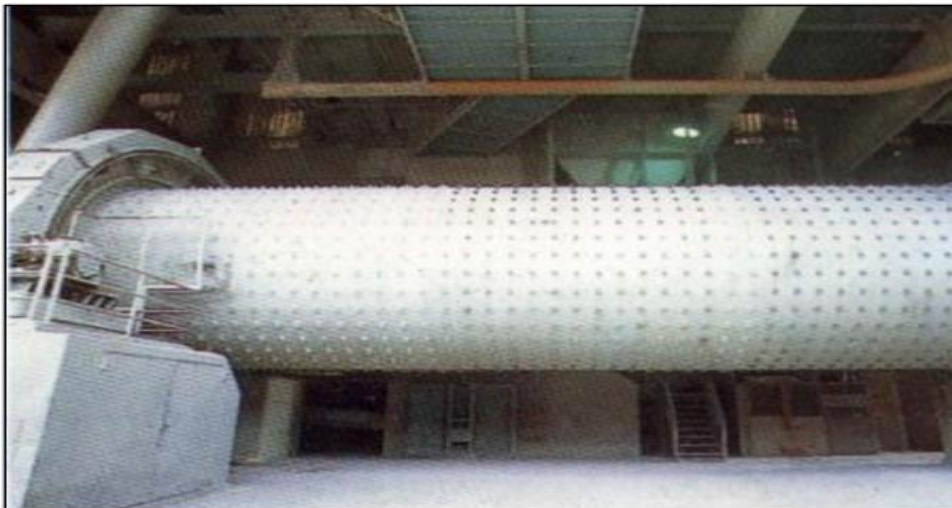


Figure 8: Broyeur du coke de pétrole de la cimenterie de Fès

3. LES TYPES DE CIMENT FABRIQUÉS

HOLCIM commercialise un produit semi-fini (clinker) et une gamme de trois types de ciments qui diffèrent par leur résistance à la compression :

4.1. CPJ 35 : Ciment Portland composé avec Ajouts

Le CPJ 35 est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le clinker et le gypse. La classe de résistance du CPJ 35 en fait un produit particulièrement adapté à la fabrication des enduits pour la maçonnerie, ainsi que les bétons non armés peu sollicités et à résistances mécaniques peu élevées. Le CPJ 35 est également utilisé dans le domaine routier pour la stabilisation des sols et des couches des chaussées.

La composition chimique du ciment CPJ 35 est la suivante (Tableau 1) :

Tableau 1: Composition chimique du CPJ 35

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
%	13.6	3.67	2.45	64.99	1.15	0.57	2.98

4.2.CPJ 45 : Ciment Portland composé avec Ajouts

Le ciment CPJ 45 est un ciment portland dont les constituants principaux sont le clinker, le gypse, la pouzzolane et les cendres volantes (Tableau 2). La classe de résistance de 45 MPa lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistance mécaniques élevées. Les résistances élevées à jeune âge du CPJ 45 permettent d'obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

Tableau 2:Composition chimique du CPJ 45

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
%	22.31	6.76	4.61	52.57	2.78	0.82	3.01

4-3- CPA 55 : Ciment Portland Artificiel

Le ciment CPJ 55 est un ciment portland artificiel composé de clinker, gypse et pouzzolane (Tableau 3).

La résistance de 55 MPa et les résistances élevées à jeune âge du CPJ 55 lui confèrent l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités. Le CPJ 55 est adapté aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

Tableau 3:Composition chimique du CPA 55

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃
%	13.85	5.56	3.44	59.05	1.87	0.69	3.21

Holcim produit, en plus, des types cités ci-dessus deux autres types de ciment, il s'agit de :

- CPJ 55.
- CPJ 65.

Ces derniers se caractérisent par une grande résistance et sont utilisés pour la construction des barrages. Ils sont fabriqués sur commande sinon il y aura des stocks inutiles.

Chapitre 3 :

Concepts et définition de la maintenance

I. Introduction :

Une entreprise doit exploiter ces équipements d'une manière efficace dans le but d'améliorer la qualité et le coût du produit et augmenter aussi la production. Une bonne gestion de la maintenance des équipements est le meilleur moyen qui permet d'atteindre cet objectif en prenant en considération les aspects techniques, économiques et financiers des différentes méthodes utilisées. L'objectif principal de la maintenance est de réduire au minimum la défaillance des équipements pour éviter les arrêts de production. L'augmentation de la fiabilité des équipements et la maîtrise des défaillances et des pannes dépend du développement de la maintenance préventive.

1. Définition :

La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifique ou en mesure d'assurer un service déterminé. Maintenir c'est donc effectuer des opérations : dépannage, graissage, visite, réparations. Des opérations, qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global Optimal.

La maintenance doit bénéficier de la meilleure organisation possible pour réduire ces coûts. Cette condition est de plus en plus nécessaire compte tenu : des évolutions technologiques des moyens de production vers plus d'automatisation, des impératifs de cadence de la production, de la recherche constante de l'amélioration de la qualité, Les méthodes prévisionnelles de maintenance appliquées à des matériels de haute production Coûtent moins cher que les pertes de production dues à l'arrêt de ces matériels. Les actions de maintenance, elles sont déclenchées en fonction d'événements, de situations et d'états à des instants : prévus par un échéancier, prédéterminés suivant l'état constaté du matériel à la Suite d'une visite, imprévus résultant d'une défaillance.

1.1 La fonction maintenance :

La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production; c'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période donnée. Autrement dit, la mission principale de la maintenance est la gestion optimisée des équipements de production en fonction des objectifs propres à l'entreprise.

1.2 Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance :

Méthode : La préparation est la vocation première des services méthodes. Pour la maintenance corrective, la préparation passe par l'anticipation des risques encourus, puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant. Pour la maintenance préventive, elle consiste à définir le plan de maintenance d'un équipement, puis à évaluer son coût et son efficacité afin de les optimiser.

D'autres activités sont généralement confiées au service méthode :

- Propositions d'améliorations techniques et/ou organisationnelles.
- Assistance technique sur site - soutien aux intervenants sur site - aide au diagnostic. les agents méthodes doivent être en phase avec le terrain et doivent également prendre du recul par rapport à l'évènement instantané, qui était seul pris en compte au temps de l'entretien.

Ordonnancement : La fonction ordonnancement est le chef d'orchestre de la maintenance Elle a la responsabilité de la synchronisation des actions de maintenance. Les missions principales de l'ordonnancement sont la planification des travaux l'optimisation des moyens en fonction des délais et chemins critiques, et le contrôle de l'avancement des travaux.

Réalisation des interventions : La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les Procédures imposées, dans les délais préconisés, pour réaliser dans les règles de l'art, une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié. La réalisation peut nécessiter un diagnostic c'est-à-dire identifier et caractériser la défaillance.

1.3 Les différents types de maintenance :

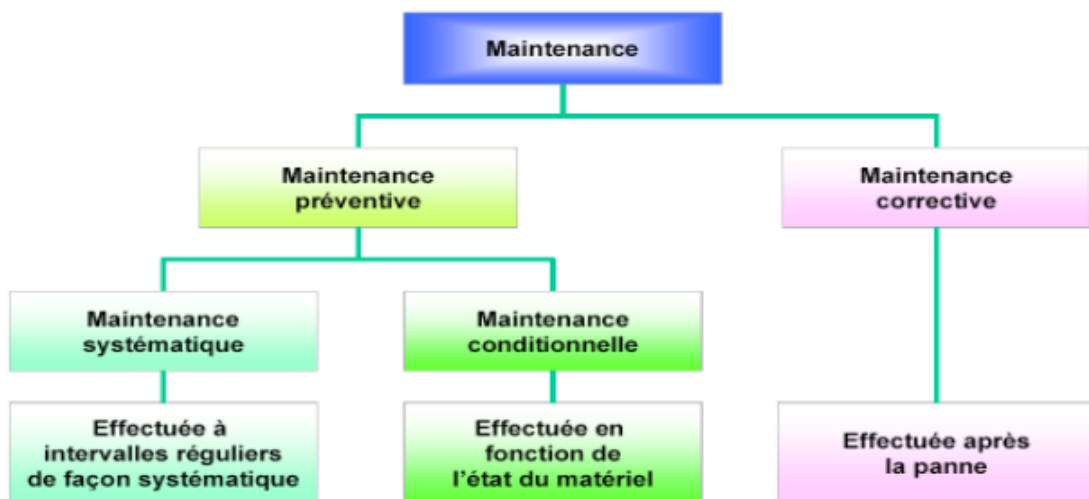


Figure 9 : L'organigramme des différents types de maintenance.

1.3.1 -La maintenance corrective :

Il s'agit de la maintenance effectuée après la détection d'une panne, elle a pour objectif de remettre une entité d'un état défaillant à un état lui permettant d'accomplir une fonction requise ou peut être utilisée en complément d'une maintenance préventive pour l'élimination d'une avarie.

Le fonctionnement de la maintenance corrective est divisé en deux parties :

1.3.2 Maintenance palliative :

La maintenance palliative est une maintenance qui s'attache à la correction de tout incident identifié en production, et empêchant la poursuite de celle-ci, c'est une intervention rapide pour pallier au plus urgent en attendant de trouver une solution ou une correction définitive plus rassurante.

La maintenance palliative permet de :

- Localiser l'incident.
- Mettre en place une solution provisoire permettant de poursuivre l'exploitation.

1.3.3 Maintenance curative :

La maintenance curative est une maintenance qui s'attache à corriger tout incident identifié en production mais n'empêchant pas la poursuite de celle-ci, il s'agit d'une intervention en profondeur et définitive pour réparer un équipement (Figure .2) de façon définitive, la maintenance curative permet de :

- Localiser l'incident.
- Développer une solution permettant de rendre la machine conforme à sa destination.
- Mettre en place cette solution Ces deux genres de maintenance corrective se basent sur 2 notions.

A-Diagnostic :

- schémas fonctionnels, arbre de cause : cette approche permet de trouver l'origine de la panne en suivant une structure arborescente.
- des tableaux de type cause, effet, remède (tableau AMDEC : Analyse Mode de Défaillance de leurs Effet et de leur Criticité).
- des tests : pour assurer que la machine fonctionne normalement.

B-Réparation :

C'est la phase qui succède le diagnostic et permet au système de revenir à un bon fonctionnement. Dans cette phase il faut déterminer :

- Les différentes phases de travail de réparation.
- Le temps nécessaire à la réparation.
- Les moyens d'exécution pendant la réparation.

Est effectuée après défaillance du matériel, À celle-ci correspondent deux formes d'intervention: le dépannage et la réparation après panne.

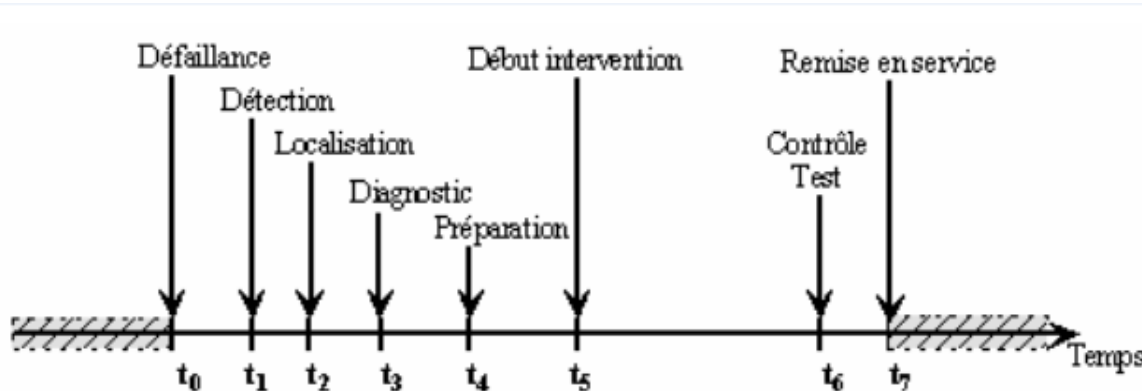


Figure 10: Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement.

1.3.4 La maintenance préventive :

La maintenance préventive consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant. Elle a pour objectif de :

- réduire les interventions d'urgence.
- éviter les périodes de dysfonctionnement d'avant panne.
- rendre possible la réparation.
- augmenter le niveau de sécurité.

Deux types de maintenances préventives :

a. Maintenance préventive systématique (périodique) :

Elle comprend les inspections périodiques et les interventions planifiées suivant un calendrier pour assurer le fonctionnement continu des équipements. Elle a pour objectif :

- De déterminer le coût probable de maintenance.
- De choisir les fréquences d'intervention sur un système.
- De faire de la planification de tâches et renforcer les mesures de sécurité

b. Maintenance préventive conditionnelle :

Réalisée à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement. Elle rend plus efficace la détection des défauts, permet d'améliorer la disponibilité par la planification des opérations. Elle a pour objectif :

- d'éviter les démontages inutiles liés à la maintenance systématique qui peuvent engendrer des défaillances.
- d'accroître la sécurité des personnes.
- d'éviter les interventions d'urgence suivant l'évolution des débuts d'anomalies.

i. Les différentes techniques de la maintenance préventive conditionnelle :

L'analyse de vibrations : La surveillance par l'analyse vibratoire des systèmes électromécaniques dans les installations industrielles est l'outil préventif de la maintenance. Cette technique est largement utilisée dans la majorité des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un défaut d'alignement, un roulement usé, ou un jeu, s'explique par un changement des efforts internes que subit la machine, cela conduit à une modification de son comportement vibratoire.

L'analyse des huiles : L'analyse des huiles est une autre technique de surveillance, qui décide l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage. La méthode consiste à analyser les particules d'usure. Drainées par le lubrifiant, afin d'en inférer l'état de l'installation.

La technique de la thermographie : Dans le domaine de la maintenance, la thermographie infrarouge joue un rôle très important. Elle est réservée pour le contrôle d'installations électriques et peut être utilisée dans la surveillance des machines tournantes.

Pour déterminer la condition de fonctionnement, elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface). En décelant des anomalies thermiques (les endroits qui sont plus chauds ou plus froids), un expert peut identifier et expliquer les problèmes débutants au sein de l'usine.

Les éléments de base d'un appareil infrarouge industriel sont le système optique, les capteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur.

Le système optique collecte l'énergie sur un capteur pour la transformer en signal électrique, puis un dispositif électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en une mode affichable.

La thermographie autorise d'accomplir des mesures à distances, et de procurer instantanément une représentation thermique de la zone contrôlée.

L'analyse acoustique : L'analyse acoustique est une technique de la maintenance préventive conditionnelle, permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générés par les systèmes électromécaniques.

La mesure de son (bruit) effectuée à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à

caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB(A), effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée.

Le choix de la technique de surveillance : Chaque technique de surveillance, ne permet pas de capter les mêmes types de défauts, ni d'opérer un diagnostic détaillé pour connaître l'origine, la gravité du défaut et le domaine d'application favorisé pour chaque technique de surveillance, Donc, avant de préférer la technique de surveillance, il doit déterminer la criticité de sa machine à l'aide de l'historique de défaillances qui touchent cette dernière et son dossier technique.

ii. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle :

Le principal avantage de la maintenance préventive conditionnelle est d'éviter les arrêts des machines tournantes et des systèmes électromécaniques. Il faut utiliser ce type de maintenance pour contrôler l'état de la machine pour réduire sa probabilité de défaillance. Il existe quatre outils principaux utilisés en maintenance préventive conditionnelle [10].

- La thermographie infrarouge.
- L'analyse des huiles.
- L'analyse vibratoire et l'analyse acoustique.

L'inconvénient principal de la maintenance préventive conditionnelle est la mise en place de ces techniques.

II. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons étudié la maintenance en générale et la maintenance préventive conditionnelle en particulier. La maintenance des systèmes de production n'est pas une tâche facile. Ceci exige entre autres, des ressources humaines compétentes, des outils et du matériel adapté aux équipements ainsi qu'aux installations à maintenir. Plusieurs outils peuvent être utilisés comme l'analyse d'huile, thermographie et l'analyse vibratoire pour assurer une maintenance conditionnelle efficace.

Présentation de l'analyse vibratoire

I. Introduction :

Les machines industrielles vibrantes il convient d'interpréter leur message vibratoire. Ces vibrations vont réagir au sein même de la structure de la machine. Souvent, le capteur destiné à suivre l'information fournie par les vibrations ne peut être placé à la source même du défaut, le Signal recueilli est donc influencé par le chemin qu'il parcourt entre la source et le capteur. La structure agit et convole avec le signal vibratoire du défaut, il devient alors nécessaire de tenir compte du comportement élastique de celle-ci. La raideur de la machine, sa topologie, sa fixation, ses conditions de fonctionnement est autant de paramètres qui vont influencer le signal vibratoire. L'élaboration d'une machine n'est donc pas simple et nécessite de prendre en compte tous ces paramètres, sans en oublier les fonctions de base. L'analyse

vibratoire est l'un des outils les plus efficaces et les plus utilisés dans l'industrie. Sa pratique, ses traitements, ses ambitions pour la maintenance préventive conditionnelle.

1. L'analyse vibratoire :

a) L'analyse vibratoire en tant qu'outil de diagnostic :

Il est important de savoir comment naissent et d'où proviennent les dérèglages, dysfonctionnements ou pannes sur une installation. Un des moyens pour y parvenir consiste à analyser la signature vibratoire qui en sort. On fait ici l'hypothèse implicite selon laquelle les vibrations sont l'image du comportement dynamique de tout organe mécanique de la machine. L'utilisation de l'analyse des signaux vibratoires comme méthode de diagnostic remonte aux années 1960 [Pusey, 2008]. Depuis, on y fait largement appel dans la plupart des installations industrielles, particulièrement dans la prévention des pannes mécaniques. Au début, l'analyse fut fondée autour des représentations de la variation temporelle de l'amplitude des vibrations, appelées signatures vibratoires, essentiellement à base de comparaisons. Pour cela, des techniques analytiques ont été utilisées. Cependant, des lacunes et autres désaccords sont vite apparus lors d'applications sur différents types de machines. Les limites résident au niveau de l'instrumentation disponible et de l'aptitude effective à identifier des défauts sur un matériel en fonctionnement.

b) Les applications industrielles :

Les applications industrielles de la surveillance vibratoire des équipements en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plate – formes, pont, barrages, bâtiments,...) ou les machines (turbo – alternateurs, système d'engrenage,...) ou certains organes des machines de productions (roulements, pignons, rotors, ...etc.) contenant la signature cinématique de la machine, reliée aux conditions de fonctionnement. Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en application :

- De connaître à tout moment « l'état de santé » de ces machines et d'estimer la longévité potentielle des différents composants et ainsi prévenir l'usure prématurée des différentes pièces.
- Pour un équipement neuf, l'analyse vibratoire permet la détection d'anomalies ou défauts de montage – sources potentielles de pannes- pratiquement indécélables par d'autres techniques d'investigation ;
- Pour un équipement venant de faire l'objet d'une remise en état, l'analyse vibratoire vérifie si cette opération a bien corrigé les anomalies identifiées ayant conduit à la prise de décision d'arrêt ou, au contraire, a généré un autre comportement anormal susceptible d'induire, à brève échéance, une nouvelle panne (maintenance mal adaptée).
- d'en déduire l'évolution de l'état de santé pour les semaines ou les mois à venir et de faire des prévisions sur leur destin : faire un bilan de santé.
- D'enrichir et affiner les informations justes et pertinentes nécessaires pour la maîtrise des risques.
- D'évaluer avec précision le niveau de vibration aux endroits envisagés pour l'utilisation d'équipements sensibles et ainsi évaluer l'emplacement idéal d'un équipement requérant de faibles niveaux vibratoires.
- Améliorer l'environnement de travail.

Les avantages suivants peuvent être perçus :

- Eviter la casse des machines.
- Eviter les arrêts de production non programmés.
- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Assurer un contrôle qualité permanent de réparation, du montage et du graissage ;
- Pratiquer l'équilibrage in situ de ces équipements.
- Augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités tels que le pétrole, la pétrochimie et la chimie.
- Eviter les erreurs humaines, lors des arrêts et des remises en état.
- Améliorer la disponibilité des équipements et la sécurité de l'environnement.
- Cependant, Il faut remarquer que les méthodes et les résultats dans le domaine de l'analyse vibratoire intéressent directement la production industrielle (chaîne de fabrication, la production d'énergie et la motorisation).

2. Vibration :

Une vibration peut être définie par la «variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence ».

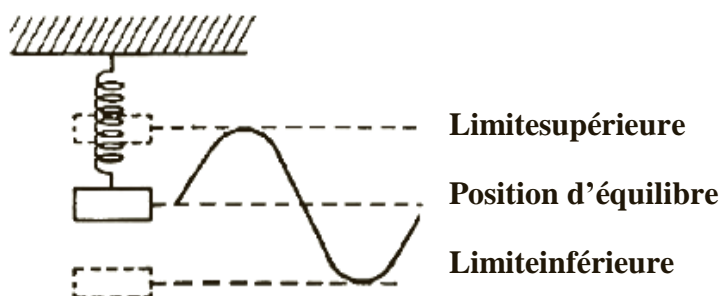
Les vibrations mécaniques sont liées à l'existence d'efforts dynamiques internes ou externes au mécanisme.

Les efforts internes peuvent être fonctionnels mais dans la plupart des cas,

Ils relèvent d'un mauvais fonctionnement lié à un déséquilibre de rotor, à un désalignement d'arbre, à une usure mécanique, à la cavitation, etc....

Dans le cas d'efforts externes, ils sont associés à des excitations naturelles comme le vent, le déplacement de charges ou encore liés à l'environnement vibratoire des mécanismes (séismes, ...).

Dans le cas général, les vibrations dépendront de la forme de l'excitation. On est ainsi amené à caractériser deux principaux régimes : un régime libre caractérisé par une excitation type impulsion et un régime forcé qui se caractérise par des mouvements synchrones à une excitation périodique. Le cas de l'écoulement fluide dans une turbomachine constitue un régime particulier : les vibrations sont dites auto induites ou auto excitées.



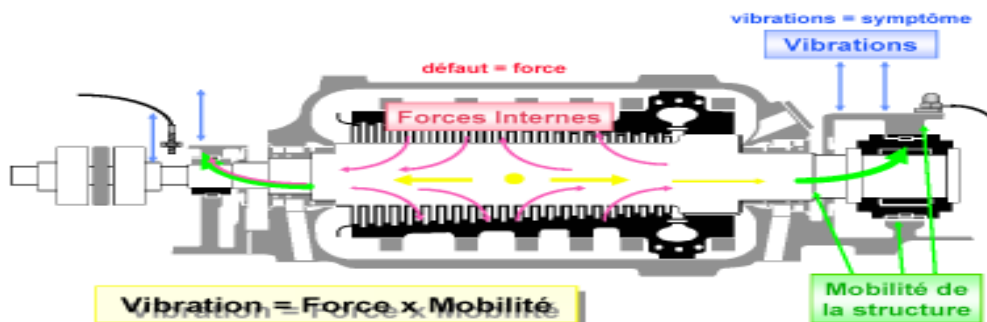
- La masselotte oscille entre des limites supérieures et inférieures, et l'écart entre chacune de ces limites et la position d'équilibre est appelé « amplitude ».
- La masselotte oscille autour de sa position d'équilibre un certain nombre de fois par seconde ou par minute. Ce nombre de cycles répétés à l'identique pendant une unité de temps s'appelle la « fréquence » et, à l'inverse, la durée du cycle s'appelle la « période ». Si la masselotte revient trois

fois par seconde à sa position initiale, elle accomplira trois cycles par seconde, la fréquence du mouvement sera de trois Hertz (3Hz) et sa période de 1/3 de seconde ou 333,333 ms.

A. Origine des vibrations :

Les vibrations dans les machines tournantes sont essentiellement dues à un déséquilibre du rotor ou à une excentricité d'un élément de masse quelconque par rapport à l'axe de révolution.

Les vibrations d'une machine tournante se transmettent du rotor à la structure à travers les paliers. Elles seront donc mesurées au niveau des paliers.

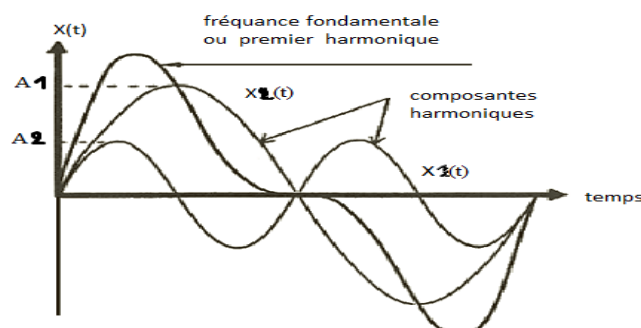


B. Nature des vibrations :

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques de l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires ou aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non, identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée.

➤ Les vibrations périodiques :

Peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason ou, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser. Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés « composantes harmoniques » et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié qui est appelée « fréquence fondamentale » ou fréquence de l'harmonique d'ordre 1.



➤ Les vibrations transitoires

Sont générées par des forces discontinues (chocs). Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement.

Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a un amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudo-périodique. Si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur-critique et le mouvement est apériodique. (Comme par exemple la vibration provoquée par un marteau pilon).

➤ Les vibrations aléatoires :

Sont caractérisées par un mouvement oscillant aléatoire qui ne se produit pas identiquement à lui-même comme les mouvements périodiques. Les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour les analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue. (Comme par exemple la vibration générée par le phénomène de cavitation sur une pompe).

Ces vibrations caractéristiques sont donc toutes identifiables et mesurables. La tendance à l'accroissement de leur intensité est représentative de l'évolution de l'effort qui les génère et révélatrice du défaut qui se développe.

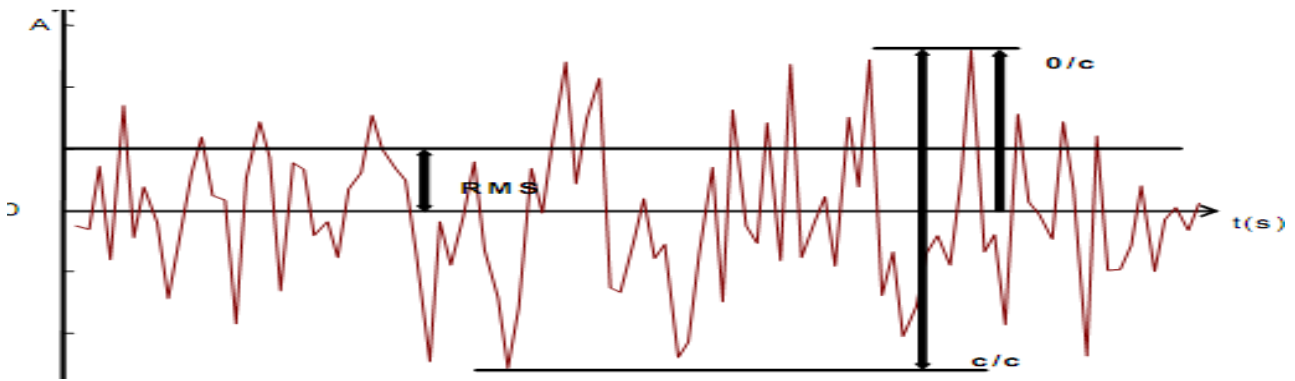


Figure 11: Décomposition d'un signal aléatoire

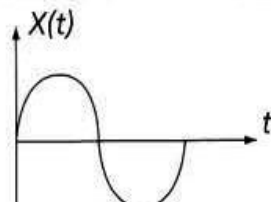
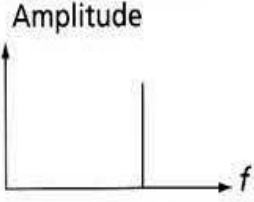
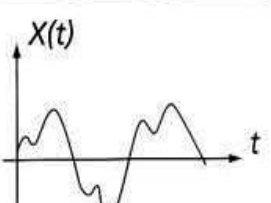
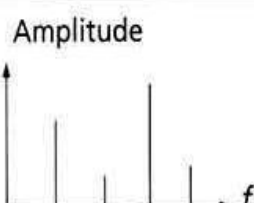
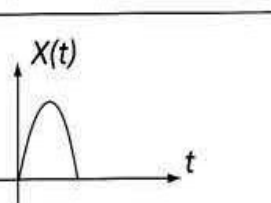
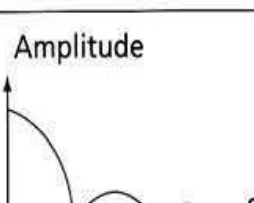
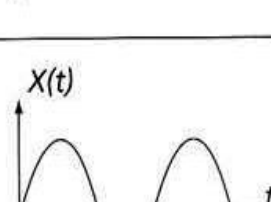
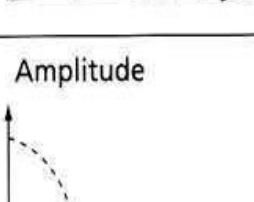
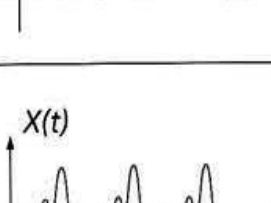
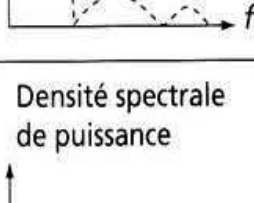
Nature de vibration	Forme temporelle	Forme spectrale	Phénomène générateur
Sinusoidale			Balourd
Sinusoidale complexe			Effort dynamique d'engrènement
Transitoire			Explosions, Marteaux-pilons, Laminoirs
Transitoire périodique			Presse automatiques, Cames
Aléatoire			Oscillations de pression exercées sur une structure baignant dans un fluide en écoulement

Tableau 4 : Différents types de vibrations :

Caractérisation d'une vibration :

à une fréquence :

Définition :

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.

1 Hertz = 1 cycle par seconde

Relation entre fréquence et période :

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde (Source : Norme française NF X 02-202). Si la fréquence (f) d'un phénomène est de 50 Hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de 1/50e de seconde soit 20 ms.

Ainsi dans cet exemple

f = 50 Hertz (50 Hz) T =
1/50 de seconde

La fréquence f est donc l'inverse de la période T : **f = 1 / T.**

Les unités :

Si l'unité normalisée (unité SI) de la fréquence est le Hertz (Hz), beaucoup d'utilisateurs, notamment parmi les mécaniciens, préfèrent exprimer les valeurs en CPM (nombre de cycles par minute) ou encore en RPM (nombre de rotations ou révolutions par minute).

1Hz = 1 CPM / 60 = 1 RPM /60.....(2)

Notons que l'utilisation de RPM n'a pas de sens dans le cas de phénomènes de type aléatoire (cavitation d'une pompe ou défaut de lubrification d'un palier à roulement) et peut même être source de confusion (cas d'un défaut des courroies, où l'on ne sait plus s'il s'agit de la fréquence de rotation de la poulie menant, ou menée ou de la fréquence de passage des courroies). Il est intéressant parfois d'exprimer des phénomènes liés à la rotation en multiple ou ordre de cette fréquence. Cette formulation présente l'intérêt de lier le phénomène vibratoire à une fréquence de référence (souvent la fréquence de rotation de la ligne d'arbres qui l'induit) et de pouvoir suivre l'amplitude de ses harmoniques (harmonique = composante dont la fréquence est un multiple d'une fréquence donnée), ce qui est très intéressant dans le cas de la surveillance de comportement vibratoire d'installations à vitesse de rotation variable.

➤ Exemple :

Soit un ventilateur tournant à 1 488 tr/min. Le déséquilibre résiduel de la turbine (balourd) génère une vibration dont la fréquence de la composante d'amplitude prépondérante correspond à sa fréquence de rotation. La fréquence de ce phénomène exprimée en Hertz :

f = 1 488/60 = 24,8 Hz

➤ L'amplitude :

L'amplitude est la première sensation ressentie lorsque l'on pose la main sur le palier d'une machine qui vibre.

Définitions :

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 (figure 11) pour caractériser son 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_{c-c}) » appelée « peak to peak » (A_{p-p}) en anglais. 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 » ($A_{c-c} = 2A_c$).
- ✓ L'amplitude « efficace (A_{eff}) » ou RMS en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

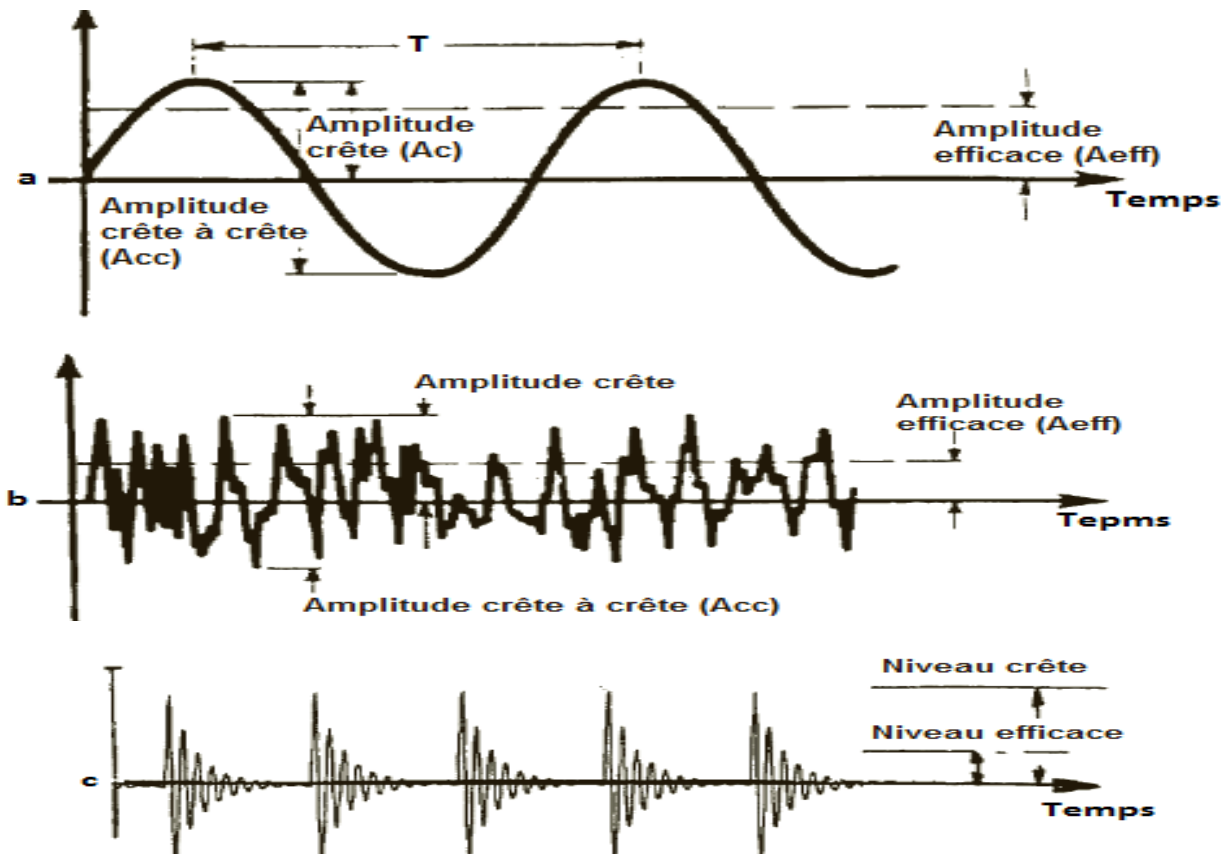


Figure 12 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c).

D. Grandeurs physiques caractérisant une vibration

En industrie, Les états vibratoires sont rarement repérés par les mesures des forces, mais plus classiquement par des descripteurs associés aux déplacements, aux vitesses (variation du déplacement par unité de temps) ou aux accélérations (variation de la vitesse par unité de temps).

Les vibrations ressenties ou mesurées sur un équipement ne sont en fait que la réponse de la structure à la somme des excitations internes et externes. Ces vibrations sont pressenties par des capteurs au point de mesure.

Le descripteur retenu pour la mesure dépend de la nature des problèmes recherchés, de l'accessibilité des points de mesures et des technologies utilisés. Les relations entre ces trois paramètres (x, v, g) mettent en lumière, l'importance du choix de la grandeur physique à mesurer pour la surveillance d'une machine tournant.

La mesure en mode accélération (représentative des forces dynamiques) permet de mettre en évidence des phénomènes dont les fréquences sont élevées (engrènements sur un multiplicateur, passage d'encoche sur un moteur, ...) ou qui génèrent des signaux impulsifs de courte durée, riches en composantes haute fréquence (écaillage de roulement, jeu, cavitation, ...). Ce dernier paramètre ne dépend pas de la fréquence. C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire.

Les unités Grandeurs mesurées :

- Accélération (mm/s^2 ou $g: 9,81\text{m/s}^2$).
- Vitesse (mm/s).

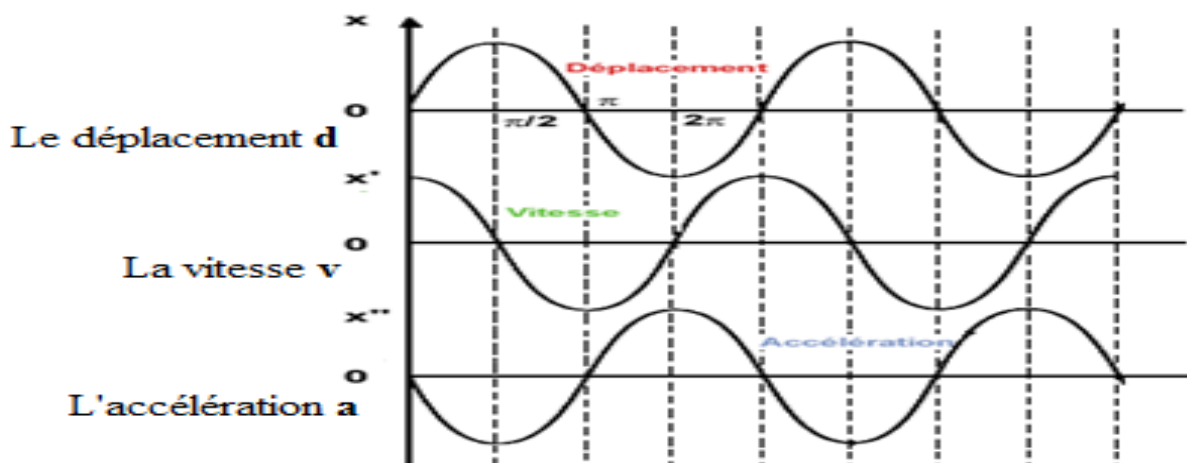


Figure 13 : Grandeurs physiques caractérisant une vibration

• Déplacement

(μm ou mm).

E. Critères de sélection des trois grandeurs.

Un phénomène vibratoire induit par un phénomène donné se traduira par un déplacement physique de la machine dont le signal ne sera significatif que lorsque la fréquence du mouvement sera faible. C'est la raison pour laquelle la mesure du déplacement n'est généralement utilisée que pour

mettre en évidence des phénomènes basse fréquence ou dont les composantes prépondérantes se situent en dessous de la fréquence de rotation (déséquilibre, déformation, désalignement, desserrage...), voire en dessous de cette fréquence (instabilité, frottement...).

– La mesure de la vitesse, représentative de l'énergie dispensée par la vibration (énergie cinétique $E = \frac{1}{2} mv^2$) et donc de la fatigue subie par la machine, permet d'observer correctement des phénomènes dont la fréquence n'est pas trop élevée,

c'est-à-dire ne dépassant généralement pas 1 000 à 2 000 Hz (fréquence de passage des pales d'un ventilateur ou des aubes d'une pompe, engrènement sur un réducteur, défauts de roulements dans le cas d'écaillages localisés...), et bien évidemment les défauts traditionnels des lignes d'arbres (déséquilibre, désalignement, déformation, instabilité, frottement...)

– La mesure de l'accélération directement représentative des forces dynamiques induisant le mouvement permet de mettre en évidence des phénomènes dont les fréquences sont élevées (engrènement sur un multiplicateur, passage d'encoches sur un moteur...) ou qui génèrent des signaux impulsifs de courte durée, riches en composantes hautes fréquences (écaillage de roulements, jeu, cavitation...).

2.1 Choix du mode d'investigation.

L'analyse des vibrations permet d'appréhender les différents efforts par tout défaut potentiel qui affecte la machine. Elle permet de rechercher toutes les informations utiles pour tirer un diagnostic correct sur son état mécanique et ainsi connaître la fonction usure de la machine. Une onde vibratoire peut être étudiée par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse plus ou moins sophistiqués à savoir :

- Indicateurs simples : niveau global, facteur de crête, facteur de défaut, etc. ;
- Méthodes d'analyse qualitative : analyse temporelle, analyse fréquentielle, analyse d'enveloppe et analyse spectrale.

2.1.1 Mesure du niveau global :

Cette mesure permet de détecter la présence d'un défaut, mais ne permet pas de détecter la source du défaut. Elle permet d'exécuter une surveillance basée sur l'appréciation des amplitudes dans une bande de fréquences donnée, qui à son tour s'effectue de façon continue et les valeurs mesurées sont couramment actualisées.

En effet, cette méthode consiste à relever les mesures globales sur un équipement lorsqu'il est réputé fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommation, disponibilité, ...etc.).

Cet état est dit de référence. Dans la pratique, on compare les valeurs réelles des paramètres vibratoires surveillés avec les consignes fixées afin d'établir les critères d'alarme et de danger, ou encore résultant de mesures précédentes pour déceler une évolution significative d'une dégradation. Le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB au-dessus du niveau de référence. Par contre, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB au-dessus du niveau d'alarme.

Cependant, si la mesure du niveau global permet de suivre de manière fiable une machine, elle ne permet pas d'établir un diagnostic. En effet, sous une seule valeur (en déplacement, vitesse ou accélération) tous les phénomènes mécaniques (balourd, lignage, engrènement, roulement) sont confondus. Cependant, la mesure simultanée de ces trois niveaux globaux, ou au moins deux niveaux globaux de déplacement et d'accélération permettent d'émettre un avis sur la situation du phénomène en fréquence (phénomène d'origine basses ou hautes fréquences).

2.1.2 Analyse spectrale :

La surveillance d'un niveau vibratoire global est souvent insuffisante pour une détection anticipée des dysfonctionnements. Il est donc préférable d'analyser et de surveiller séparément les différentes fréquences vibratoires. À cet effet, grâce à la transformée de Fourier, le signal temporel vibratoire est décomposé en composantes de fréquence et l'analyse spectrale est devenue la technique la plus importante et la plus utilisée dans l'industrie. Elle est plus riche et plus fine, voire donne de très bons résultats.

Un spectre permet de déterminer non seulement l'importance de l'anomalie mais aussi sa nature (balourd, désalignement, défaut de roulement, etc.) et de suivre son évolution dans le temps. Donc, l'analyse spectrale permet de fournir au personnel concerné, non seulement des informations sur le comportement vibratoire instantané, mais donne également des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, voire l'identification de la provenance du défaut, étant donné qu'elle donne la valeur de l'amplitude de chacune des composantes du signal. Cette identification est la clef de diagnostic des défauts. Le spectre est le concept fondamental de l'analyse en fréquence. C'est la représentation d'un signal dont l'amplitude n'est plus donnée en fonction du temps mais en fonction de sa fréquence.

L'analyse spectrale permet de décomposer un signal complexe en composantes sinusoïdales caractérisées par leur

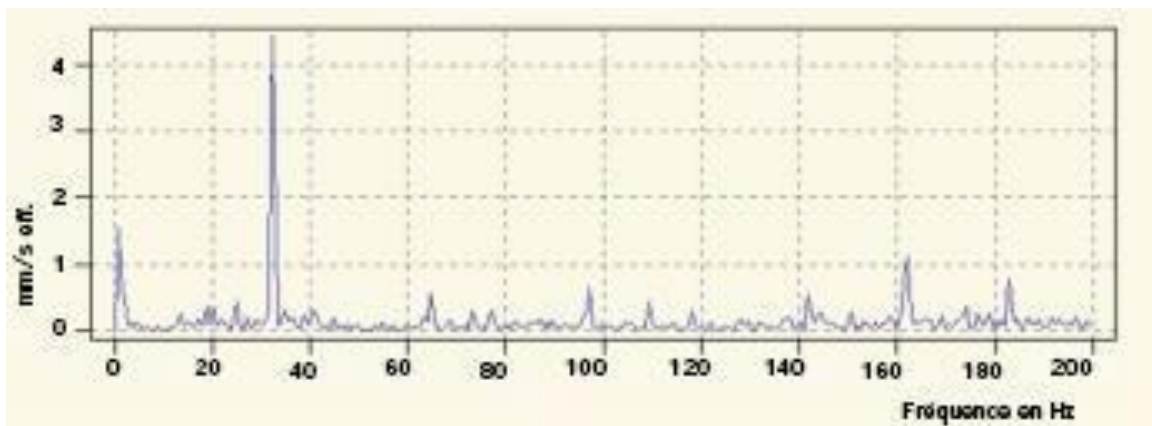


Figure 14: Représentation spectrale ou fréquentielle d'un signal.

amplitude et leur

fréquence.

3. Les capteurs de vibration :

3.1 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), le vélocimètre (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 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.

i. Les proximètres :

Le proximètre, ou sonde de proximité [figure 16], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier [figure 15]. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz).

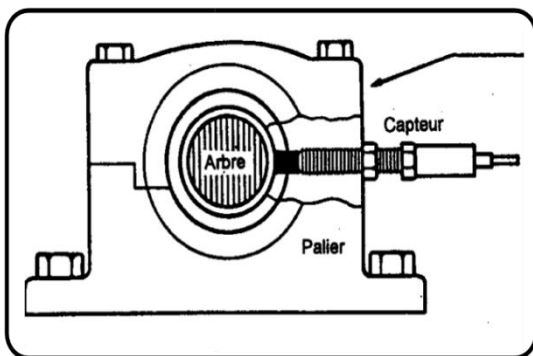


Figure 15:proximètre monté sur un palier.



iver

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines.

A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en termes de déplacement qu'en termes de vitesse ou d'accélération.

ii. Vélocimètres :

Les capteurs de vitesse, ou vélocimètres, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.

Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté [figure 17].

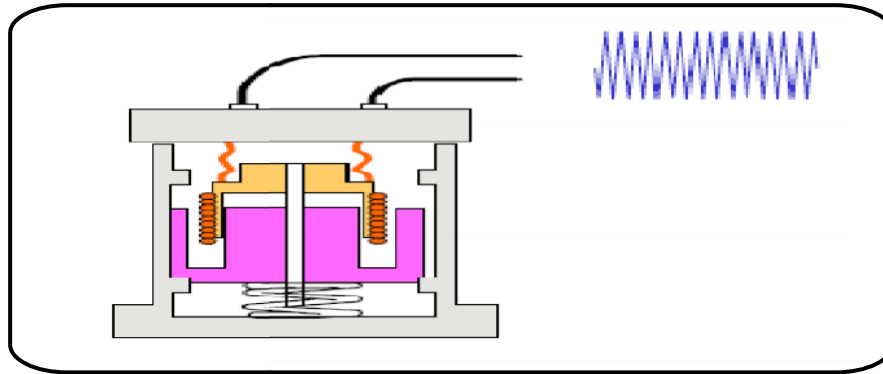


Figure 17: schéma de principe d'un vélocimètre.

La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine. La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ.

iii. Les accéléromètres :

a. Principe :

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 18], 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.

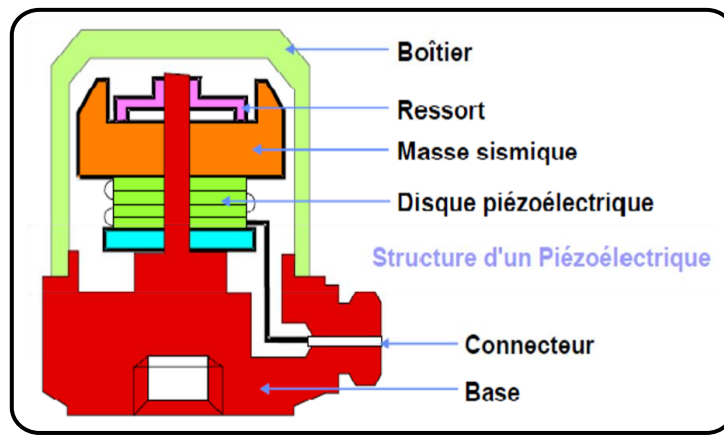


Figure 18: schéma de principe d'un accéléromètre.

b. Réponse d'un accéléromètre :

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, 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

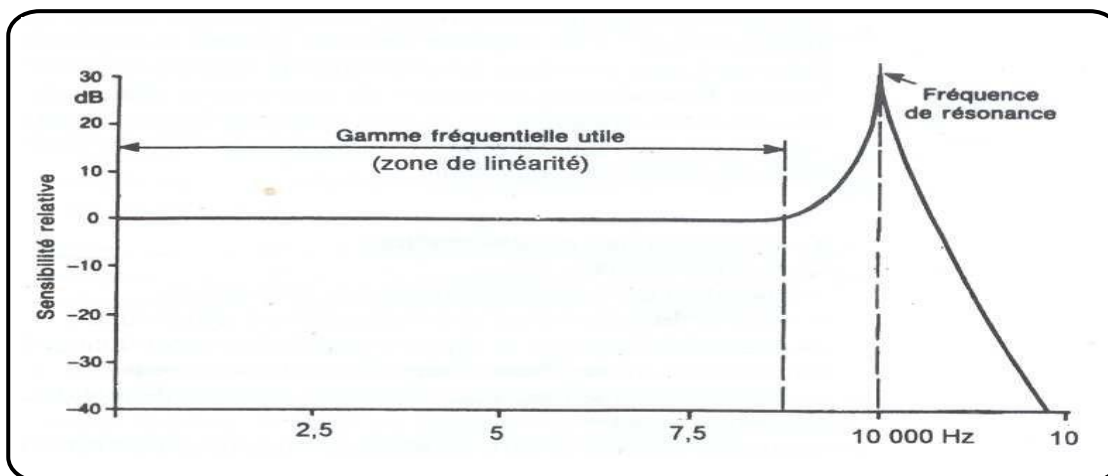


Figure 19: courbe de réponse d'un accéléromètre

sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est

fautive.

3.2 Choix de l'emplacement de capteurs :

3.2.1 Emplacement :

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile. Ces efforts sont de deux types :

- Efforts tournants : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;

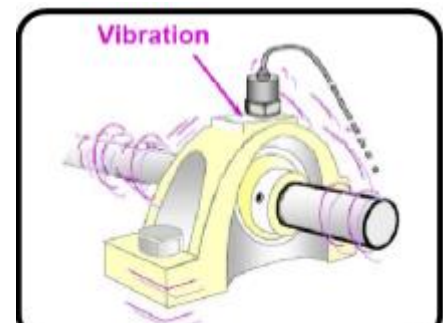


Figure 20: Fixation du capteur sur palier.

- Efforts directionnels : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial, ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

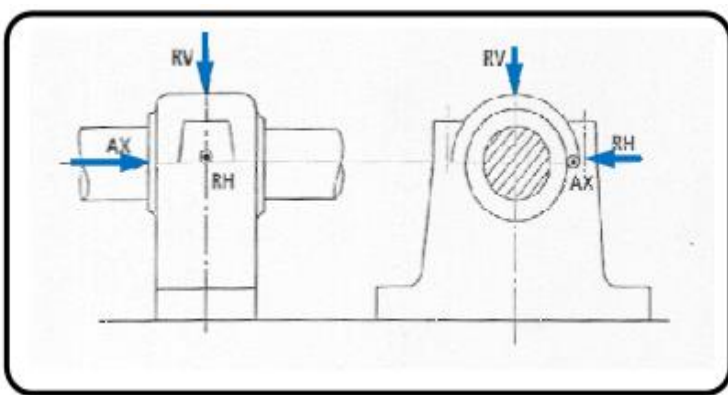


Figure 21: Choix directionnel pour la prise de mesure.

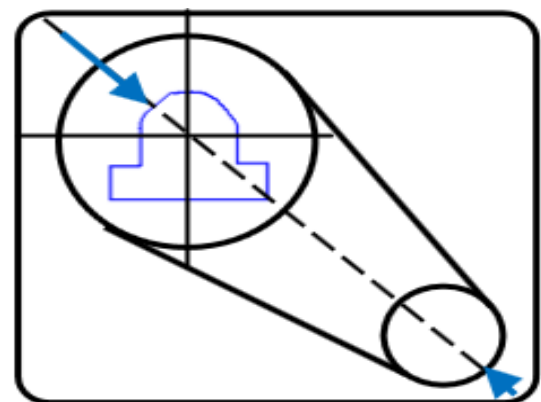


Figure 22: direction favorisée pour transmission par poulies courroies.

Remarque :

- Bien que l'effort soit constant dans toutes les directions du plan radial, une mesure dans la direction radiale horizontale donne une valeur d'amplitude plus forte.
- La lecture des valeurs d'amplitude doit tenir compte du temps nécessaire à la prise d'une mesure correcte et de l'estimation des fluctuations de niveaux éventuelles.
- Toute remarque au cours de cette évaluation peut être importante et significative d'un défaut.

3.2.2 Consignes pour la fixation des capteurs :

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur {Figure 23}.
- L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure {Figure 24}.
- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs {Figure 25}.
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par la mise en place de goujons.

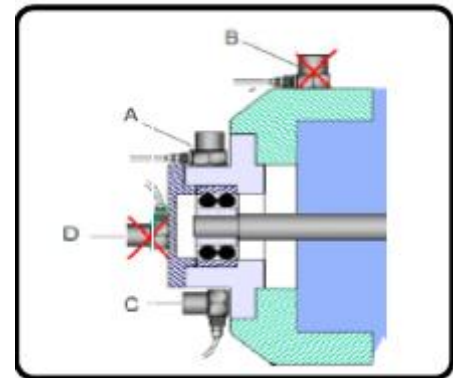


Figure 23: Choix de l'emplacement du capteur.

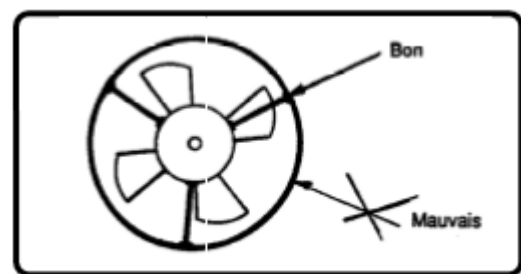
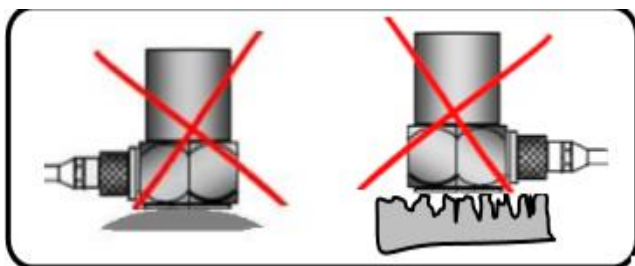


Figure 24: les surfaces de contact Figure 25: l'emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement.

3.2.3 Modes de fixation :

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation

[Figure 26].

Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites d'une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur.

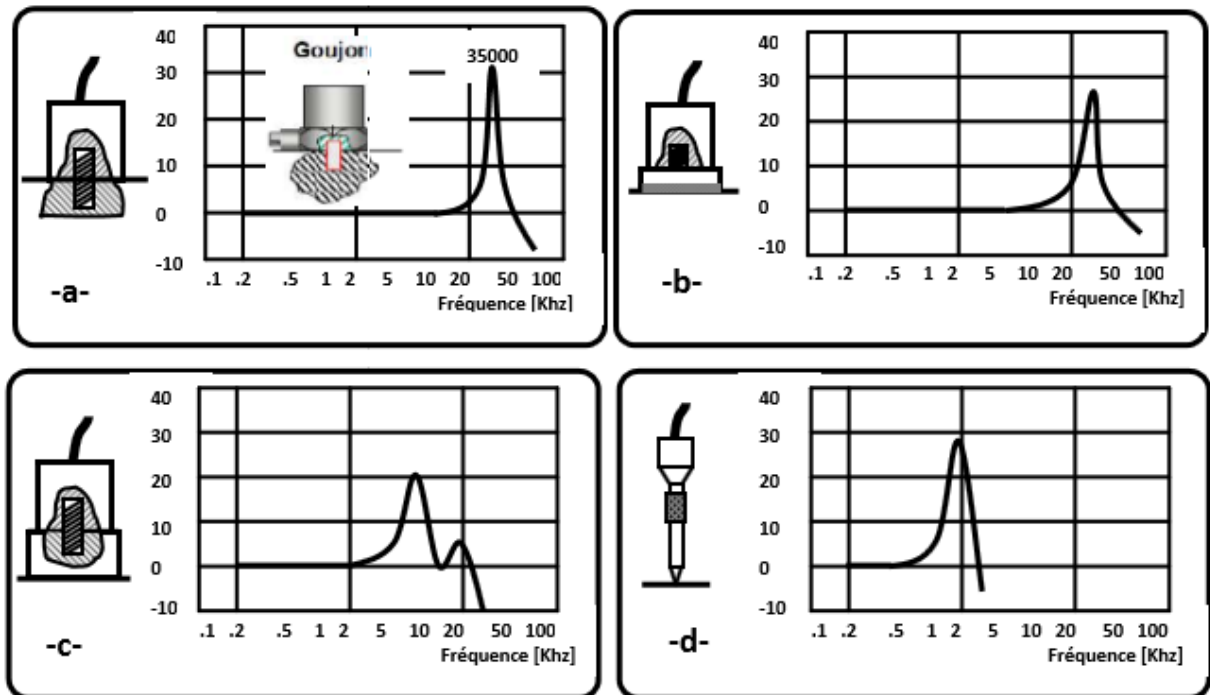


Figure 26: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation.

-a- fixation par goujon -b- fixation par embase collée -c- fixation par aimant -d- fixation par point de touche

4. ETUDE DES PRINCIPAUX DEFAUTS

Le diagnostic de l'état d'une machine n'est possible que si l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible d'affecter la machine considérée, c'est à dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts. La connaissance de ces images vibratoires et de la cinématique de la machine permet de formuler un diagnostic de l'état de la machine.

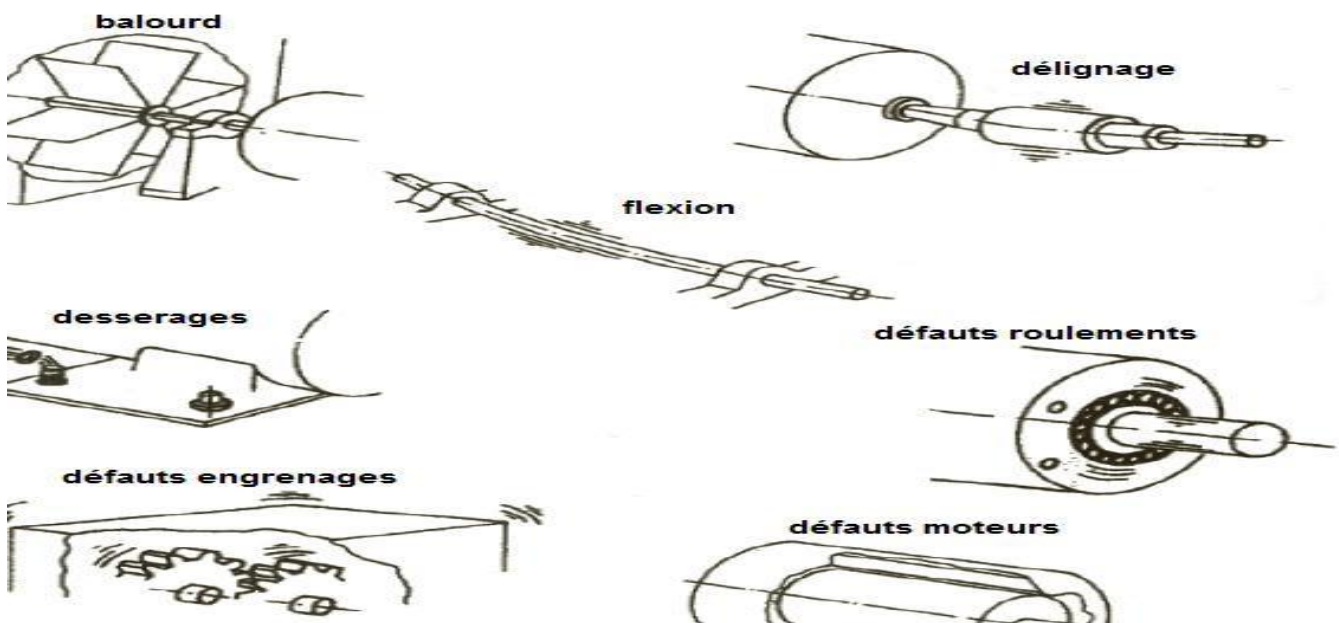


Figure 27: principaux défauts de balourd.

4.1 Déséquilibre : défaut de balourd.

4.1.1 Définition :

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. De cette non-concentricité, résulte l'application de forces centrifuges proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation $F = Mr \omega^2$ qui déforment le rotor. On dit que le rotor présente un balourd. Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence :

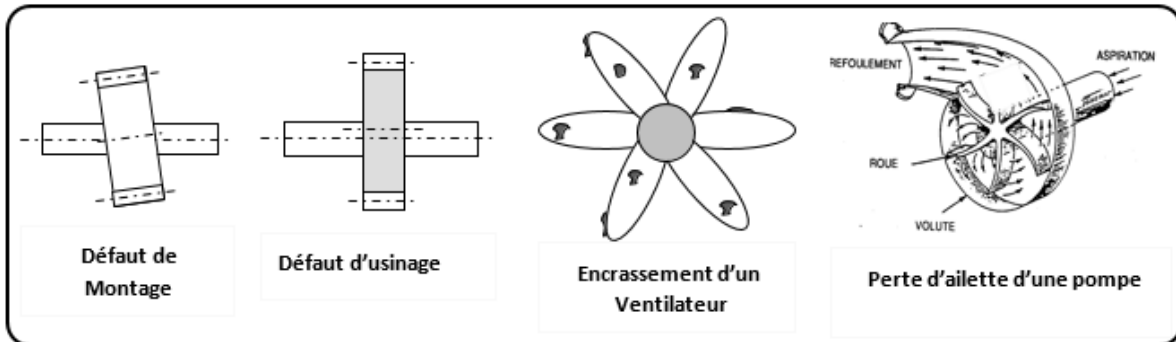
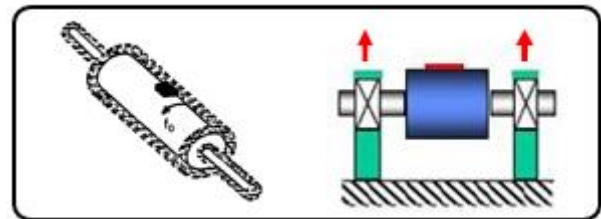


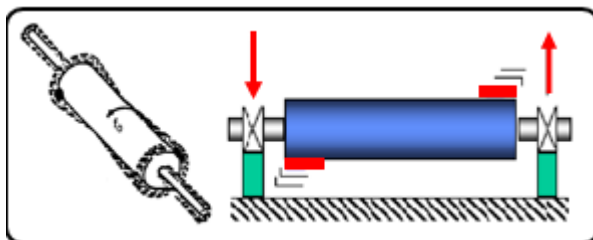
Figure 28: défaut de balourd.

➤ Balourds statique et dynamique :

Considérons un rotor bien équilibré. Ajoutons en un endroit de ce rotor une masse M . le rotor présentant un balourd va osciller jusqu'à se placer en "position lourde" vers le bas. Ce déséquilibre agit aussi s'il n'y a pas de rotation; on l'appelle alors "balourd statique". Les deux paliers supportant le rotor vont subir, en même temps, l'effort centrifuge dû au déséquilibre. Il n'y aura donc aucun déphasage entre les mesures prises au même point sur les deux paliers.



Reprenons le cas précédent en remplaçant la masse M par deux masses identiques mais décalées de 180° et placées à chaque extrémité du rotor.



Ce déséquilibre agit aussi pendant la rotation; on l'appelle alors " balourd dynamique ". Les deux paliers supportant le rotor vont subir les efforts centrifuges de façon alternée.

Le déphasage (voisin de 180°) entre les mesures effectuées au même point sur deux paliers consécutifs est donc révélateur d'un balourd dynamique.

4.2 Défaut d'alignement

4.1 Définition

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

i. Désalignement d'arbres accouplés

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

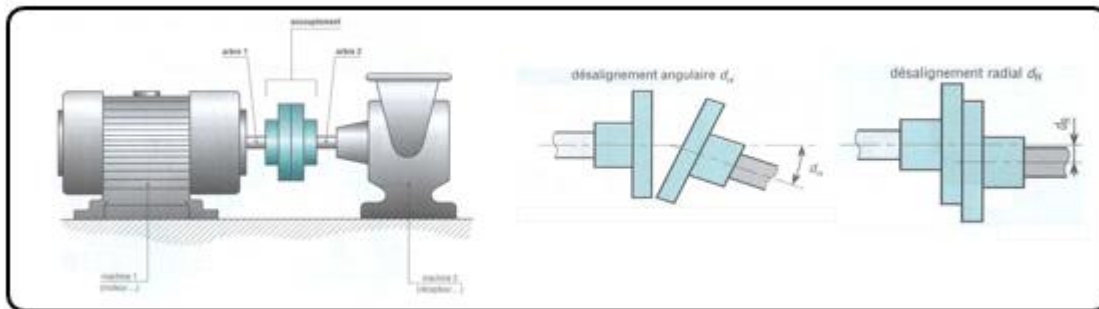


Figure 29: Défauts d'alignement d'arbres.

i. Désalignement des paliers

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

La manifestation spectrale de ce type de désalignement est identique à celle du désalignement angulaire.

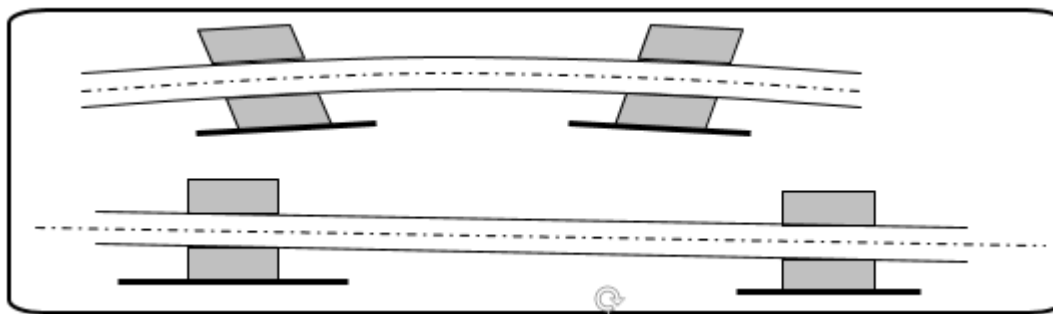


Figure 30: Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre.

4.3 Défauts de serrage

Le mauvais serrage de la structure de la machine génère des vibrations et un certain bruit. Le spectre typique mesuré sur une machine dans laquelle il existe un jeu contient un grand nombre de pic à des fréquences multiples de la fréquence de rotation.

Il est également parfois possible de retrouver des pics à l'harmonique $\frac{1}{2}$ ($\frac{1}{2}$ x la fréquence de rotation de l'arbre) et ses multiples. Les causes d'un jeu sont principalement l'usure ou un mauvais montage.

Comme exemples de jeu, on peut entre autre citer : accouplement dont le caoutchouc est utilisé, paliers montés avec un jeu excessif, ou boulons cassés (plus de jonction mécanique). Une roue à aubes dont les aubes touchent la carcasse nous donne un défaut semblable au jeu, amplifié. La figure 31 montre un exemple spectre sur une machine dont le joint de l'accouplement est usé. La fréquence de rotation est de 24,25 Hz

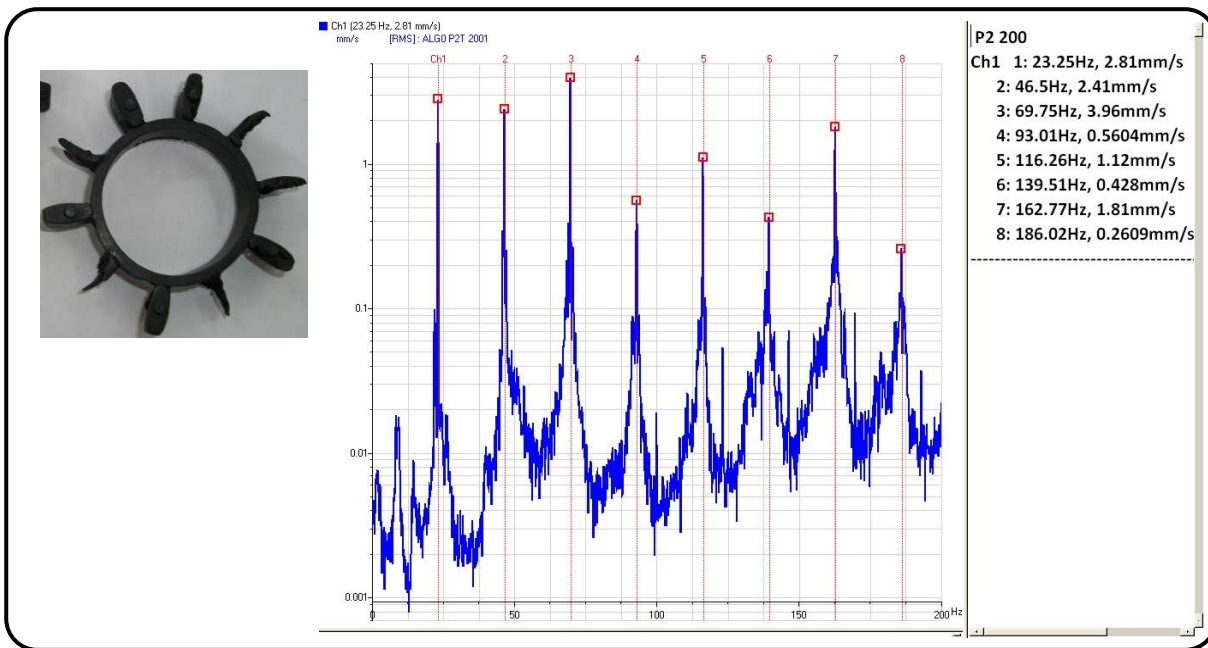


Figure 31: défaut d'usure d'accouplement.

4.4 Défauts de transmission par courroies

Fréquence caractéristique Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est lié à une détérioration localisée d'une courroie : partie arrachée, défaut de jointure, impliquant un effort ou un choc particulier à la fréquence de passage f_C de ce défaut définie par:

$$f_C = \left[\frac{\pi \cdot D_1}{L} \right] f_1 = \left[\frac{\pi \cdot D_2}{L} \right] f_2$$

f_C : fréquence de passage de la courroie.

D_1 et D_2 : diamètres des poulies 1 et 2.

f_1 et f_2 : fréquences de rotation des poulies 1 et 2.

L : la longueur de la courroie.

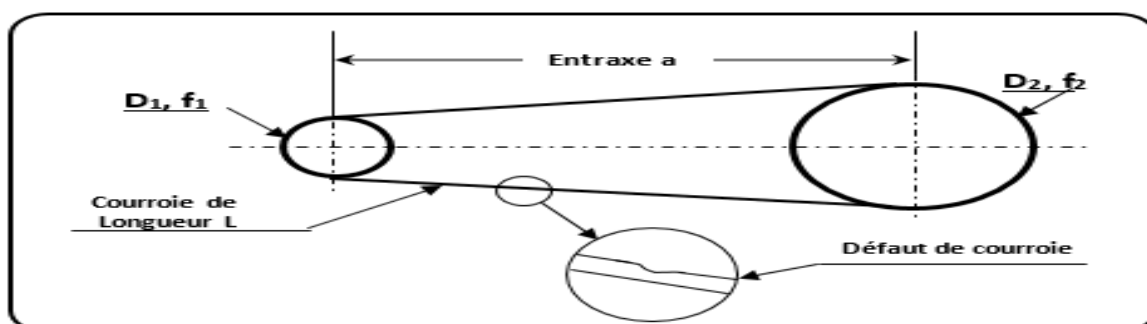


Figure 32: Défaut de courroie.

4.4.1 Prise de mesure

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement dans la direction de l'effort de tension de la courroie. Une mesure axiale peut, éventuellement, détecter un défaut de désalignement des poulies.

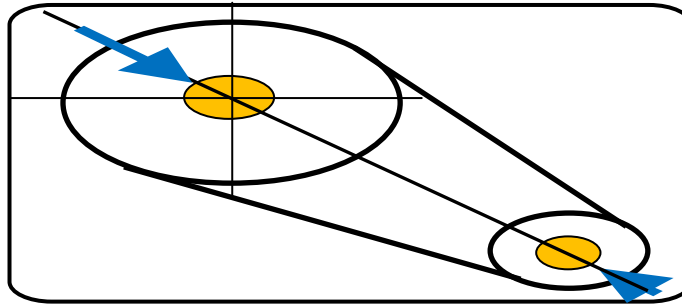


Figure 33: direction de mesure favorisée pour transmission par poulies courroies.

i. Signature vibratoire

L'image vibratoire donne un pic d'amplitude importante à la fréquence de passage des courroies, et ses harmoniques.

La figure montre le spectre réel mesuré sur une transmission par poulies courroies. On voit bien la présence d'un pic à la $2F_c$, $3F_c$, $4F_c$ (La fréquence F_c est de 8,17 Hz).

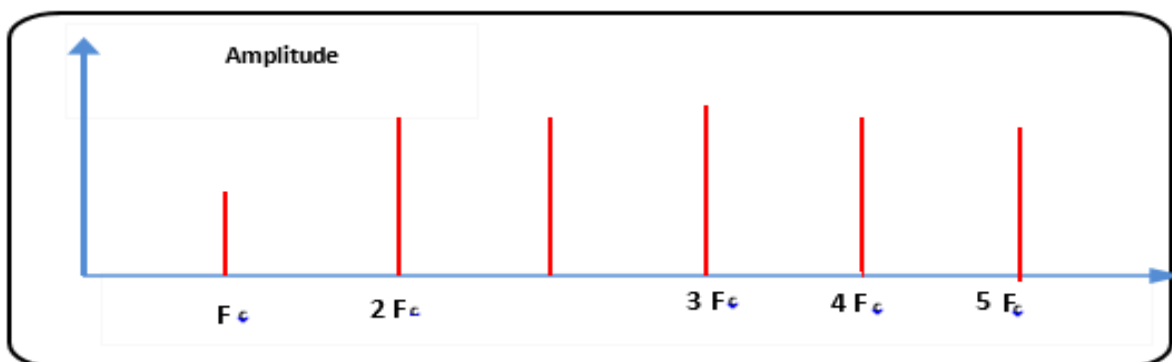


Figure 34: Image vibratoire théorique d'un défaut de transmission par courroies.

II. Conclusion

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine. Les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes. Au temps que l'analyse des vibrations est un outil puissant et complexe, beaucoup plus

complexe et beaucoup plus puissant qu'une simple lecture de température. Considéré comme l'un des piliers de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est sans doute la technique la plus diversifiée, la mieux codifiée et celle qui permet, sur les machines tournantes, d'aller le plus loin dans le diagnostic.

Chapitre 4:

Analyse vibratoire des ventilateurs

I. Introduction :

La ventilation industrielle incluant l'extraction de l'air chaud aux installations, l'élimination des odeurs, des fumées et les poussières, le renouvellement d'air et la régulation en température ou en hygrométrie des locaux industriels fait appel le plus souvent à des technologies onéreuses et énergivores.

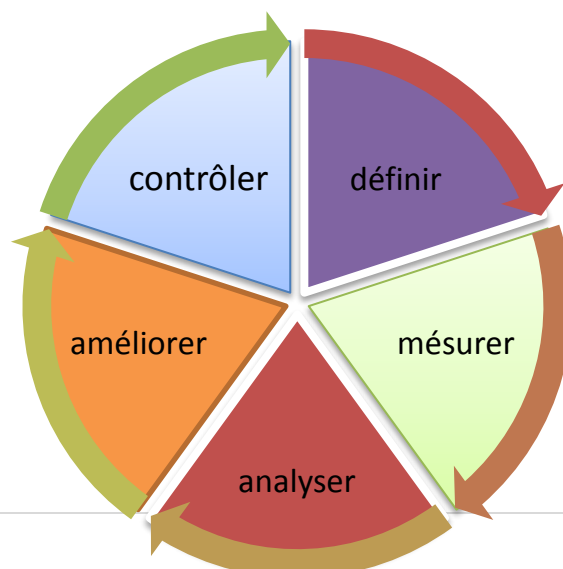
1. Démarche utilisée :

La réussite de tout projet est conditionnée par le bon choix de la méthode à adopter, c'est dans cette perspective que j'ai choisi la démarche **DMAIC**.

- **La méthode DMAIC :**

DMAIC est une méthode de résolution de problèmes pour le pilotage des projets, qui suit une ligne conductrice en 5 étapes nécessaire à l'obtention de résultats fiables, contractée dans l'acronyme **DMAIC** ou **DMAAC** pour Définir, Mesurer, Analyser, Innover ou Améliorer et Contrôler.

- **Définir** : Cette phase s'attache à la définition des objectifs et limites du projet, à l'identification des questions nécessaires pour atteindre le niveau le plus pertinent.
- **Mesurer** : L'objectif de la phase Mesurer consiste à rassembler les informations nécessaires pour traiter le sujet d'une façon objective, ainsi d'identifier les zones critiques.
- **Analyser** : Il s'agit de discriminer l'essentiel de l'accessoire, l'important du secondaire, afin de focaliser les efforts sur les vraies causes des problèmes.
- **Innover ou Améliorer** : C'est la mise en place des solutions visant à éradiquer les causes les plus probables des problèmes.



- **C**
o
n
t
r
ô
l

er(mettre sous contrôle ou maîtriser) : Cette phase essentielle vise à évaluer et suivre les résultats des solutions mises en œuvre.

1.1 Etape 1 :

1.1.1. Définir.

➤ Définition générale de ventilateur :

Les ventilateurs sont des turbomachines transférant à l'air qui les traverse l'énergie nécessaire afin de véhiculer l'air au travers d'une paroi (ventilateur de paroi), dans une ou plusieurs conduites ou bien permettant de balayer un espace (local) assurant ainsi une homogénéisation de l'air. Parmi de nombreux types de ventilateurs couramment employés dans les installations de ventilation et de conditionnement d'air, on rencontre 4 principaux types de roues qui se distinguent les unes des autres en fonction de la forme des aubes.

Ils sont ainsi dénommés :

- ✓ Ventilateur centrifuge à aubes inclinés vers l'arrière ou ventilateur à réaction.
- ✓ Ventilateur centrifuge à aubes inclinés vers l'avant ou ventilateur à action.
- ✓ Ventilateurs à aubes radiales.
- ✓ ventilateurs hélicoïde.



Figure 35:types des ventilateurs.

➤ Utilisation

- Extracteurs de toiture ou tourelles d'extraction (à roue centrifuge ou hélicoïde).
- Désenfumage de locaux.
- Rideaux d'air chaud (ventilateur tangentiel).
- Centrale de traitement d'air.

- Ambiance explosive à peu explosive : ventilateur antidéflagrant.

➤ Sens général de l'écoulement d'air :


Dans le cas d'un ventilateur centrifuge, l'aspiration de l'air se fait axialement et le refoulement radialement. Pour un ventilateur axial, l'air est véhiculé parallèlement à l'axe de la roue.



Figure 36: sens générale de l'écoulement d'air.

Tableau 5; Les types des ventilateurs et leurs rendements.

Ventilateur	Intérêts	Photos
<p>Centrifuge à aubes inclinées vers l'avant</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Roue dite « en caged'écureuil» • Nbd'aubes entre 32 et 42 Unités. • Rendement de l'ordre 60 à 75%. 	
<p>Centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement de 75 à 85%. • Nbd'aubes entre 6 à 16 unités. 	
<p>A pales radiales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Peu utilisé dans les installations de conditionnement d'air. • Utilisé dans l'industrie pour le transport de produits légers (copeaux, produits textile, poussières). 	

<p>Hélicoïde</p>	<ul style="list-style-type: none">• Ventilateur dit «axial».• Direction d'écoulement essentiellement axiale.• Nb d'aubes entre 2 et 60 Unités.• Rendement de 40 à 90%.	
-------------------------	---	--

➤ Conception d'un model en CATIA :

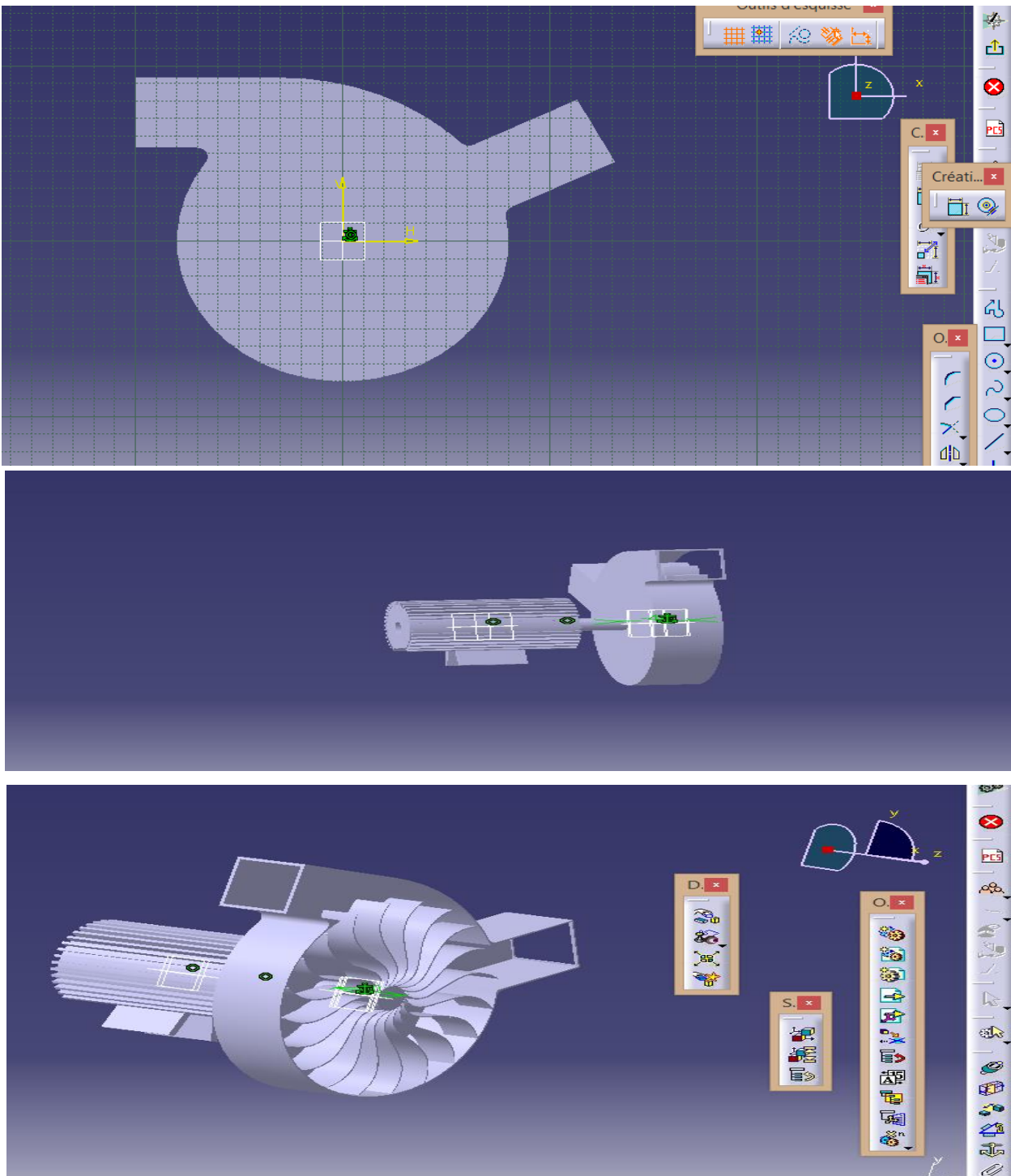


Figure 37:conception d'un module de ventilateur en CATIA.

1.1.2. Présentation de l'appareil.

➤ Surveillance de la machine :

Maintenant, les utilisateurs débutants et les experts peuvent facilement, rapidement et avec précision vérifier l'état de l'équipement rotatif dans l'ensemble de votre installation. L'équipement de votre personnel de maintenance et d'exploitation avec cet instrument robuste, ergonomique et facile à utiliser peut fournir un préavis des problèmes potentiels de la machine avant qu'une défaillance coûteuse ne se produise.

➤ Caractéristiques :

- Rapide et facile à configurer, les mesures sont affichées sur un affichage lumineux visible en faible lumière vers la lumière directe du soleil.
- Léger, compact et ergonomique, le SKF Machine Condition Advisor s'adapte parfaitement à la ligne de ceinture, dans une poche ou une trousse à outils. Exceptionnellement durable.
- Cet appareil permet de mesurer les vibrations et la température très vite (économiser le temps).
- Efficace, économique et respectueuse de l'environnement, la charge rechargeable elle fonctionne 10 heures sur une seule charge.

Caractéristiques anglais, français, allemand, portugais, espagnol et suédois pour la commodité de l'utilisateur.



Figure 38 :le SKF Machine Condition Advisor.



Figure 39:les différents paramètres de l'appareil.

1
:
v
i
b
r
a
t
i
o

- n.
- 2: Rapidité.
- 3: Affichage de l'alarme.
 - (A) Alert.
 - (D) danger.
- 4 : Groupe de machines ISO.
- 5 : bouton de sélection.
- 6 : Parcourir le bouton.
- 7 : température.
- 8 : Statut de mesure.
- 9 : Classe d'accélération enveloppée.
- 10 : Indicateur de batterie.

1.1.3. Capteur de Vibration Utilisé (accéléromètre)

On utilise comme type de capteur de genre – Piézoélectrique – accéléromètre car ce type fourni plus d'avantages, on peut extraire l'accélération, la vitesse et le déplacement au même temps.

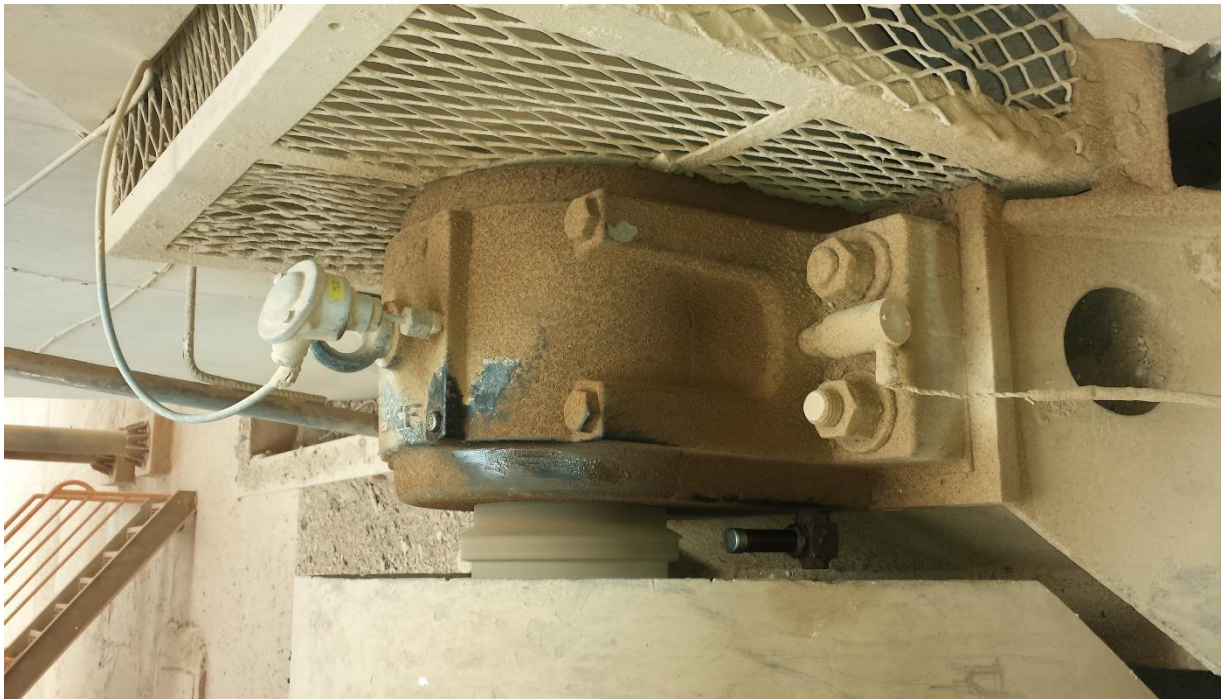


Figure 40: capteur de vibration utilisée.

1.2 Etape 2 :

1.2.1 Mesurer.

➤ Objectif :

L'objectif de cette analyse vibratoire des machines ventilateurs DOPOL et BK4 est la détection des différents problèmes ainsi que leurs origines afin de les réparer en gagnant du temps et en diminuant le coût des organes à changer.

➤ Principe de fonctionnements des ventilateurs DOPOL :

Les ventilateurs DOPOL situés juste après le four rotatif. Son rôle est de tirer les gazes chaudes à partir du four vers le broyeur cru.



Figure 41: ventilateurs DOPOL.

➤ Principe de fonctionnements des ventilateurs BK4 :

Le ventilateur BK4 située juste après le broyeur ciment: Son rôle est de tirer la poussière à partir du broyeur ciment vers le filtre avec manches.



Figure 42: ventilateur BK4.

A. Point de mesure :

Le nombre de points de mesures sur une machines dépend du nombre de paliers. Les ventilateurs DOPOL et BK4 contient 4 paliers pour chaque ventilateur (Deux palier moteur et deux paliers pour le ventilateur), la mesure de l'amplitude de vibration s'effectue selon trois axe : radial, axial et horizontal.

B. Les caractéristiques techniques des ventilateurs DOPOL et BK4.

	DOPOL VEN 1	DOPOL VEN 2	VEN BK4
Type	HF4S285 3TS8A	DHRV 56E-2000/K	DHRV 45S-1400 / K
Vitesse maximal	24.60 m/s	25.55 m/s	103 m/s
Température maximal	330°C	213.22°C	88 °C
Puissance	499.84 KW	558.84 kW	1.202 kW
Masse	14.596 kg	15.695 kg	14.215 kg
Débit	79.25 m ³ /S	592.000Am ³ /H	420.000Am ³ /H
Pression	85.458 Pa	95.539 Pa	8.265 Pa

C. Suivi d'état des ventilateurs :

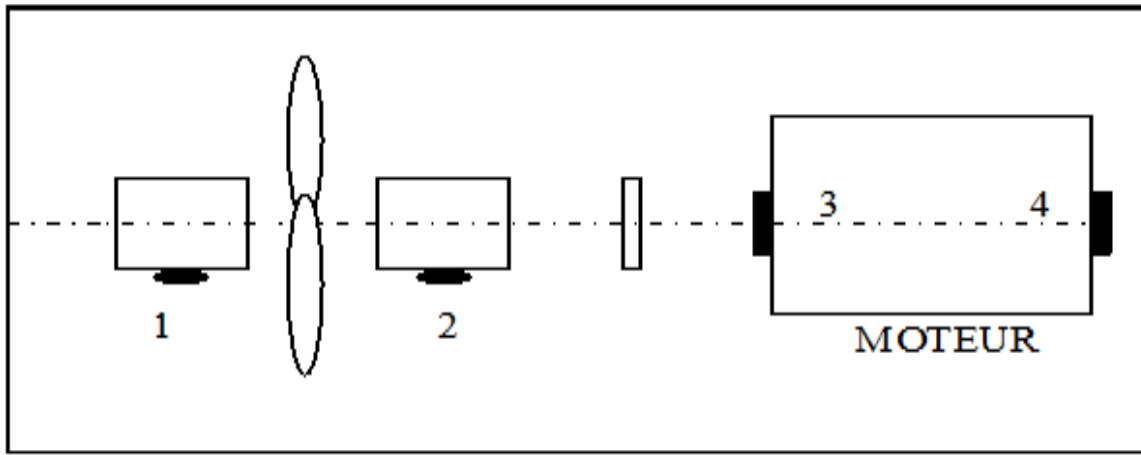


Figure 43: point de mesure pour un ventilateur.

V:verticale; H: horizontale; A:axial

T:température

date	Mesure sur palier coté moteur (mm/s)				Mesure sur palier coté turbine (mm/s)			
	T°(c)	V	H	A	T°(c)	V	H	A
06/02/2017	41	1.8	2.2	2.1	44	0.9	1.3	1.2
13/02/2017	39	0.8	1.8	1.9	42	1.3	1.4	0.8
20/02/2017	38	0.9	1.8	1.5	45	1.4	0.9	3.2
24/02/2017	40	1.3	1.3	2.9	46	1.5	1.2	1.5
06/04/2017	38	1.5	0.9	2.4	44	2.1	1.5	1.6
12/04/2017	39	0.8	2.1	1.3	45	1.4	1.6	1.4
20/04/2017	50	1.6	2.1	2.4	49	1.2	1.3	1.1

Tableau 6:suivi des vibrations de ventilateur DOPOL 1.

date	Mesure sur palier coté moteur (mm/s)				Mesure sur palier coté turbine (mm/s)			
	T°(c)	V	H	A	T°(c)	V	H	A
06/02/2017	41	1.7	2.2	2.1	42	0.9	1.3	1.2
13/02/2017	39	0.9	1.8	1.9	50	1.3	1.4	0.8

20/02/2017	38	0.9	1.8	1.4	45	2.4	0.9	3.2
24/02/2017	41	2.3	1.3	2.9	46	1.5	1.4	1.5
06/04/2017	38	1.5	0.9	2.4	44	2.1	1.5	1.3
12/04/2017	40	0.7	2.2	1.5	45	1.4	1.6	1.2
20/04/2017	50	1.6	2.1	2.4	49	1.2	1.3	1.3

Tableau 7: suivi des vibrations de ventilateur DOPOL 2.

date	Mesure sur palier coté moteur (mm/s)				Mesure sur palier coté turbine (mm/s)			
	T°(c)	V	H	A	T°(c)	V	H	A
06/02/2017	45	1.7	2.2	2.1	44	0.3	1.3	1.2
13/02/2017	39	0.8	1.5	1.9	42	1.2	1.4	0.8
20/02/2017	38	0.9	1.8	1.5	45	1.5	0.9	3.2
24/03/2017	40	1.3	1.3	2.9	46	1.5	1.2	1.5
06/04/2017	38	1.5	0.9	2.4	44	2.1	1.5	1.6
12/04/2017	39	0.8	2.1	1.3	45	1.4	1.3	1.4
20/04/2017	40	1.6	2.1	2.4	42	1.2	1.3	1.1

Tableau 8: suivi de vibration de ventilateur BK4.

D'après les résultats mentionnés sur les tableaux 6,7 et 8 en comparaison avec la norme ISO 10816.

Nous constatons ce qui suit :

- ✚ Les niveaux vibratoires globaux relevés sur les paliers du moteur et les paliers des

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71			good
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80			satisfactory
	0.18	4.50			
	0.28	7.10			unsatisfactory
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0			unacceptable
1.10	45.0				

ventilateurs sont dans la norme c'est à dire que la machine est en bonne état.

Figure 44: Critères vibratoires de sécurité selon la norme "ISO10816".

1.2.2 Etude de cas du ventilateur 525.

A. Les caractéristiques techniques du ventilateur 525

Type	CUE 1 38 1120 RD 045 ADX-STD
Vitesse maximal	2490 tr/min
Température maximal	20 C
Puissance	126.96 KW
Masse	1928.00 kg
Débit	8.20 m ³ /s
Pression	88788 Pa

Tableau 9: caractéristique technique du ventilateur 525..

Le ventilateur 525 contient huit paliers

- Deux pour le moteur
- Deux pour l'arbre de transmission
- Quatre pour le ventilateur.

✚ Paliers moteur 1AX .1RH.1RV ; 2AX .2RH .2RV.

✚ Paliers arbre de transmission 3AX.3RH.3RV; 4AX.4RH. 4RV.

✚ Paliers ventilateur 5AX.5RH.5RV ; 6AX.6RH.6RV; 7AX.7RH.7RV 8AX.8RH.8RV.

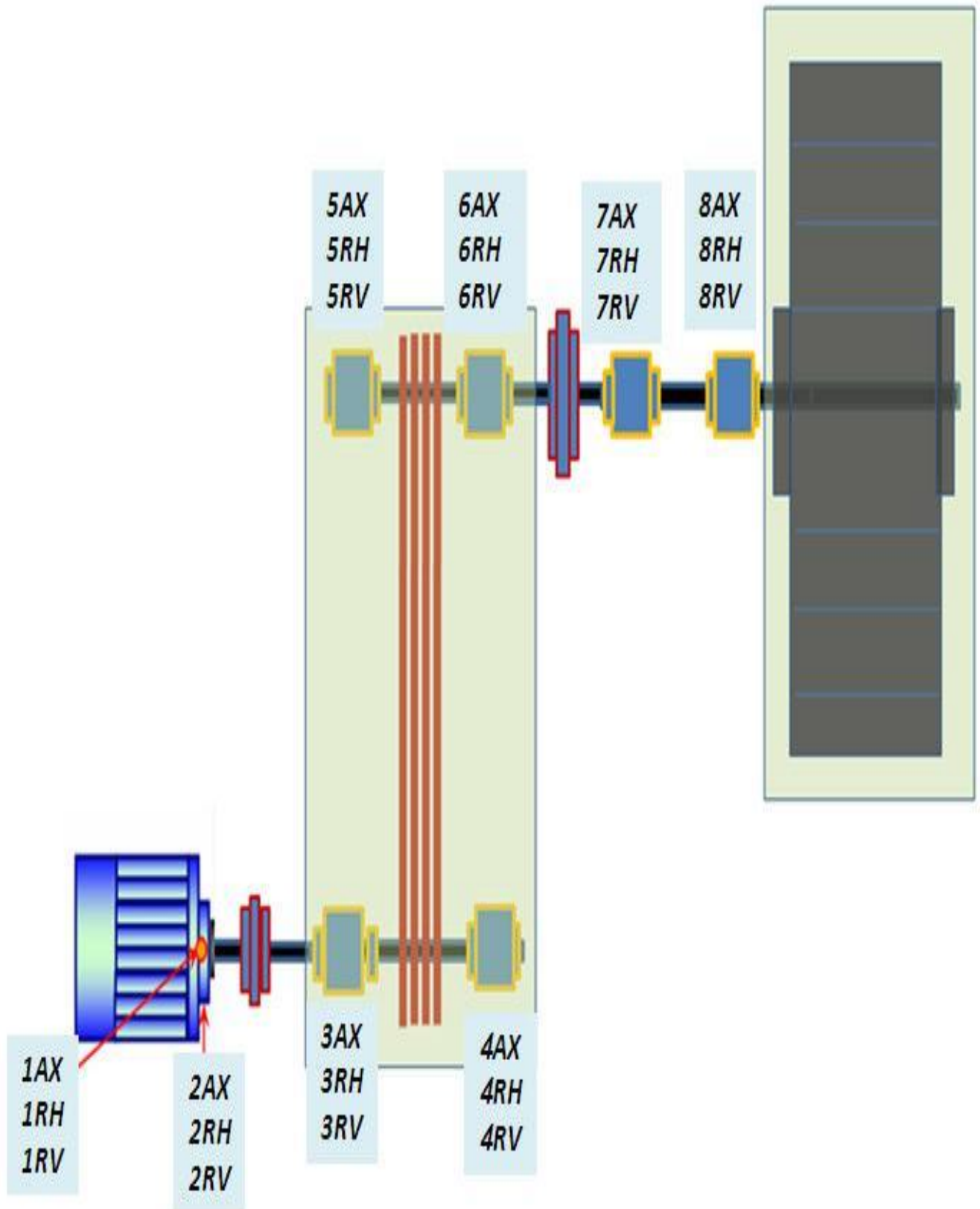


Figure 45 :Schéma synoptique du ventilateur 525

Désignation	Organe	TYPE MARQUE	Vitesse Rot Puissance	Fréquence Hz
Moteur		MEUM 355Lp4 CEM	1485 Tr/ mn 230KW	24.75 Hz
Paliers Ventilateur	Palier3		1860 Tr/min	31 Hz
	Palier4		1860 Tr/min	31 Hz
Courroies Référence SN 520 Nombre de courroies: 6	Diamètre poulie Moteur	500 Mm	31 Hz	Fréquence Passage Courroies 8.759 Hz
	Diamètre poulie Ventilateur	400 Mm	31Hz	

Tableau 10:Fréquences du ventilateur et moteur.

✚ La fréquence du palier moteur :

$F_m = N/60$; avec N:vitesse de rotation (Tr/min);

$$F_m = 1485/60 = 24.75 \text{ Hz}$$

✚ La fréquence des paliers ventilateur :

$$F_v = 1860/60 = 31 \text{ Hz}$$

✚ La fréquence de passage de courroies :

$$F_C = (D_1 \pi) * f_1 / L = (D_2 \pi) * f_2 / L$$

Avec : F_C : Fréquence de passage de la courroie.

D_1 et D_2 : Diamètres des poulies 1 et 2.(mm)

f_1 et f_2 : Fréquences de rotation des poulies 1 et 2.(Hz)

L : Longueur de la courroie. (Mm)

$$F_c = (500 * 3.14) * 24.8 / 4445 = (400 * 3.14) * 31 / 4445 = 8.759 \text{ Hz} ;$$

1.3 Etape 3 :

1.3.1 Analyser :

➤ Dans cette étape on va analyser les résultats de ventilateur 525 :

i. 1'analyse en niveau global : (Paliers : Moteur et poulies de transmission)

Paliers	Paliers moteur			Paliers des Poulies de					
	2AX	2RH	2RV	3AX	3RH	3RV	4AX	4RH	4RV
NG Accélération (g)	0.35	0.5	0.71	2.35	2.5	2.91	1.9	2.1	1.8
NG Vitesse (mm/s)	4.10	7.8	9.8	5.40	10.4	6.72	4.8	8.3	5.4
Facteur Défaut Roulement	2.55	2.85	2.78	7.15	5.85	6.12	6.5	5.85	5.6

Tableau 11:Présentation des résultats de mesures effectuées.

Nous constatons ce qui suit :

- Les niveaux vibratoires globaux relevés sur les paliers du moteur et les poulies de transmission sont élevés en horizontal et vertical ;
- l'état des roulements est acceptable. (le seuil d'alarme du facteur défaut roulement est 7.2, et celui danger est fixé à 9.0).

ii. Pour avoir plus de détails nous passons à l'analyse spectrale :

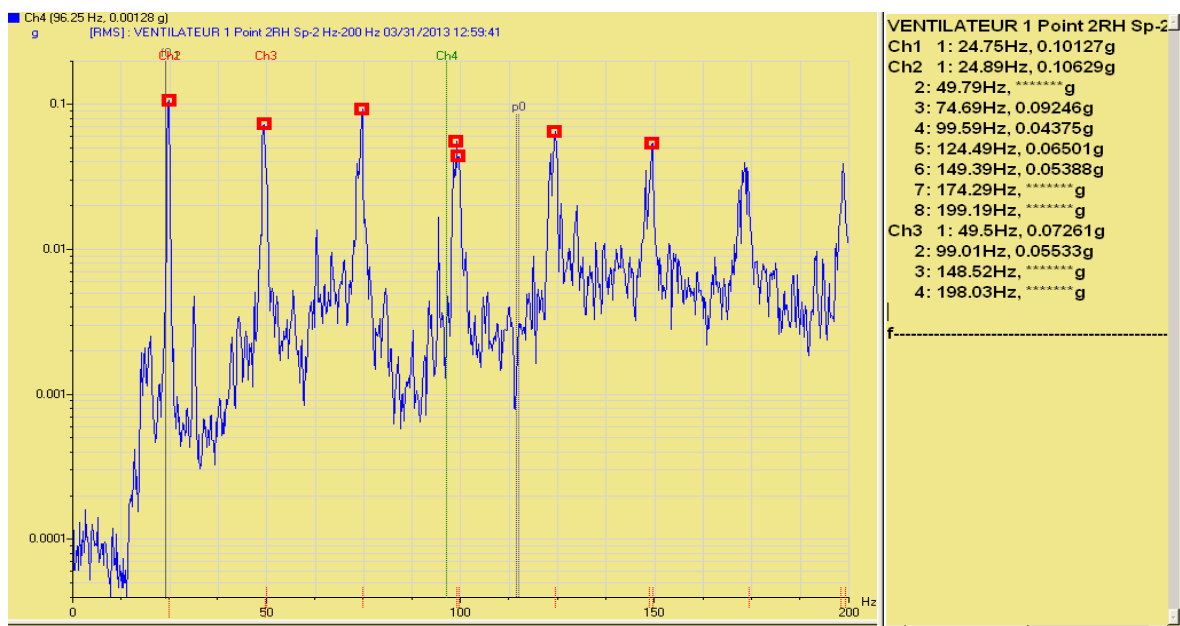


Figure 46:Spectre du palier moteur.

ii
nte
rpr
éta
tio
n :

Sur cette figure sont représentés les spectres en

fréquence [0-200Hz] du signal délivré par un accéléromètre fixé sur le palier n°1 et n°2 du moteur de ventilateur 525.

Dans les trois sens, axial, radial et horizontal, nous voyons clairement l'importance de l'amplitude à la fréquence de rotation (24.75Hz) et l'importance de l'amplitude à 3Fr (74.69Hz).

Selon le spectre nous constatons un phénomène de chocs à la fréquence de rotation moteur ce qui met en évidence l'état et la tension des courroies provoquant ainsi le phénomène de battement à la fréquence de rotation moteur.

Ceci s'explique par : Lorsqu'une ou plusieurs courroies (6courroie dans notre cas) sont insuffisamment tendues, il peut se produire un phénomène de battement visible sur le spectre, crée par des fréquences de passage des courroies ($F_c=8.759$ Hz, $2F_c=17.518$ etc ...) différentes et très proches les unes des autres. Ces différences sont produites par un glissement plus ou moins important selon la tension exercée sur les courroies.

Le problème déalignement entre deux poulies est la principale cause de défaillance et d'usure des courroies.

iv. Proposition et actions préconisées :

- Corriger l'Alignement des poulies et la tension des courroies; Voir leur changement.
- Contrôler l'état des poulies et des accouplements.

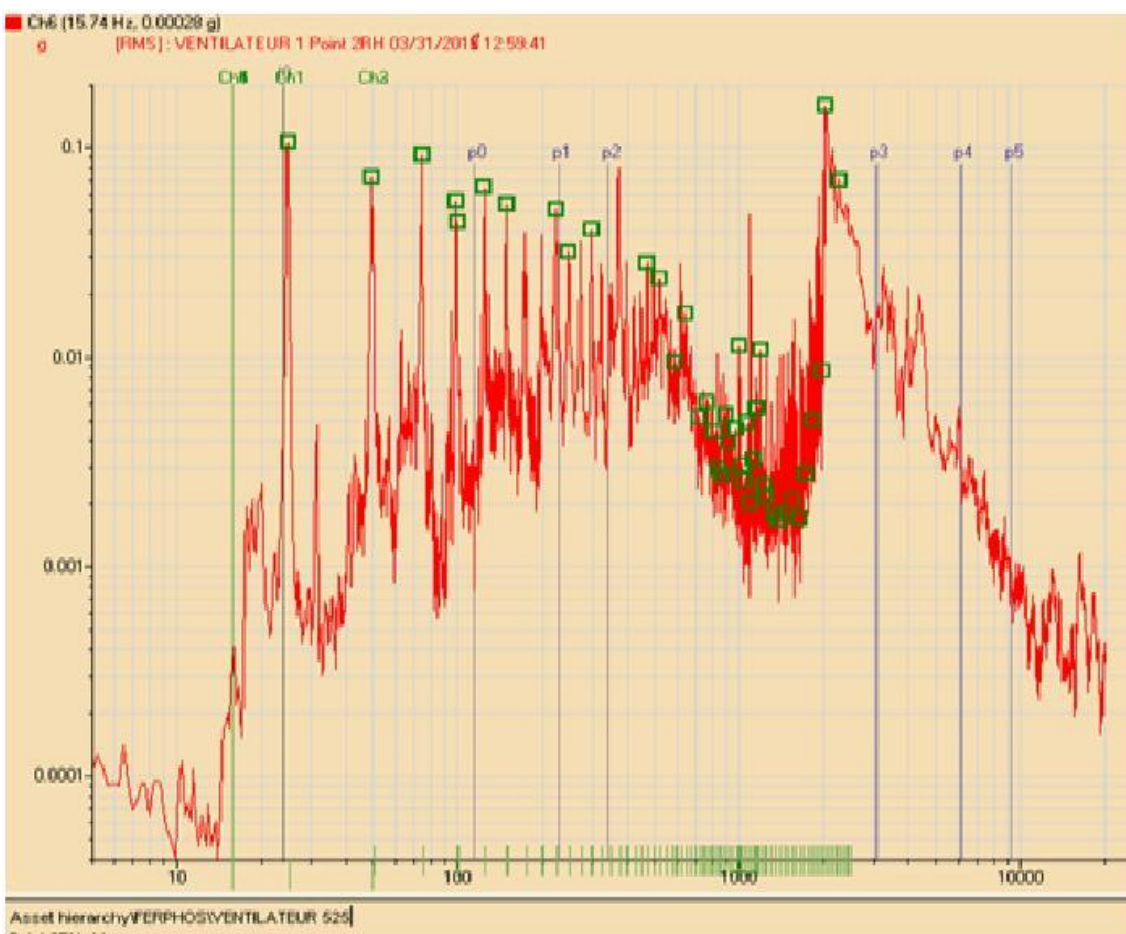


Figure 47: Spectre au point 4RH.

Interprétation des spectres en fréquence du palier mote 4RH

ur (Figure.39). Il représente les spectres en fréquence [600-1400 Hz] du signal délivré par un

accéléromètre fixé sur le palier 4RH du moteur de ventilateur 525; dans les trois sens, horizontal du palier 4RH, nous voyons clairement l'importance de l'amplitude à ces fréquences cause de la charge importante sur les roulements moteur suite aux phénomènes de battement provoqués par le défaut de transmission des courroies.

A. Analyse en Niveau Global (Paliers arbre d'entraînement ventilateur) :

PALIER arbre Ventilateur	6AX	6RH	6RV	7AX	7RH	7RV	8AX	8RH	8RV
NG Accélération (g)	1.7	1.9	3.2	3.3	4.4	6.2	5.5	6.1	8.6
NG Vitesse (mm/s)	6.1	3.4	2.9	5.2	15.9	3.5	5.5	24.2	25.4
Facteur défaut roulement	5.8	2.8	6.5	7.6	8.04	7.3	7.3	8.1	8.9

Tableau 12 : Présentation des résultats de mesures effectuées

Les niveaux vibratoires relevés sur les paliers de l'arbre d'entraînement ventilateur sont élevés au niveau des deux paliers ventilateur (points 7 et 8) selon la norme ISO 10816 avec apparition d'un défaut des roulements provoqué par les phénomènes vibratoires suscités.

Nous remarquons aussi que le facteur défaut roulement est élevé (7.6, 8.04, 7.3, 7.3, 8.1, 8.9).

B. Analyse des Spectres relevés sur le palier ventilateur.

Le spectre de la (Figure 40) fait ressortir un défaut de turbine alarmant se traduisant par un balourd très élevé à la fréquence de rotation turbine 31.47 Hz .ce qui nécessite une opération d'équilibrage et de correction des défauts de voilage turbine.

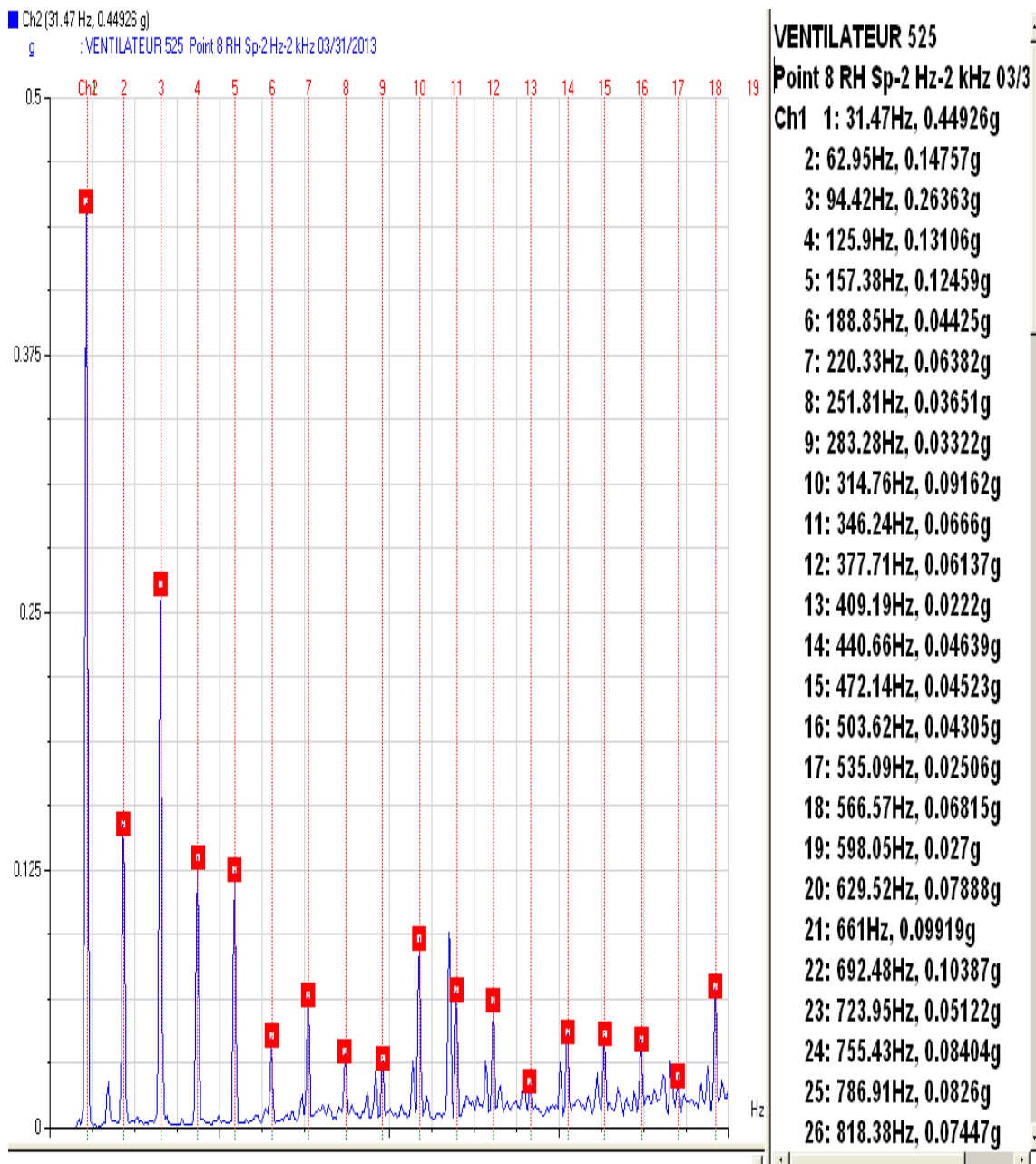


Figure 48: Spectre de palier arbre ventilateur.

Conclusion :

Le comportement vibratoire du ventilateur 525 a atteint un seuil de danger ce qui peut causer de graves défaillances des organes de l'équipement tels que: les paliers roulement du moteur et de l'arbre de transmission ainsi que la déformation des arbres (arbre transmission moteur et arbre turbine).

Afin d'éviter ces défaillances, bien rétablir le bon état du ventilateur et lui assurant de bonnes conditions de fonctionnement pour une meilleure disponibilité il est impératif de programmer dans les meilleurs délais les actions préconisées ci-dessous :

- Contrôle de l'état des courroies voir leur changement.
- Contrôle de l'état des accouplements et des poulies.
- Régler la tension des courroies.

- Vérification et nettoyage des pales de la turbine.
- Procéder à la correction du balourd par équilibrage.
- Respecter la périodicité et les quantités d'appoints de graissage.

1.4 Etape 4

1.4.1 Innover ou Améliorer et Contrôler:

➤ Équilibrage :

- L'équilibrage ne fait, à vrai dire, pas partie de la surveillance de l'état des machines, mais déjà de l'entretien ou du montage.
- Mesure des vitesses de balourd via des capteurs d'accélération sur la machine.
- Il faut un capteur par plan d'équilibrage. En réalité, la position des capteurs est facultative.
- Sélectionner la position de sorte que le signal du plan d'équilibrage affecté soit parfaitement reçu (expérience).
- Mesure de la position angulaire et de la vitesse de rotation du rotor via un capteur de référence optoélectronique.
- Il doit être monté à un endroit visible du rotor.

➤ Maintenance préventive :

- La surveillance par l'analyse vibratoire des systèmes
- L'analyse des huiles etc....

Conclusion :

L'analyse de ces vibrations va permettre d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé de dommage irréversible. Elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance.

Chapitre 5

ETUDE AMDEC

1. Définition de l'AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser les modes de défaillances potentielles dont les conséquences affectent le bon fonctionnement du moyen de production, de l'équipement ou du processus étudié, puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives ou préventives. Cette méthodologie n'est réellement efficace qu'avec l'expérience, il faut donc se renseigner en profondeur auprès des personnes compétentes.

2. Type d'AMDEC

Globalement il existe trois types d'AMDEC :

AMDEC procédé : on identifie les défaillances du procédé de fabrication dont les effets agissent directement sur la qualité du produit fabriqué (les pannes ne sont pas prises en compte).

AMDEC machine (ou moyen) : on identifie les défaillances du moyen de production dont les effets agissent directement sur la productivité de l'entreprise. Il s'agit donc de l'analyse des pannes et de l'optimisation de la maintenance ;

AMDEC Produit : elle est utilisée pour évaluer les défauts potentiels d'un nouveau produit et leurs causes.



3. Analyse de défaillance

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.

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-famille.

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

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

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.

4. 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.

✚ 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.

Niveau	valeur	définition
Mineure	1	- arrêt de production : moins de 15 minutes - aucune ou peu pièce de rechange nécessaire
Moyenne	2	- arrêt de production : de 15 minutes à une heure - pièces en stock
Majeure	3	- arrêt de production : 1 heure à 2 heures - pièces en stock ou livraison ultra-rapide
grave	4	- arrêt de production : 2 heures et plus - long délai de livraison

Tableau 13:Grille de l'échelle de gravité.

✚ La fréquence :

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

niveau	valeur	définition
très faible	1	défaillance rare : moins de une défaillance par année
faible	2	défaillance possible : moins de une défaillance par trimestre
moyen	3	défaillance occasionnelle : moins de une défaillance par semaine
élevé	4	défaillance fréquente : plus de une défaillance par semaine

Tableau 14 : Grille de l'échelle de fréquence.

✚ La non-détection :

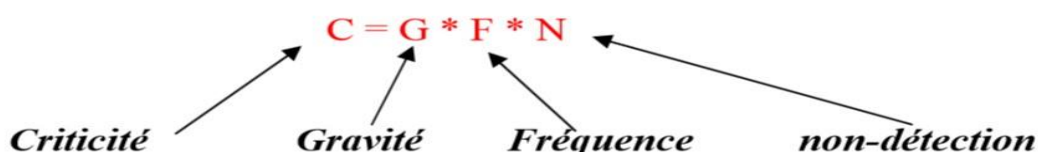
Elle exprime l'efficacité du système permettant de détecter le problème.

niveau	Valeur	définition
évident	1	détection certaine, sirène, moyens automatiques, signes évidents
possible	2	délectable par l'opérateur, par des routes d'inspections, vibrations
improbable	3	difficilement détectable, moyens complexes (démontages, appareils)
impossible	4	indétectable, aucun signes

Tableau 15 : Grille de l'échelle de non détection.

✚ 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

$$C = G * F * N$$


Criticité ← $C = G * F * N$ ← *Gravité* ← *Fréquence* ← *non-détection*

calculer la criticité.

valeurs	Définition
1-6	Négligeable
8-18	Moyenne
24-36	Elevée
48-64	interdit

5. Démarche pratique de l'AMDEC :

La réalisation d'une AMDEC suppose le déroulement de la méthode comme suit :

- ✓ La constitution d'un groupe de travail.
- ✓ Décomposition fonctionnelle de la machine.
- ✓ L'analyse des défaillances potentielles.
- ✓ L'évaluation de ces défaillances et la détermination de leur criticité.
- ✓ La définition et la planification des actions.

6. APPLICATION :

6.1 Etude du système ventilateur :

6.1.1 Description :

Les ventilateurs sont des turbomachines transférant à l'air qui les traverse l'énergie nécessaire afin de véhiculer l'air au travers d'une paroi (ventilateur de paroi), dans une ou plusieurs conduites ou bien permettant de balayer un espace (local) assurant ainsi une homogénéisation de l'air .

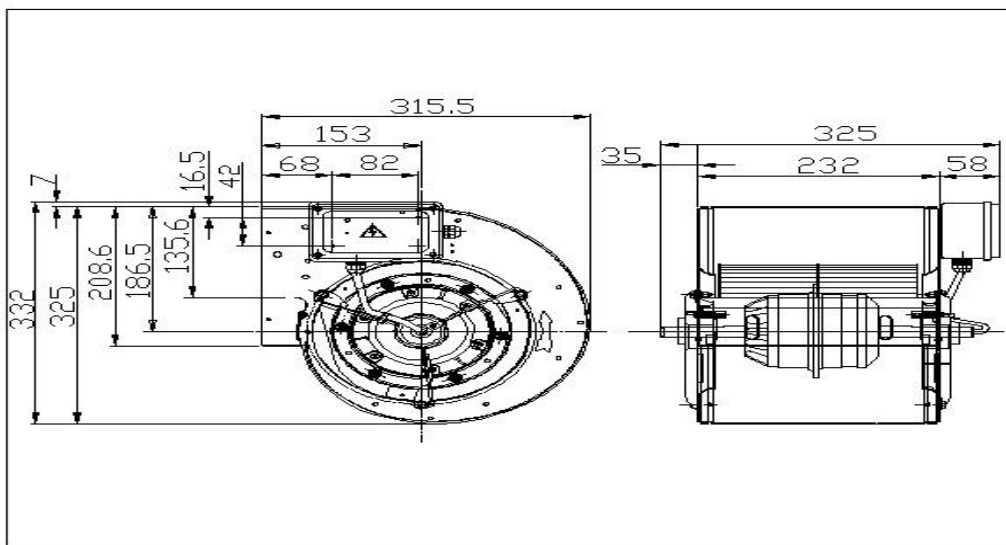
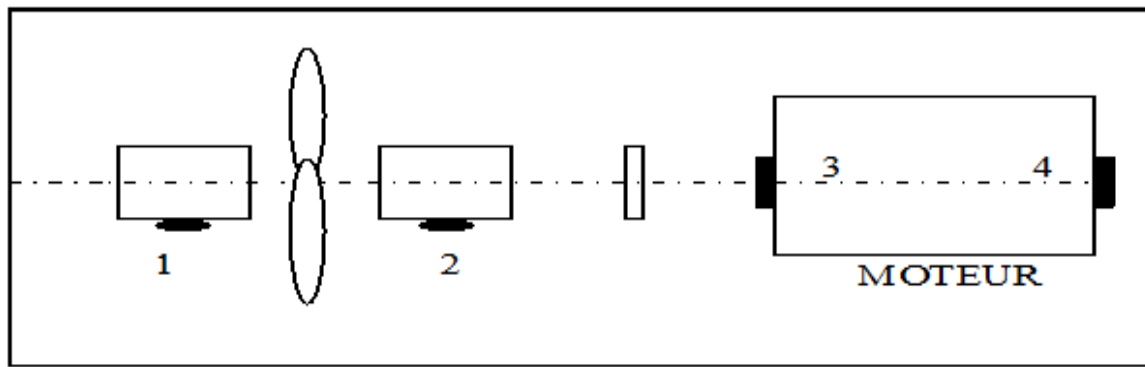


Figure 49 : schéma ventilateur.

6.1.2 Décomposition fonctionnelle :

Le système ventilateur est composé de deux systèmes :

- Roue centrifuge : la roue de ces ventilateurs comprend un nombre important d'aubes de faible hauteur. Elles sont inclinées dans le sens de rotation de la roue.
- Moteur électrique : Les moteurs à rotor extérieur sont largement répandus dans le domaine de la ventilation. Comme le bobinage se trouve dans le cœur du moteur, il est en règle générale nécessaire de restreindre sa taille. Le rotor extérieur tourne autour du stator qui lui reste fixe. Ceci présente un avantage pour la construction, car la roue du ventilateur peut être fixée directement sur le moteur.



6.1.3 Identification des modes de défaillances :

La liste des défaillances constatées sur les ventilateurs depuis sa mise en service est présentée comme suit :

- ☞ Vibration excessive.
- ☞ Bruits excessive.
- ☞ Arrêt de rotation.
- ☞ Déformation des billes.
- ☞ Courts circuits bobinage.
- ☞ Surchauffe.

6.1.4 Recherche des causes

Il s'agit dans cette étape de chercher les causes possibles de défaillance pour chaque mode de défaillance identifié.

6.1.5 Tableau d'analyse AMDEC :

Dans le tableau AMDEC, nous noterons seulement les causes principales de défaillance et les effets les plus graves qui leur sont correspondants en définissant pour chacun de ces modes de défaillance leur criticité.

ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE, DE LEURS EFFETS ET DE LEURS CRITICITÉ									
système		ventilateurs dopol et bk4							
element	fonction	mode de défaillance	cause	effet	mode de detection	F	G	N	C
ROUE	faire circulaire l'aire chaud	VIBRATION EXCESSIVE	UTILISATION NON-CONFORME	DIMINUTION DE L'EFFICACITÉ		2	3	2	12
			INSTALLATION DÉFECTUEUSE	TRANSMISSION DES VIBRATIONS AU AUTRES MACHINES/TRAVAILLEURS					
			mauvaise design		AUGMENTATION DES COÛTS DE MAINTENANCE				
			JEU MÉCANIQUE DES BOULONS DE MONTAGE, ROULEMENTS OU ACCOUPLEMENT						
			MISALIGNEMENT DES ACCOUPLEMENTS OU DES ROULEMENTS						
			USURE EXCESSIVE DES ACCOUPLEMENTS OU DES ROULEMENTS						
			MISALIGNEMENT OU MAUVAIS BALANCEMENT DU MOTEUR						
			ACCUMULATION DE MATERIEL SUR LE ROUE						
USURE EXCESSIVE DE LA ROUE									

			UTILISATION NON-CONFORME	POLLUTION PAR LE BRUIT	VIBRATIONS	2	2	2	8		
		BRUITS EXCESSIFS	MAUVAISE MAINTENANCE	DIMINUTION DE RENDEMENT	OREILLE						
			MAUVAISE EMPLACEMENT OU ORIENTATION DE L'ENTRÉE OU DE LA SORTIE DU VENTILATEUR								
			VIBRATION SYSTEME								
			ROULEMENTS USÉS								
		ARBRE TORDU	SURCHAUFFE	VIBRATIONS	VERIFICATION DE BALENCEMENT	1	4	3	12		
			DEFAUT DE FABRICATION	FISSURES DANS L'ARBRE							
		ARRET DE ROTATION	MOTEUR ARRETE	ARRET DE PRODUCTION		1	4	1	4		
PALIER	SUPPORTENT UNE CHARGE	VIBRATION MAJEUR OU PROLONGES	MAUVAISE MAINTENANCE	USURES DES COMPOSANTS	ANALYSES DES VIBRATIONS	2	3	2	12		
	MAINTIENT DE L'AXE		UTILISATION NON-CONFORME							ECOUTE DES MACHINES	
			MOUVAISES LUBRIFICATION								LUBRIFICATION ROUTINIERS
			MAUVAIS CHOIX DES ROULEMENT								
			MAUVAISE ROULEMENT DE REMPLACEMENT								
			MISALIGNEMENT OU DOMMAGES PHYSIQUES AUX								
			COMPOSANTES EN ROTATION OU AUX								
			MAUVAIS BALENCEMENT DES COMPOSANTES EN ROTATION								
			ELEMENTS ABRASIFS /CORROSIFS DANS L'AIR OU								
		DÉFORMATION DES BILLES/ROULEAUX	SURCHARGE	PERTE DE PERFORMANCE	AUGMENTATION DES VIBRATIONS	1	1	2	2		
			SURCHAUFFE								
			MAUVAISE LUBRIFICATION								
			USURE								

		BRIS DE LA CAGE	SURCHAUFFE	PERTE DE PERFORMANCE	AUGMENTATION DES VIBRATIONS	2	2	2	8
			VIBRATIONS PROLONGÉ						
		GRIPPAGE INTERNE DES COMPOSANTES	SURCHAUFFE	PANNE	ANALYSE DES VIBRATIONS	2	3	2	12
			MAUVAISE LUBRIFICATION						
MOTEUR(bobinage)	CRÉE LE CHAMP MAGNÉTIQUE NÉCESSAIRE À LA ROTATION DU MOTEUR	COURT-CIRCUIT BOBINAGE	MAUVAIS CONTACT	ARRÊT DE ROTATION DU MOTEUR	DIMINUTION DU COUPLE	1	4	3	12
			SALETÉ						
			MAUVAIS NETTOYAGE						
			FIL CHAUFFE						
			SURCHARGE DU MOTEUR						
			MAUVAIS ISOLANT						
			FONCTIONNEMENT SUR UNE PHASE						
			PROBLÈMES DE VOLTAGE						
		HUMIDITÉ							
		MAUVAIS CONTACT	MAUVAISE INSTALLATION	BRIS DU BOBINAGE	INSPECTION DES INSTALLATIONS DE NOUVEAUX MOTEURS	1	4	1	4
MAUVAIS ISOLANT									
SURCHAUFFE	COURANT INCORRECT	PERTE DE PERFORMANCE		1	4	1	4		
	SURCHARGE DU MOTEUR								
	HUMIDITÉ								

MOTEUR(ROULEMENT)	SUPPORTENT UNE CHARGE MAINTIEN DE L'AXE	VIBRATION MAJEURE OU PROLONGÉE	MAUVAISE MAINTENANCE	USURE DES COMPOSANTES	ANALYSE DES VIBRATIONS	1	4	1	4
			UTILISATION NON-CONFORME		ÉCOUTE DES MACHINES				
			MAUVAISE LUBRIFICATION		LUBRIFICATION ROUTINIÈRE				
			MAUVAIS CHOIX DE ROULEMENTS						
			MAUVAIS ROULEMENT DE REMPLACEMENT						
			MISALIGNEMENT OU DOMMAGES PHYSIQUES AUX						
			MAUVAIS BALANCEMENT DES COMPOSANTES EN ROTATION						
			ROULEMENT NON APPROPRIÉ POUR LA						
			ELEMENTS ABRASIFS /CORROSIFS DANS L'AIR OU						
			DÉFAUTS DE FABRICATION						
	DÉFORMATION DES BILLES/ROULEAUX		SURCHARGE	PERTE DE PERFORMANCE	AUGMENTATION DES VIBRATIONS	1	1	2	2
			SURCHAUFFE	BRIS DU ROULEMENT					
			MAUVAISE LUBRIFICATION						
			IMPACT						
			USURE						
	BRIS DE LA CAGE		SURCHAUFFE	PERTE DE PERFORMANCE	AUGMENTATION DES VIBRATIONS	2	2	2	8
VIBRATIONS PROLONGÉ									
VITESSE DE ROTATION NON-APPROPRIÉE									
SURCHAUFFE		MAUVAISE LUBRIFICATION	USURE PRÉMATURÉ		1	4	1	4	
		SURCHARGE	PERTE DE PERFORMANCE						
		MISALIGNEMENT							
		VITESSE DE ROTATION NON-APPROPRIÉE							



L'application de l'analyse AMDEC pour l'étude de nos équipements permis de mettre en évidence les modes, les causes et les effets des défaillances de ces équipements.

Ainsi, pour diminuer le niveau de criticité de chaque combinaison cause / mode / effet, nous allons proposer des actions correctives.

	Mode de défaillance	Criticité	Action correctives
Roue	Vibration excessive	12	Nettoyage de la roue Et vérification d'alignement
	Bruits excessive	8	Vérification des paramètres d'opération
	Arbre tordue	12	Lubrification régulier
	Arrêt de rotation	4	Lubrification régulier
Palier	Vibration majeur ou prolonges	12	Procédure d'installation roulement
	Déformation des	2	Lubrification régulier

	billes/rouleaux		
	Brise de la cage	8	Lubrification régulier
	Grippage interne des composantes	12	Diminution des vibrations
Moteur (bobinage)	Court-circuit bobinage	12	Contrôles qualité sur les nouveaux moteurs
	Mauvais contact	4	Procédure d'installation d'un moteur.
	Surchauffe	4	Lubrification régulier
Moteur (roulement)	Vibration majeur ou prolonges	4	Lubrification régulier et Procédure d'installation roulement
	Déformation des billes/rouleaux	2	Lubrification régulier
	Brise de la cage	8	Diminution de vibration

Tableau 16:Tableau des actions correctives.

6.1.6 Synthèse

L'étude AMDEC est une recherche longue mais fructueuse lorsqu'elle est complète. Un département de maintenance peut par la suite clairement identifier ses priorités et où concentrer ses énergies. De plus, l'étude AMDEC facilite le diagnostic de bris quelconques.

La mise en place de routes d'inspection des équipements est souhaitable. De cette façon, il est possible de percevoir l'évolution d'un problème.

De plus, une procédure d'installation des moteurs électriques permettrait de s'assurer que les fils ont un bon contact et que le moteur est bien fixé.

Aussi une vérification de l'alignement et du balancement des équipements critiques est de mise.

Il pourrait avoir des critères de balancement et d'équilibrage selon la criticité des machines. Un mauvais alignement ou un mauvais balancement sont souvent les sources de problèmes.

Suite aux recommandations AMDEC, on doit être en mesure d'effectuer un suivi de nos équipements.

7. Diagramme d'Ishikawa

Pour identifier les causes possibles de la défaillance des éléments critiques, on va opter pour le diagramme d'Ishikawa.

Présentation de l'outil utilisé : Diagramme d'Ishikawa ou 5M

Le diagramme d'Ishikawa est un outil qui permet d'identifier les causes possibles d'un effet constaté et donc de déterminer les moyens pour remédier.

Cet outil se présente sous la forme d'arêtes de poisson classant les catégories de causes inventoriées selon la loi des 5M (Matière, Main d'œuvre, Matériel, Méthode, Milieu).

Les catégories de causes commencent toutes par la lettre M :

Matériel: machines, outils, équipements...

Main d'œuvre: directe, indirecte, motivation, formation, absentéisme, expérience, problème de compétence...

Milieu: environnement physique, lumière, bruit, poussière, aménagement, température...

Méthode: instructions, manuels, procédures, modes opératoires utilisés...

Matières: c'est tout ce qui est consommable (les matières premières, les fluides, les énergies).

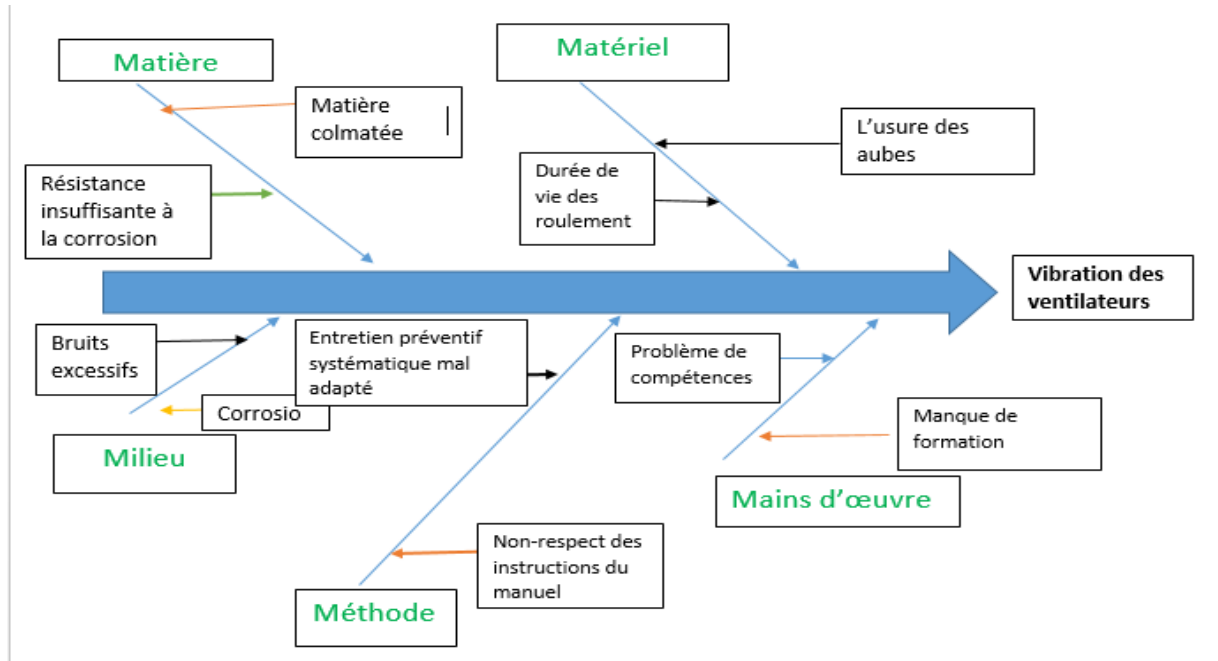


Figure 50:diagramme d'Ishikawa.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Une entreprise doit exploiter ses équipements d'une manière efficace dans le but d'améliorer la qualité et le coût du produit et augmenter aussi la production. Une bonne gestion de la maintenance des équipements est le meilleur moyen qui permet d'atteindre cet objectif en prenant en considération les aspects techniques, économiques et financiers des différentes méthodes utilisées. L'objectif principal de la maintenance est de réduire au minimum la défaillance des équipements pour éviter les arrêts de production.

Une analyse des vibrations est un outil puissant dans la maintenance et complexe, beaucoup plus complexe et beaucoup plus puissant qu'une simple lecture de température. Considéré comme l'un des piliers de la maintenance conditionnelle, l'analyse des vibrations est sans doute la technique la plus diversifiée, la mieux codifiée et celle qui permet, sur les machines tournantes, d'aller le plus loin dans le diagnostic.

C'est dans ce cadre que j'ai étudié la maintenance en générale et la maintenance préventive conditionnelle en particulier. La maintenance des systèmes de production n'est pas une tâche facile. Ceci exige entre autres, des ressources humaines compétentes, des outils et du matériel adapté aux équipements.

Aussi j'ai fait des études sur des ventilateurs process pour détecter et identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé de dommage irréversible. Elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance.

Finalement j'ai fait une étude AMDEC des équipements qui a permis de mettre en évidence les modes, les causes et les effets des défaillances de ces équipements.

Ainsi, pour diminuer le niveau de criticité de chaque combinaison cause / mode / effet, j'ai proposé des actions correctives.

Bibliographie

- Suivit vibration des ventilateurs.
- Documentation des ventilateurs DOPOL, BK4 et ventilateur 525.
- Analyse des Défaits des Machines Tournantes par Analyse Vibratoire.
- <http://www.technologuepro.com/Mecanique/Maintenance/Technique-de-surveillance/Etude-des-principaux-defauts.pdf>
- documentation LafargeHolcim.