

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GÉNIE ÉLECTRIQUE  
N° D'ORDRE : MI08



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : ÉLECTROMÉCANIQUE  
OPTION : MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par : YACINE FERGANI & ROUBACHE ABDELAZIZE

Intitulé

**SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC VIBRATOIRE  
DES SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr.DEFDAF MABROUK	Université de M'SILA	Président
Dr.GHEMARI ZINE	Université de M'SILA	Rapporteur
Dr.BENYETTOU LOUTFI	Université de M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le bon dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté pour réaliser ce travail et qui nous a éclairé les chemins par la lumière de son immense savoir.

Nous ne pouvons, réellement, trouver les expressions élégantes que mérite nos encadreur Dr. GHEMARI ZINE, afin de la remercier pour sa sympathie et sa patience, ses encouragements ses conseils, son aide, ainsi que pour le temps qu'il a consacré pour faire réaliser ce travail.

Ainsi nous remercions tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions par l'occasion Mr : NABIL LAIAFA chef service électromécanique de m'avoir aiguillé tout au long de stage au SOMIK.

D'autre part, nous tenons reconnaissance à Monsieur SOFIANE BOUANANI ingénieur de planning de maintenance prédictive GL1K SONATRACH à leurs aides extraordinaires.

Nous vifs remerciements à Monsieur FENINAKH SAMIH chef service maintenance GL1K d'avoir bien voulu examiner ce travail

Nous remercions également Monsieur SAMIR BOUZID pour l'intérêt d'avoir nous aidées de faire réaliser ce travail au niveau de l'entreprise SONATRACH.

Merci à mes responsables de lieu de mon travail DTDS sur leur patiences et compréhension de faire accomplir ce travail.

Merci à tout le monde

## Table des matières

### Remerciements

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux .....	III
Liste des abréviations.....	IV
Introduction Générale.....	V

### Chapitre I : les concepts de la maintenance

I.1 INTRODUCTION : .....	1
I.2 LA FONCTION MAINTENANCE : .....	2
I.2.1 HISTOIRE DE LA FONCTION MAINTENANCE : .....	2
I.2.1.1 L'ORIGINS DU TERME MAINTENANCE : .....	2
I.2.1.2 L'ÉMERGENCE DE LA NOTION DE SERVICE DE MAINTENANCE : .....	2
I.3.MAINTENANCE DEFINITION (AFNOR X 60-000 mai 2002) : .....	4
I.3.1 Objectifs de la maintenance : .....	5
3.2 DIFFÉRENTES FORMES DE MAINTENANCES : .....	5
I.3.2.1 Maintenance corrective (FD X 60-000) : .....	5
I.3.2.2 Maintenance préventive (FD X 60-000) : .....	5
I.3.2.3 Maintenance systématique . .....	6
I.3.2.4 Maintenance conditionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » : .....	7
I.3.2.5 Maintenance prévisionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » : .....	8
I.4. Les concepts de défaillance .....	8
I.4.1 Définitions de <i>Défaillance</i> (normes CEN WI 319-003).....	8
I.4.2 Modes de défaillance : .....	8
I.4.3 Effet de la défaillance : .....	8
4.4 Causes de défaillance .....	8
I.4.5 Classification de la défaillance .....	10
I.4.5.1 Suivant leur cause .....	10
I.4.5.2 Suivant leur degré .....	11
I.4.5.3 Suivant leur vitesse d'apparition .....	11
I.4.5.4 Mécanismes de défaillance.....	11

I.4.5.5 Défaillances mécaniques par détérioration de surface.....	11
I.4.5.6 Défaillances mécaniques par déformations plastiques.....	13
I.4.5.7 Les modes de défaillances électriques : .....	13
I.4.5.8 Défaillance chimique par corrosion .....	14
I.4.6 Analyse qualitative post défaillance .....	15
I.4.6.1 Les six éléments de connaissance d'une défaillance.....	15
I.4.6.2 Les fiches d'analyses qualitatives de défaillances .....	17
I.4.7 L'analyse quantitative des défaillances .....	17
I.4.7.1 Diagrammes de PARETO : .....	18
I.4.8 L'analyses SDF (analyse prévisionnelle de défaillances).....	20
I.4.8.1 Analyses prévisionnelles et analyses post défaillance .....	20
I.4.8.2 Le diagramme d'Ishikawa des 5 M :.....	20
I.4.8.3 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité.....	21
I.4.8.4 Arbres de défaillances.....	22
I.5. La Sûreté de Fonctionnement (Dependability).....	22
I.5.1 La fiabilité (Reliability).....	23
I.5.1.1 Les indicateurs de la fiabilité .....	23
I.5.1.2 Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité.....	24
I.5.2 La Maintenabilité (Maintainability) .....	25
I.5.2.1 Les indicateurs de la Maintenabilité.....	25
I.5.3 Disponibilité (Availability) .....	26
I.5.3.1 Les indicateurs de mesure des différents types disponibilité .....	26
I.5.4 Sécurité (Safety).....	27
I.6 CONCLUSION.....	27
<b>Chapitre II : l'approche de la maintenance conditionnelle</b>	
II.1 INTRODUCTION .....	29
II.3 PRINCIPE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE .....	31
II.3.1 MÉTHODOLOGIE DE LA MISE EN ŒUVRE .....	31
II.4 Les outils de la maintenance conditionnelle .....	32
II.4.1 ANALYSE THERMIQUE & THERMOGRAPHIE INFRAROUGE IR .....	32
II.4.1.1 Applications de la thermographie infrarouge .....	35

II.4.2 STROBOSCOPIE : .....	36
II.4.3 ANALYSE ULTRASON .....	36
II.4.3.1 Principe de détections des ultrasons.....	36
II.4.5 ANALYSES DES HUILES .....	38
II.4.6 L'analyse vibratoire.....	40
II.4.6.1 Domaine d'application pour l'analyse vibratoire .....	40
II.5 Conclusion.....	42
<b>Chapitre III : théorie de l'analyse vibratoire</b>	
III.1 INTRODUCTION.....	43
III.2.2 CARACTÉRISATIONS D'UN VIBRATION.....	43
III.2.2.1 LA FRÉQUENCE :.....	44
III.2.2.2. PÉRIODE : .....	44
III.2.2.3 RELATION ENTRE FRÉQUENCE ET PÉRIODE.....	44
III.2.2.6 RELATIONS ENTRE DÉPLACEMENT, VITESSE ET ACCÉLÉRATION .....	47
III.2. 3 LES VIBRATIONS DES MACHINES ET FACTEURS D'INFLUENCE : .....	48
III.3.1 types de surveillances :.....	52
III.4.1 Premier Partie : Mettre en place la stratégie de surveillance.....	54
III.4.2 Deuxième partie : Démarrer la surveillance .....	57
III.4.2.3 Détermination des seuils d'intervention :.....	57
III.4.2.4 Traitement et analyse des Rapport de mesure et historique des pannes .....	57
III.5.1 LA SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS VIBRATOIRES.....	58
III.5.1.1 Les indicateurs :.....	58
III.5.1.2 Seuil d'un indicateur : .....	58
III.5.2 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SCALAIRES ÉNERGÉTIQUES (ANALYSE TEMPORELLE) :.....	59
III.5.2.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « Larges bandes ».....	59
III.5.2.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites ». .....	61
III.5.3 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SPECTRAUX ET TYPOLOGIQUE.....	61
III.5.4 Les outils de surveillance .....	62
II.4.4.3 Le Kurtosis.....	63
III.6. LE SUIVI PAR DIAGNOSTIC.....	64

III.6.1 BUT DU DIAGNOSTIC.....	64
III.6.2.1 L'ANALYSE SPECTRALE (descripteurs du domaine fréquentiel) .....	64
III.6.2.2 L'ANALYSE DU SPECTRE ZOOM :.....	65
III.6.2.4 MODULATIONS (Analyse des fonctions de modulations) :.....	68
III.6.2.5 L'ANALYSE D'ENVELOPPE :.....	69
III.6.3 LES ANALYSES COMPLÉMENTAIRES SPÉCIFIQUES .....	70
III.6.3.1 L'ANALYSE DES SIGNATURES DE L'INTENSITÉ DU COURANT(MCSA) .....	70
III.6.3.2 L'ANALYSE DES DÉPHASAGES .....	71
III.6.3.3 LES TECHNIQUES D'ANALYSE POUR DES CAS DES MACHINES À RÉGIME VARIABLE.....	74
III.6.3.4 L'ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE .....	75
III.7 LA CHAÎNE DE MESURE .....	76
III.7.1 Les capteurs de vibration :.....	77
III.7.1.1 capteur de déplacements (sonde de proximité) .....	78
III.7.1.2 Les vélocimètres .....	79
III.7.1.3 Les accéléromètres .....	80
III.7.2 les types de mesures suivants la nature de vibrations.....	83
III.7.2.1 mesures du vibrations absolues du palier .....	83
III.7.2.2 mesures du vibrations relatives d'arbre .....	83
III.7.2.3 mesures du vibrations absolues d'arbre.....	84
III.7.3 interprétations des mesures.....	84
III.7.4 Les appareils de mesure, de collecte et d'analyse .....	85
III.7.4.1 Les appareils de mesure d'indicateurs scalaires larges bandes .....	85
III.7.4.2 Collecteur et analyseurs de signaux .....	85
III.8 les normes vibratoires et seuils de jugement :.....	86
III 8. 1 Seuils de jugement :.....	86
III 8.2 Choix des seuils vibratoires :.....	88
III8.2.1 Seuils de vitesse vibratoire : .....	88
III.10 Conclusion.....	88
<b>Chapitre IV : images vibratoires des principaux défauts</b>	
IV.1 INTRODUCTION.....	89
IV.2 LES DEFAUTS DES SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES .....	89
IV.2 images vibratoire des Défauts liées à la fréquence de rotation du rotor .....	89

IV.2.1 défauts de balourd .....	89
IV.2.1 Types des balourds .....	90
IV.2.1.1 Balourd d'origine mécanique .....	90
IV.2.1.2 Balourd d'origine thermique .....	92
IV.2.1. 3 Balourd d'origine électriques .....	92
IV.2.1. 4 Balourd liée au défauts spécifique (évolutifs) .....	93
IV.2.1. 5 Les outils de détections et Typologie du balourd.....	93
IV.2.2 Défaut d'alignements .....	95
IV.2.2.1 Désalignement angulaire.....	95
IV.2.2.2 Image vibratoire Désalignement radial .....	96
IV.2.2.3 Image vibratoire Désalignement dû à l'arbre fléchi.....	96
IV.2.3 Défaut de Jeu mécanique .....	97
IV.2.4 Défaut de serrage .....	98
IV.2.5 Défauts induits par un frottement entre rotor et stator.....	99
IV.2.6 Défauts induits par les paliers hydrodynamiques .....	100
IV.2.7 cavitations.....	101
IV.2.8 Défauts de transmission par courroies.....	102
IV.2.7.1 L'image vibratoire des Courroies usées, détendues ou désaxées.....	102
IV.2.8.2 Mauvais alignement des poulies .....	103
IV.2.8.3 Poulie excentrée .....	104
IV.2.9 études des Défauts de roulements.....	104
IV.2.9.1 déterminations des fréquences caractéristiques.....	104
IV.2.9.2 Les d gradations et les défauts de roulements .....	105
IV.2.9.3 Les dégradations généralisées.....	106
IV.2.9.4 les défauts de Dégradation localisée.....	108
IV.2.9. Défaut d'Engrenages .....	112
IV. 3. Signatures vibratoires des Défauts électriques et électromagnétiques .....	115
IV. 3.1 Défauts électromagnétiques sur moteurs asynchrones.....	115
IV. 3.1.1 Défauts électromagnétiques sur stator (défauts stationnaires) .....	116
IV. 3.1.1 Défauts électromagnétiques rotoriques (défauts tournants).....	117
IV. 4. Conclusion.....	119

### Chapitre IV : application expérimentale

IV.1 Introduction .....	120
-------------------------	-----

IV.2. Présentation de l'entreprise GL1K de SKIKDA.....	120
IV.2.1. Mission de l'entreprise GL K de SKIKDA.....	121
IV.2.2. Description du nouveau GNL2K.....	121
IV.2.3. Organisation du complexe.....	121
IV.2.3. Organigramme de département maintenance .....	122
IV.2.4. L'organigramme de section planning et méthodes.....	123
IV.3. Plan de de maintenance basé sur la surveillance vibratoire .....	123
IV.3.1. Premier Partie : Mettre en place.....	123
IV.3.1.1. Descriptions de l'installation choisie .....	123
IV.3.1.2. L'installation visée pour l'étude de surveillance Vibratoire... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
IV.4. Caractéristiques techniques de l'installation 58-MJ01-A.....	124
IV.4.1. Schéma général de circuit de procédés.....	124
IV.4.2. Caractéristique de l'installation du pompage d'huile chaude .....	126
IV.4. 3. Vérification de de la Faisabilité technique de surveillance vibratoire.....	128
IV.4. 4. Type de stratégie de surveillance vibratoire .....	129
IV.4.5. Deuxième partie : la surveillance .....	129
IV.4.5.1. Acquisitions des données .....	129
IV.4.6. L'étude de l'installation pompage d'huile chaude 58-MJ01-A.....	132
IV.4.6.1 NIVEAUX GLOBALS ET FACTEURS DEFAUTS .....	132
IV.4.6.2 analyse spectral .....	136
<b>DIAGNOSTIC</b> .....	153
IV.5. Conclusion.....	155
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>VI</b>
<b>Les annexes</b> .....	<b>VII</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>VIII</b>

## Liste des figures

- Figure N° I-01** : les différents Forms de maintenance normalisée selon [Cours-les outils de maintenance MERZOUG BACHIR 2005](#)
- Figure N° I-02** : maintenance corrective
- Figure N° I-03** : graph de maintenance
- Figure N° I-04** : cause de défaillance
- Figure N° I-05** : Classification des défaillances
- Figure N° I-06** : Vitesse de d'apparition d'une défaillance
- Figure N° I-07** : Corrosion en phase aqueuse
- Figure N° I-08** : Les critères d'analyse de défaillance
- Figure N° I-09** : histogramme PARETO simple [[mémoire fin d'étude analyse FMD COMP ; TABET](#)]
- Figure N° I-10** : exemple méthode ABC [[mémoire fin d'étude analyse FMD COMP ; TABET](#)]
- Figure N° I-11** : exemple recherche des causes potentiel d'une défaillance
- Figure N° I-12** : Fonction de densité de probabilité et fonction de répartition
- Figure N° I-13** : courbe baignoire pour la variation du taux de défaillance
- Figure N° III-01** : naissance d'une vibration ([SONATRACH FORM](#)).
- Figure N° III-02** : Représentation des différentes amplitudes
- Figure N° III-03** : Représentations du mouvement d'un système masse-ressort selon les grandeurs (déplacements ; vitesse et Accélération)
- Figure N° III-04** : les modes de Surveillance vibratoire [[image forma SKF SONATRACH 2005](#)]
- Figure N° III-05** : la nature des défauts avec spectre ([www.imv.co.jp](#))
- Figure N° III-07** : courbe de tendance qui montre suivi par indicateurs ([www.imv.co.jp](#))
- Figure N° III-08** : Le spectre d'un signal associe avec son cepstre de structure [[exposition de t. MASSROUR](#)]
- Figure N° III-09** : exemple calcule spectrale d'un signal temporel ([www.imv.co.jp](#))

- Figure N° III-10** : Le spectre "zoomé" l'existence d'un bien de deux composantes vibratoires ([AM](#))
- Figure N° III-11** : [P- 61] Le spectre d'un signal associe avec son cepstre de structure
- Figure N° III-13** : mesures des orbites cinétiques d'un mouvements d'arbre ([SONATRACH-FORMA](#)).
- Figure N° III-16** : Principe de fonctionnement d'un capteur de proximité ([AIDE-VIBRA](#)).
- Figure N° III-17** : Principe de fonctionnement d'un capteur vélocimètre ([Doc-Bruel et Kjaer](#))
- Figure N° III-18** : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre ([Documentation Bruel et Kjaer](#))
- Figure N° III-20** : exemple des modes de fixation des accéléromètres et leurs résonances ([www.imv.co.jp](#))
- Figure N° III-22** : [P-78] collecteur analyseur de vibration ([Documentation Bruel et Kjaer](#))
- Figure N° IV-01** : le principe de balourd ([SFK](#)).
- Figure N° IV-05 b** : Spectre du palier (direction radiale horizontale) côté turbine d'un ventilateur tournant à 2 925 tr/min (48,75 Hz : 228 mg ou 7,3 mm/s) traduisant la présence d'un balourd ([A-M](#))
- Figure N° IV-07** : désalignement angulaire ([formation](#)).
- Figure N° IV-08** : désalignement radial([formation](#)).
- Figure N° IV-09** : image de l'arbre fléchi
- Figure N° IV-13** : Palier lisse [[Wikipédia](#)]
- Figure N° IV-15** : Transmission poulies courroies. [[For SKF SONA](#)]
- Figure N° IV-17** : courroie crantée ([SKF](#))
- Figure N° IV-18** : constitution d'un roulement ([Wikipédia](#))
- Figure N° IV-19** : constitution d'un roulement
- Figure N° IV-24** : Image vibratoire d'un défaut de bague extérieur
- Figure N° IV-25** : Image vibratoire d'un défaut de bague intérieur
- Figure N° IV-29** : Fréquence d'engrènement [[Wikipédia](#)]

- Figure N° IV-30** : typologie vibratoire d'un engrenage sain (A-M)
- Figure N° IV-31** : typologie vibratoire d'un engrenage présentant d'une dent détériorée (A-M)
- Figure N° IV-32** : typologie vibratoire d'un engrenage présentant un ensemble des dents détériorées(A-M)
- Figure N° IV-34** : Image vibratoire théorique d'un défaut dû à une anomalie électromagnétique [formation str].
- Figure N° IV-37** : vibrations théoriques d'un défaut rotorique [formation str].
- Figure N° IV-38** : Image vibratoire théorique d'une variation d'entrefer [A-M].
- Figure N°V- 01** : Situation géographique du complexe GL1K de SKIKDA (GL1K DOC)
- Figure N° V-02** : organisation de l'entreprise GL1K SKIKDA (GL1K DOC)
- FigureN° V-03** : l'organigramme de departement maintenance (GL1K DOC)
- Figure N° V-04** : l'organigramme de la service planning et méthodes (GL1K DOC)
- FIGURE N° V-05** ; schéma du system de pompage d'huile chaude (GL1K DOC)
- Figure N° V-06** : schéma de circuit pour la pompe 58-MJ01-A [W-GABBIONNITA DOC]
- Figure N° V-07** : schéma de plan d'ensemble de la pompe 58-MJ01-A[W-GABB-DOC]
- Figure N° V-08** : schéma du pompe WEIR GABBIONETA DSA 700/250[W-GABB-DOC]
- Figure N° V-09** : schéma du moteur AC CA 450 SA [WIER-G]
- Figure N° V-10** : schéma emplacement des points de mesures [NESTSOFT]
- Figure N° V-11**: le system d'huile chaude SECR de l'unité 58-MJ01-A [GL1K-PHOTO]
- Figure N° V-12**: le system d'acquisitions des données de mesures vibratoire [FALCON]
- Figure N° V- 13** : capteur accéléromètre et kit de collecte de données [FALCON].

**Figure N° V-14** : spectre d'accélération du paliers moteur 1-MT- RH [GL1K]

**Figure N° V-15** : spectre verticale d'accélération du paliers moteur 1-MT- RV

**Figure N° V-16** : Comparaison des spectres de vitesse (1-MT- RV) et (1MT- RH)

**Figure N° V-17** : Analyse temps-fréquence pour **palier N°02 (2-MT- RH)**

**Figure N° V-18** : spectre d'accélération du paliers 02 moteur (**2-mt- RV**)

**Figure N° V-19** : spectre de référence du paliers 02 moteur (**2-MT- RV**)

**Figure N° V-20** : Comparaison avec le spectre référence

**Figure N° V-21** : Simulation de Comparaison avec le spectre référence d'accélération 2-MT- RV

**Figure N° V-22** : Comparaison FFT ZOOMÉ avec le spectre référence d'accélération (2-MT- RV)

**Figure N° V-23** : Spectre d'accélération du paliers moteur (**2-MT- AX**)

**Figure N° V-24** : Analyse temps-fréquence pour **palier N°02 (2-MT- Ax)**

**Figure N° V- 25** : Comparaison FFT ZOOMÉ avec des spectre sur les trois directions

**Figure N° V- 26** : Spectre accélération de référence du palie pompe (**3-PP- RH**)

**Figure N° V- 27** : Représentation temp-fréquence d'évolution des mesures vitesse des fréquences major sur le palier N°03 direction (**3PP-RH**)

**Figure N° V-28** : Représentation d'évolution des mesures d'accélération des fréquences major (**3PP-RH**)

**Figure N° V-29** : Comparaison des signaux temporelle des deux derniers mois avec le signal de la référence

**Figure N° V- 30** : spectre de vitesse pour paliers pompe 03 (**3-MT- RV**)

**Figure N° V-31** : spectre d'accélération pour paliers pompe 03 (**3-MT- RV**)

**Figure N° V-32** : Comparaison des spectres ACC RV avec une analyse ZOOM MF et HF

**Figure N° V- 33** : Spectre haut fréquence zoomée autour de la fréquence  $F_{be}$  du roulement

**Figure N° V- 34** : Comparaison des spectres avec le spectre de référence sur le plan 3D

**Figure N° V- 35** : spectre de vitesse pour paliers pompe 03 (**3-MT- AX**)

**Figure N° V- 36** : Analyse temps-fréquence pour **palier N°03 (3-MT- Ax)**

**Figure N° V-37** : Comparaison des spectres lieu N°03 en trois directions

**Figure N° V- 38** : Analyse temps-fréquence pour **palier N°04 (4-PP- RH)**

**Figure N° V- 39** : Analyse temps-fréquence pour **palier N°04 (4-MT-RV)**

### Liste des tableaux

**Tableau N°01 :** [PAGE 15] les heures d'arrêt souvent la nature des pannes du compresseur alternatif A piston [*mémoire fin d'étude analyse FMD COMP ; TABET*].

**Tableau N°02 :** [PAGE 41] *Les principale méthodes de détection suivant les défauts potentiels.*

**Tableau N°03 :** [PAGE 87] *normes vibratoires ISO 20816*

## Liste des abréviations

**BPFO** : Ball Pass Fréquence of Outer ring (fréquence caractéristique de défaut de bague externe de roulement)

**BPFI** : Ball Pass Fréquence of Outer ring (fréquence caractéristique de défaut de bague externe de roulement)

**BSF** : Ball Spin Frequency (fréquence caractéristique de défaut des billes)

**FTF** : Fundamental Train Frequency (fréquence caractéristique de défaut de la cage)

**Fbe** : Fréquence caractéristique de défaut de bague externe au palier M

**Fbi** : Fréquence caractéristique de défaut de bague interne au palier T

**FI** : Fréquence Instantanée

**MA** : Modulation en Amplitude

**MF** : Modulation en Fréquence

**DSP** : Densité Spectrale de Puissance

**RMS**: Root Mean Square

**SNR**: Rapport Signal sur bruit

**TFCT** : Transformée de Fourier à Court Terme

**TFR** : Représentation Temps Fréquence

**TF** : Transformée de Fourier

**TH**: Transformée de Hilbert

**INTRODUCTION GÉNÉRALE :**

La mise en place d'une politique de maintenance préventive conditionnelle des machines tournantes nécessite de l'entreprise une logistique, humaine, matériel, et des méthodes et des techniques d'investigation sur lesquelles repose l'action maintenance.

Notre intérêt de cette stratégie est d'avoir le maximum d'efficacité et de succès pour la sûreté de fonctionnement des installations industrielles ou les systèmes électromécaniques, et suivant les travaux de recherches intéressants, et pour assurer la continuité de recherche précisément sur le domaine électromécanique, il nous a paru utile de nous pencher sur la surveillance et diagnostic des systèmes électromécaniques ou machines tournantes par analyse vibratoire [YCI 01] & [Kos-13].

La surveillance par analyse de vibration a considérablement évolué ces dernières années grâce à le progrès technologique, Cette dernière était essentiellement destinée pour assurer la protection des machines avant qu'elle ne subisse des dégradations importantes, dont la protection est assurée par le déclenchement d'une alarme ou par l'arrêt de la machine si l'amplitude de vibration atteint des valeurs jugées excessives pour le bon fonctionnement ou l'intégrité de cette machine. L'analyse vibratoire est devenue le pilier d'une stratégie de maintenance générale au niveau des entreprises.

Notre travail consiste à étudier le diagnostic des défauts fréquents des machines tournantes ou des systèmes électromécaniques par

l'analyse de vibrations, et pour ce la nôtre travail est adressé sous la démarche suivants :

Dans le premier chapitre de cette étude consacrée à un historique de l'action maintenance aussi les critères et les paramètres de sûreté de fonctionnement ainsi que les différents types de maintenance.

Le deuxième chapitre expose une présentation générale des différents procédés de la maintenance préventive conditionnelle et l'importance d'une stratégie de maintenance basé sur l'analyse vibratoire.

Le troisième chapitre port respectivement une théorie générale de vibration et tous les capteurs les plus utilisés pour les mesures vibratoires, ainsi la mise en place d'une stratégie de surveillance vibratoire à partir des informations, prérequis et des mesures pour avoir un diagnostic préétabli.

Le quatrième chapitre rassemble les images vibratoires des principaux défauts qui affectants les systèmes électromécaniques ou les machines que ce soit images spectrale ou temporelle et les différents techniques et informations nécessaires pour établir un diagnostic vibratoire au stade précoce, souvent l'analyse spectrale nous permet d'avoir l'évolution prévisible ou souhaitable à court temps et avec une efficacité à haut niveau.

Dont Le dernier chapitre est rapportée une application de l'analyse vibratoire Sur une installation de pompage d'huile chaude au niveau de l'entreprise **GL1K SONATRACH**.

Et enfin une conclusion générale qui présentée la justification et le but de l'étude et notamment l'intérêt de l'utilisation d'un

programme de surveillance des machines par l'analyse vibratoire avec une annexe Didier aux notions sur le traitement du signal et leur importance pendant l'analyse spectrale.

# CHAPITRE I

## Les concepts de la maintenance

## I.1 INTRODUCTION :

Depuis la révolution industrielle la maintenance des équipements, machines, ou des chaînes de production est devenue un challenge pour les managers des entreprises et en raison du développement de l'industrie basée sur une technologie d'automatisation complexe et exotique avec une large diffusion dans tous les domaines industriels il est devenu très clairement que les machines sont remplacées Les êtres humains dans la réalisation des tâches de production ce que réduit Les opportunités dans la marche d'emplois de façon spectaculaire.

Aujourd'hui la machine est remplacée l'homme sur le champ de réalisation des tâches de fabrication alors que le taux de production progressivement élevé par rapport aux effectifs qui est plus en plus assai démunies [smith/R.keith, 2003].

Mais le rêve de laisse les machines produisant seul sans aucune intervention j'ai ce que maintenant est incontrôlable car quand les machines Produisent seuls les arrêts sont vite critiques est avec différent nature ce qu'implique

Des interventions des personnes spécialisées avec une démarche reconnue

Ces dernier représentant des actions appelée les actions de maintenance

Qui permet de remédier les causes d'arrêts C'est pour cette raison que la maintenance représente une activité essentielle au maintien de la production à un niveau satisfaisant, par une catégorie des spécialistes de maintenance. Qui resteront maintenant et à l'avenir les professionnels de la santé des machines et leur rôle sera souvent double : maintenir les machines et surveiller la production elle-même, la maîtrise de fonctionnement des systèmes de production automatisée plus en plus exotique de façon durable Quel que soit le secteur industriel s'impose comme un enjeu majeur pour Les personnes de maintenance, entreprises, service qui permettra d'évaluer clairement La marge de manœuvre et la concurrence dans un monde primitive ne tolèrent pas les fainéants.

L'enjeu majeur est ou sera la valorisation des ressources humaines, Nous produirons de plus en plus avec des technologies identiques pour tous, mais nous maintiendrons la production en quantité et en qualité avec des hommes. Eux feront la différence. En particulier, les techniciens de maintenance auront un rôle

clé pour valoriser le capital productif de l'entreprise. Pour cela ils devront collaborer avec les autres services de l'entreprise : production, contrôle de gestion.

## I.2 LA FONCTION MAINTENANCE :

Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions « naturelles » facilement identifiables et rarement négligées, à juste titre. Par contre, *la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client. C'est donc une fonction « masquée », agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive [JEAN-PIERRE, 2010].*

### I.2.1 HISTOIRE DE LA FONCTION MAINTENANCE :

#### I.2.1.1 L'ORIGINS DU TERME MAINTENANCE :

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines *manus* et *tenere*, est apparu dans la langue française au XII<sup>e</sup> siècle, au XIV<sup>e</sup> siècle, le mot signifie « action de conserver une possession<sup>2</sup> » pour évoluer vers « action de maintenir, maintien, soutien, au XVI<sup>e</sup> siècle » (CF), Le terme est emprunté outre-Manche vers la même époque, dans le sens de « tenue », « comportement », évoluant, au début du XV<sup>e</sup> siècle, vers celui de « maintenir ou garder en vie » RD) peut être trouvée l'utilisation du mot "maintenance à ce moment Sous la plume de François Rabelais qui a parlé de maintenance de la Loy "dans Pantagruel.

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire « Maintien numérique des effectifs et du matériel d'une troupe au combat ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » [JEAN-PIERRE, 2010].

#### I.2.1.2 L'ÉMERGENCE DE LA NOTION DE SERVICE DE MAINTENANCE : ENTRE LES ANNÉES 1960 ET 1980

La maintenance était uniquement considérée comme une activité Infériorité, considérée comme ayant une importance mineure et utile uniquement en cas de panne, le département de maintenance était totalement restreint et principalement limité à des tâches électriques (serrage...etc.) ou mécaniques (graissage...etc.), et les stratégies déployées ne reposaient que sur la réparation et les opérations correctives majeures, Les notions de prévention ou de prédiction n'existaient pas et la maintenance souffrait alors d'une très mauvaise image. Il

était Ce contexte spécifique lorsque le mode industriel sous des implications totalement différent a ce que nous connaissons aujourd'hui Tout simplement parce que les équipements ne sont pas intégrés à un système plus général.

Juste avant les années 80 les entreprises (y compris celles des secteurs de la pétrochimie, des transports et de l'énergie nucléaire) ont progressivement pris conscience de l'aspect sécurité. Ils voulaient protéger leurs employés, alors ils ont commencé à s'intéresser à la maintenance pour le développer et lui donner plus d'importance, et ce Développement de maintenance a pour des raisons humaines plutôt que pour des raisons purement économiques.

#### À PARTIR DE 1980 LES NORMES DE MAINTENANCE :

Dans ce contexte d'évolution et de sensibilisation aux risques liés à l'utilisation d'équipements performants, les premières normes ont été créées. En France ainsi que dans l'ensemble de l'UE, des normes de maintenance industrielle ont été progressivement mises en place : en 1979 puis en 1985, les normes AFNOR X60 et X60 000 ont été créées, Le secteur de la maintenance a donc subi de profonds changements afin de devenir un domaine très spécialisé et essentiel des usines, ce qui a conduit à la création des premières formations de certificat de technicien supérieur et autres formations dans les années 1980, Il est en effet devenu nécessaire de former des experts capables de s'occuper des problèmes de maintenance afin d'évoluer vers un modèle plus sûr et plus efficace.

Une concurrence progressive entre entreprises L'évolution des équipements et, par extension, des techniques, est apparue dans un contexte de mondialisation

#### ENTRE 1980 ET 2000 :

Le monde industriel a changé dans de nombreux domaines maintenance, achats, communications, production, qualité, sécurité... Tous ont donc dû améliorer leurs techniques : des nouveaux modes opératoires ont été mis en œuvre En ce qui concerne la maintenance industrielle, il s'est complètement métamorphosé grâce à l'arrivée de nouvelles approches, comme la maintenance productive, concept né directement du Japon et qui a révolutionné l'approche française. Le secteur n'avait d'autre choix que de se moderniser afin de permettre aux entreprises de trouver leur place sur le marché et d'être compétitives, C'est ainsi qu'ils se sont

engagés dans l'acquisition de normes, à l'instar des normes ISO 9000 (en 1987) et ISO 14 000 (en 1996).

#### LES ANNÉES 2000 JUSQUE AUJOURD'HUI :

Les entreprises cherchent aujourd'hui à s'affirmer sur les marchés industriels et à prouver qu'elles disposent beaucoup de ressources en s'appuyant sur les progrès réalisés au cours des vingt dernières années. Chacun d'entre eux souhaite améliorer sa gestion de la maintenance afin de réduire les arrêts de production tout en augmentant la qualité des équipements et la capacité de production.

Malgré cette volonté d'innovation technique et de savoir-faire, le secteur industriel est plus particulièrement celui de la maintenance est confronté à des sérieuses difficultés Ce dernier est absolument essentiel et garantit le bon fonctionnement des infrastructures industriels, mais il a toujours du mal à attirer les jeunes car il n'a pas une très bonne image, les formations spécialisés ne sont pas suffisamment mis en avant, le domaine a donc de grandes difficultés à recruter des professionnels qualifiés, Parmi les nombreux défis auxquels le secteur de la maintenance est confronté (notamment l'externalisation, la diminution des marges ainsi que des prix), il est très difficile de faire comprendre aux gens pourquoi ces compétences sont si importantes et combien ces emplois sont enrichissants. Les conditions de travail vont probablement évoluer avec l'évolution de tous les secteurs professionnels grâce aux différentes technologies qui apparaissent progressivement dans nos vies, Des solutions innovantes de gestion de la maintenance industrielle prennent déjà forme pour aider les usines à faire face à des problèmes très spécifiques, parmi ces solutions des outils intelligents pour permettre aux entreprises de relever ces différents défis, citons par exemple GMAO (Système de gestion de la maintenance informatisée) qui regroupe à la fois un logiciel destiné à aider les techniciens et les gestionnaires dans leurs tâches quotidiennes.

#### 1.3.MAINTENANCE DEFINITION (AFNOR X 60-000 mai 2002) :

La définition *de* maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

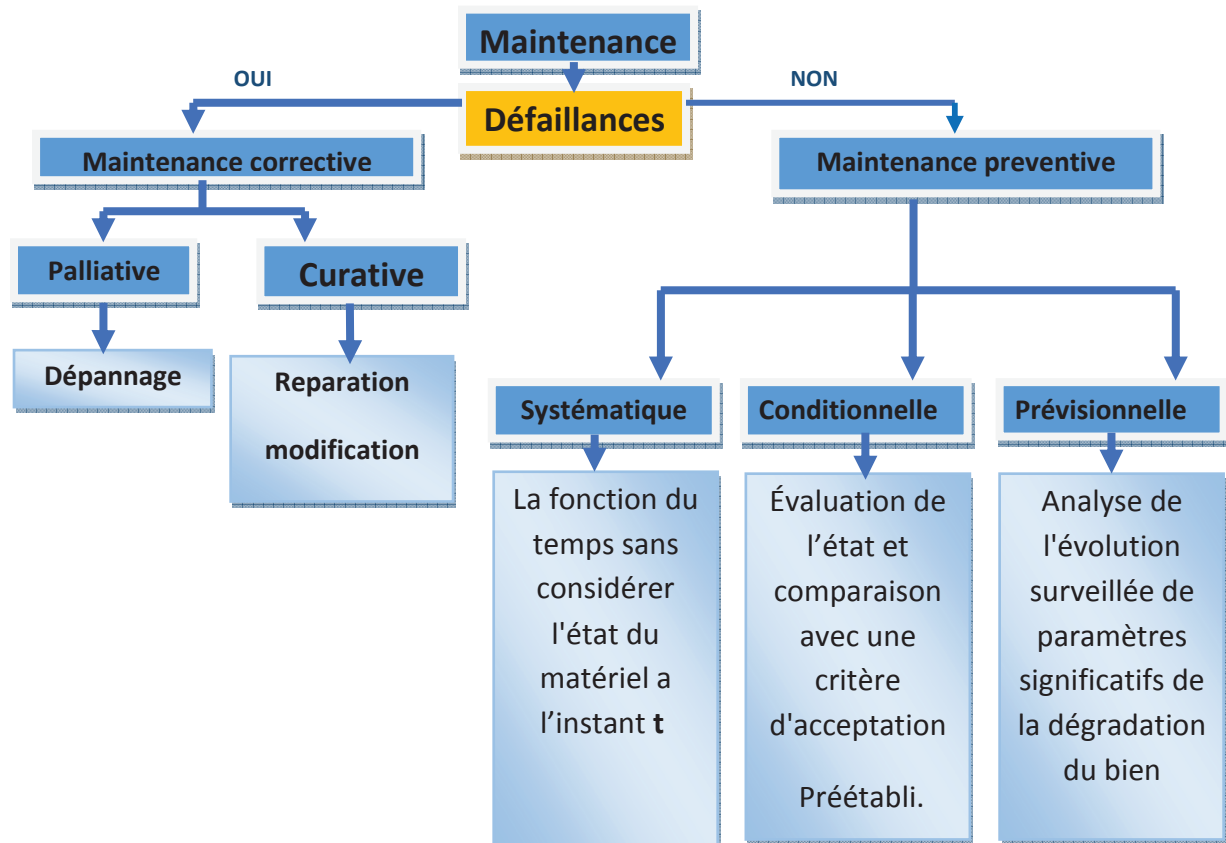
**1.3.1 Objectifs de la maintenance :**

C'est la nature de l'entreprise qui dicte les objectifs du service de maintenance

Clairement définies par une politique bien déterminée à partir de la prise en comptes de trois facteurs essentiels

- A - Facteur technique.
- B - facteur économique.
- C - facteur humain et écologique.

**3.2 DIFFÉRENTES FORMES DE MAINTENANCES :**



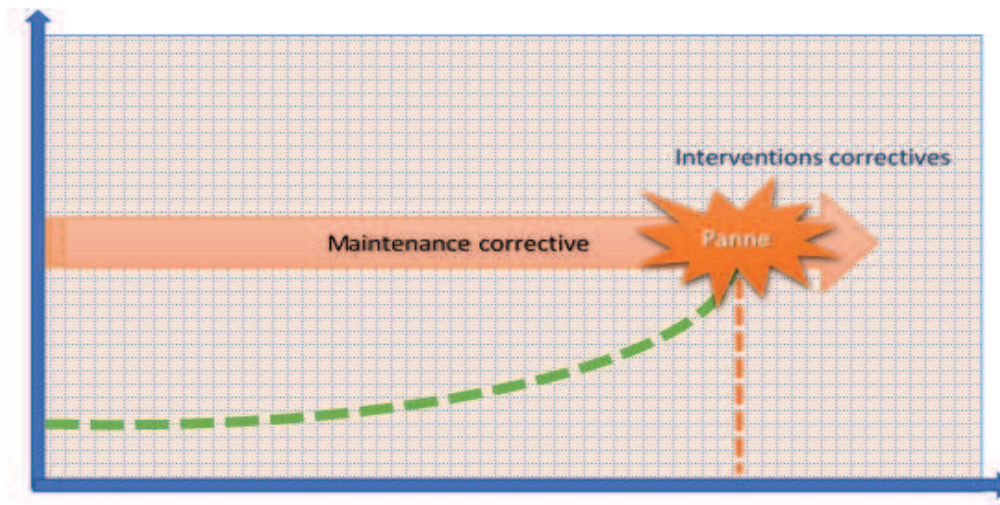
*Figure N° I-1 : les différents Forms de maintenance normalisée selon FDX60.000*

**1.3.2.1 Maintenance corrective (FD X 60-000) :**

Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

*La maintenance palliative :* caractérise les actions de dépannage : remise en état provisoire.

*La Maintenance curative* : Action de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié pour lui permettre d'accomplir une Fonction requise.



*Figure N° I-02 : maintenance corrective*

Le résultat des actions réalisées doit présenter un caractère permanent.

Des modifications et améliorations peuvent être apportées, afin de réduire l'occurrence d'apparition de la défaillance ou d'en limiter l'incidence.

### 1.3.2.2 Maintenance préventive (FD X 60-000) :

Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

**1.3.2.3 Maintenance systématique** : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état Du bien.

*Avantages :*

- Diminuer les risques de pannes par rapport à la maintenance curative
- Facile à planifier des arrêts d'entretien

*Inconvénients :*

- Risque de casse entre deux visites
- Risque de redémarrer dans de plus mauvaises conditions que lors de l'arrêt de la machine.
- Coût de visites qui sont parfois inutiles.

- « La connaissance » est souvent considérée comme maîtrisée par le fabricant ou constructeur. [MERZOUG, 2005]

1.3.2.4 Maintenance conditionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » : « Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères Significatifs prédéterminés de l'état de dégradation du bien ou du service. »

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

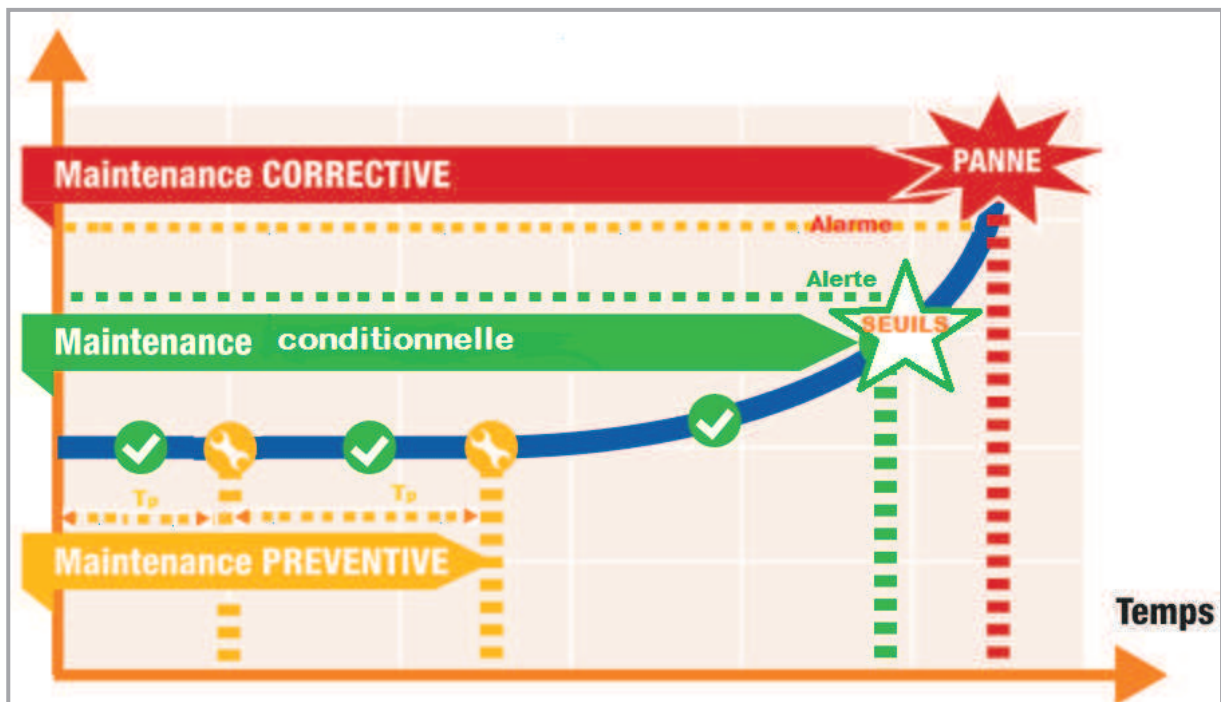


Figure N° I-03 : graph de maintenance

Suivant la définition la maintenance conditionnelle elle est venue de rattrapée l'imperfection au niveau de maintenance systématique à partir de différentes techniques basées sur la mesure de paramètres physiques, tels que :

- La mesure de vibrations
- L'analyse d'huile
- La thermographie infra- rouge
- L'émission acoustique
- Autres méthodes d'inspection ...

**Avantages :**

- optimisation de la durée de fonctionnement
- optimisation de l'intervention (préparation)
- évaluation réelle de l'état de la machine
- évite les pertes de production

*Inconvénients :*

- coût de l'investissement (homme / matériel)
- s'atteindre à un programme suivi (MERZOUG, 2005)

### 1.3.2.5 Maintenance prévisionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 » :

« Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien »  
Maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive. (JEAN-PIERRE, 2010)

## 1.4. Les concepts de défaillance

Les défaillances sont à la maintenance ce que les pathologies humaines sont à la médecine : leur raison d'exister. Or, toute défaillance est le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, dû à une ou plusieurs causes à identifier.

### 1.4.1 Définitions de *Défaillance* (normes CEN WI 319-003)

« C'est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. »  
D'après (AFNOR) (X06-501) Cette fonction doit être déterminée avec les tolérances associées. Donc une défaillance est une condition insatisfaisante, Après une défaillance, le bien est en panne. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : *Failure* en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anormalité, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

**1.4.2 Modes de défaillance :** Effet par lequel une défaillance se manifeste, on distingue :

- **Panne :** « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autre action programmée ou à un manque de ressources extérieures ».  
Implique arrêt ou non fonctionnement.
- **Dégradation :** « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien lié au temps ou à la durée d'utilisation ». Une dégradation peut conduire à la défaillance.

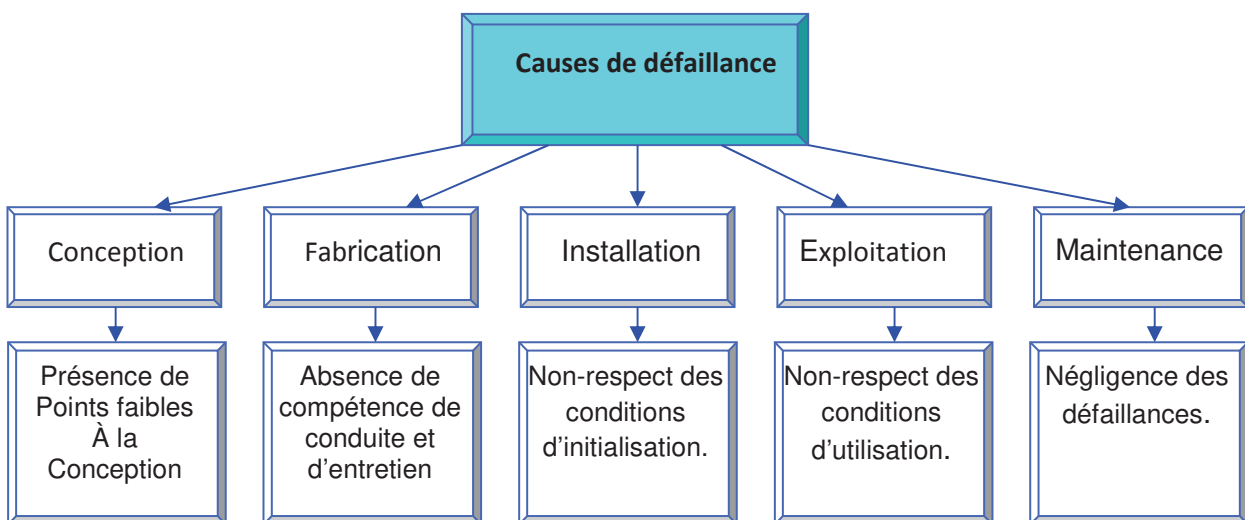
- **État dégradé** : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ». Implique automatiquement perte de performances.
- **Défaut** : nous conformité dans les relations de cause à effet, Un processus est dit en état de défaut, de détérioration ou de panne, si les relations de cause à effet, liant les variables du système, se sont modifiées  
La terminologie défaut, détérioration, panne est tout à fait progressive.  
Quelle que soit l'appellation retenue, la défaillance existe sous différentes formes et peut affecter différents parties ou composants d'une installation.

**Remarque** : En fête toute opération ou application qui ne donne pas satisfaction, qui n'atteint pas son but ou qui engendre des effets secondaires indésirables, constitue un défaut.

**1.4.3 Effet de la défaillance :**

- ✚ Concrétise la conséquence,
- ✚ Est relatif à un mode de défaillance,
- ✚ Dépend du type d'AMDEC réalisé : Mécontentement, Sécurité des opérateurs Arrêt du flux de production

**4.4 Causes de défaillance** : « Circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».



*Figure№ 1-04 : cause de défaillance*

I.4.5 Classification de la défaillance : Le cadre de référence de la classification des défaillances que nous présentons à la figure (Est réparti en sept familles et 17 causes)

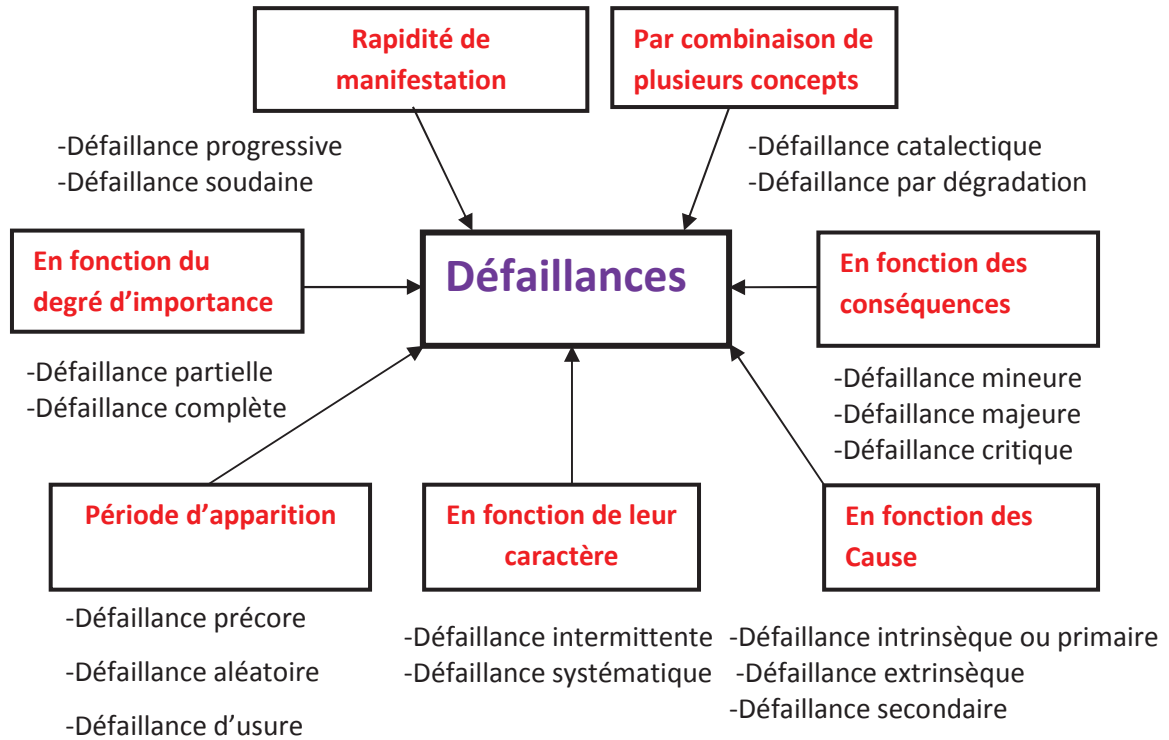


Figure N° I-05 : Classification des défaillances

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des causes des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

I.4.5.1 Suivant leur cause : Les causes intrinsèques et extrinsèques

1. **Causes intrinsèques (définition CEN)** « Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques :

- « Défaillance due à une conception inadéquate du bien » ;
- « Défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés ».
- « Défaillance due à une installation incorrectement réalisée ».
- « Défaillance due à la durée d'utilisation » par usure ou par vieillissement.

2. **Causes extrinsèques** : La norme CEN permet de distinguer :

- « Défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien ».

- « Défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution ».
- « Défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte ».
- « Défaillance secondaire », conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

**1.4.5.2 Suivant leur degré :** défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes.

- 1. Défaillance partielle :** défaillance qui entraîne l'inaptitude d'une entité à accomplir certaines fonctions requises mais non toutes.
- 2. Défaillance complète :** défaillance qui entraîne l'inaptitude totale de l'entité à accomplir toutes les fonctions requises.
- 3. Panne permanentes :** panne d'une entité persiste tant que n'ont pas eu lieu des opérations de maintenance corrective.
- 4. Panne intermittente :** panne d'une entité subsistant une durée limitée après laquelle l'entité redevient apte à accomplir une fonction requise sans avoir été soumise à une opération de maintenance corrective.
- 5. Panne fugitive :** panne d'un dispositif qui est intermittente et difficilement observable.

Les défauts fugitifs sont extrêmement difficiles à diagnostiquer car leur apparition est aléatoire.

**1.4.5.3 Suivant leur vitesse d'apparition :** défaillances soudaines ou progressives.

- 1. La défaillance soudaine :** « ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable ».
- 2. Défaillance progressive (par dérivé) :**  
C'est la défaillance qui est due à une évolution dans le temps de certaines caractéristiques d'une entité

Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par dégradation. La Défaillance catalectique est soudaine + complète, alors que la dégradation est progressive + partielle. **(JEAN-PIERRE, 2010)**

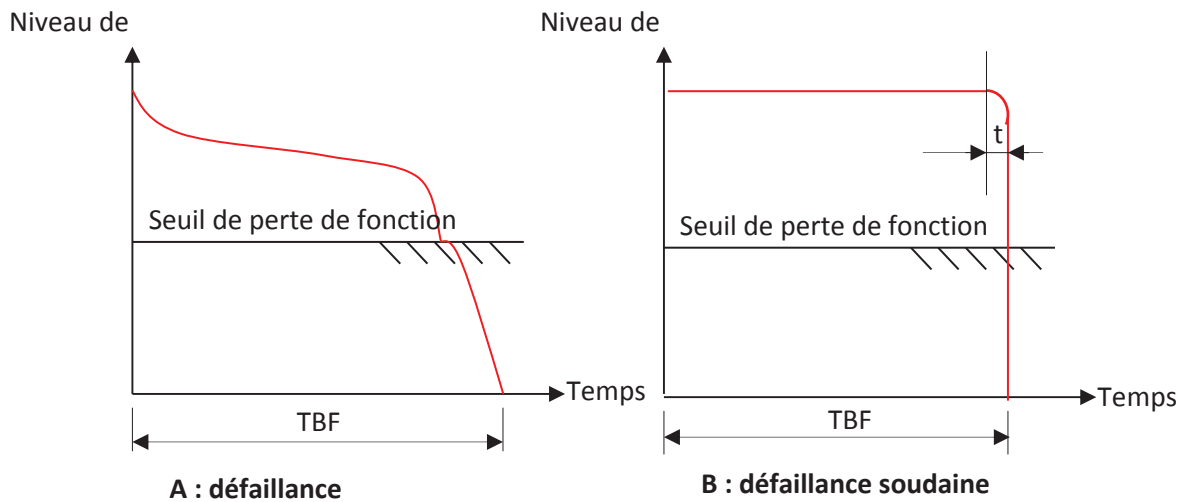


Figure N° I-06 : Vitesse de d'apparition d'une défaillance

#### Remarque

- Cette dynamique de dégradation permet, (figure... B) de fournir des informations précises et fiables sur l'état des organes mécaniques ou sur les phénomènes observés. Ce qui permet d'affiner le suivi des machines.
- Cette dynamique de dégradation (figure... A) ne permet pas de voir la dégradation et par conséquent ne permet pas de surveiller la machine.

#### 1.4.5.4 Mécanismes de défaillance

« Processus physique, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».

#### 1.4.5.5 Défaillances mécaniques par détérioration de surface

*Fatigue et usure :*

**a- Usure :** enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

**b- Fretting-corrosion :** usure particulière apparaissant au contact de 2 pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations). C'est le cas des pièces frettées ou des clavetages.

**c- L'écaillage :** enlèvement de grosses écailles de matière.

**d- Grippage :** soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière

**e- Abrasion :** action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, etc.)

**f- Cavitation :** implosion de micro bulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression au sein d'un liquide. L'onde de choc génère des cratères dans la

A

LES CONCEPTS DE LA MAINTENANCE

zone de cavitation (pompes, hélices, etc.)

**g- érosions** : enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs)

**h- Faïençage** : réseau de craquelures superficielles dues à la fatigue thermique

**i- Marquage** : enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle

**k- Rayage** : trace laissée par le passage d'un corps dur

**l- Roulement et fatigue de contact** : roulements à billes et à aiguilles se détériorent intrinsèquement par fatigue de contact. La pression de Hertz au contact bille / chemin de roulement fait apparaître des contraintes de cisaillement sur les bagues entraînant des fissures en surface puis débouchantes (piqûres).

#### *Frottement et usure :*

Ce mode de défaillance est inexorable dès lors que 2 surfaces en contact ont un mouvement relatif. La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes. Dynamique de l'usure des lois de dégradation ; L'analyse des lubrifiants met en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

#### 1.4.5.6 Défaillances mécaniques par déformations plastiques

Déformations plastiques sous contrainte mécanique : dues à un dépassement de la limite élastique du matériau. Une inspection des pièces vérifiant l'apparition d'une zone de striction peut prévenir le risque d'une rupture prochaine. Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : c'est le fluage qui est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à des températures de service supérieures à 40% de la température de fusion.

#### **Défaillances mécaniques par rupture ductiles, fragiles ou de fatigue**

**Rupture ductile** : elle provient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture.

**Rupture fragile** : elle survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'un choc et est favorisée par la fragilité intrinsèque du matériau.

**Rupture par fatigue** : c'est quand une pièce a atteint sa limite d'endurance.

#### 1.4.5.7 Les modes de défaillances électriques :

**1 Rupture de liaison électrique** : c'est le plus souvent la conséquence d'une cause extrinsèque (choc, surchauffe, vibration).

**2 Collage ou usure des contacts** : les contacts, par différents modes de défaillances, sont souvent les « maillons faibles » d'un circuit électrique.

**3 Claquage** d'un composant, tels que des résistances, des transistors, etc.

Ces modes de défaillances présentent un caractère catalectique qui les rend difficile à prévenir. Par contre, il est possible d'agir sur les phénomènes extérieurs qui les génèrent, tels que les actions thermiques et vibratoires. Dans le domaine électronique, le « déverminage » a pour but d'éliminer les composants ayant un point fa

#### 1.4.5.8 Défaillance chimique par corrosion

##### 1 Corrosion électrochimique :

Les surfaces métalliques exposées à un milieu aqueux sont soumises à une oxydation du métal avec libération d'électrons, Dans le cas du fer, la réaction anodique s'écrit :  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

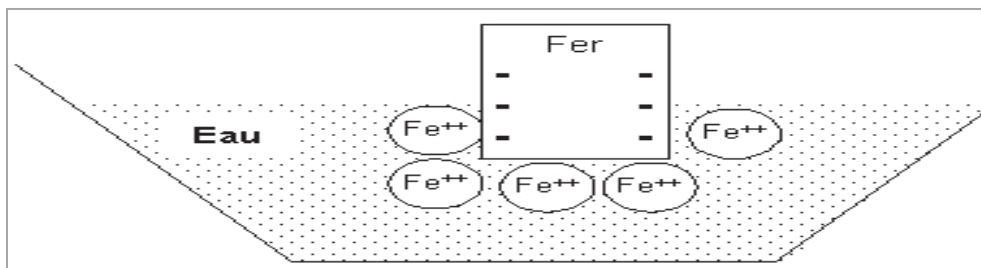


FIGURE N° I-07 : Corrosion en phase aqueuse

##### 2 La corrosion chimique :

La mise en contact fortuite ou normale, temporaire ou permanente, d'équipements avec des produits agressifs entraîne une corrosion chimique : réaction chimique avec perte régulière de matière, formations piqûres, ou fissuration par corrosion inter granulaire. Les agents corrosifs peuvent être des acides, (sulfurique, nitrique, chlorhydrique, etc.), des détergents voire même des lubrifiants (dont la mission est la protection des surfaces mais dont les additifs créent certaines incompatibilités et dont l'oxydation produit des acides organiques).

##### 3 La corrosion électrique :

Sous l'effet de « courants vagabonds », 2 surfaces métalliques voisines peuvent être soumises à une DDP suffisante pour créer un arc électrique, entraînant une abrasion. Les origines peuvent être une mauvaise mise à la terre, des courants induits sur les machines électriques, des charges électrostatiques provenant de

frottements (courroies, textiles, etc.).

**4 La corrosion bactérienne :**

Les huiles de coupe et les eaux industrielles contiennent souvent des « Ferro-bactéries » se divisant toutes les 20 minutes (1 bactérie donne naissance à 1 milliard de bactéries en 12 heures).

**5 La corrosion de contact :**

Elle survient lorsque 2 pièces sont en contact et soumises à des vibrations. Ex : bague extérieure d'un roulement dans son logement. Dans ce processus complexe, il se forme du Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en poussière rougeâtre très abrasive.

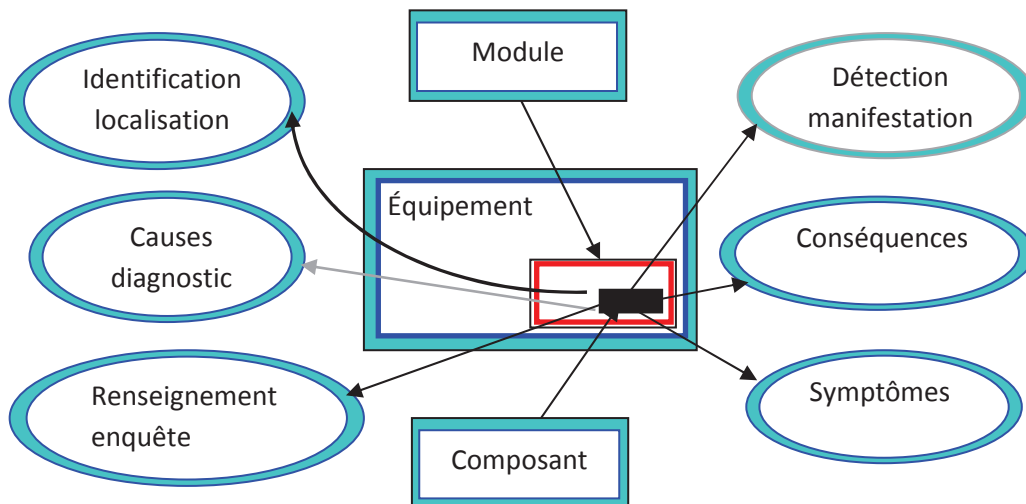
**6 La cavitation :**

Elle se manifeste sur des pièces en contact avec une zone de turbulence liquide. Des bulles se forment dans la masse du liquide en écoulement turbulent. Sous l'effet de la pression externe, ces bulles implosent, générant une onde de choc accompagnée d'une température ponctuelle élevée. Ainsi s'explique la dégradation des turbines, d'hélices, de chemise de moteur, etc.

**1.4.6 Analyse qualitative post défaillance**

**1.4.6.1 Les six éléments de connaissance d'une défaillance :**

Une analyse qualitative post défaillance doit comporter les six éléments de connaissance permettant de comprendre aussi bien l'environnement du système lors de sa perte de normalité que les mécanismes ayant engendrés la défaillance. Cela afin d'apporter des remèdes durables et des mesures d'organisation pour éviter la réapparition de la défaillance, ou pour atténuer ses effets



*Figure N° I-08 : Les critères d'analyse de défaillance*

## Les six pôles de l'analyse

### 1. L'identification et localisation de la défaillance

- ♦ Identification dans l'organisation (numéro de demande de travaux, intervenants et nature de la panne)
- ♦ Situation dans le temps (relève compteur et date + heure).
- ♦ Localisation dans l'espace à travers l'arborescence (location par code de l'équipement, puis du module ou du composant défaillance).
- ♦ Identification fonctionnelle : **quelle est la fonction perdue ?**

### 2. La détection, la manifestation et l'alarme

- ♦ Par qui, quand et par quel moyen la défaillance a-t-elle été détectée ?
- ♦ Dans quelles conditions de surveillance et /ou par quels capteurs en place.
- ♦ Manifestation de la défaillance : **amplitude** (partielle ou complète), **vitesse** (progressive ou soudaine). **Caractère** (permanant, fugitif, intermittent)

### 3. Les renseignements recueillis par enquête préliminaire

- ♦ Détection relative au composant défectueux localisé ;
- ♦ État de l'environnement avant et au moment de la détection, conditions de service et circonstances.
- ♦ Origine et référence du composant localisé.
- ♦ Fichier historique (quelles sont les interventions antérieures)
- ♦

### 4. Les symptômes

- ♦ Observés in situ avant l'arrêt : relevé des (anormalités) (Bruit et vibrations couleur ; odeur ; chaleur ; etc.) Indication mesurées ou captées. Caractérisation des contraintes Perturbations en sortie défauts de qualité associés.
- ♦ Observés après dépose ou démontage ; mesures statiques, mesures électriques en tension ou hors tension. Examen morphologique en cas de rupture mécanique ; Examen de surface ; photographie ou dessin.
- ♦ Observés par examens complémentaires : Microscopie, analyses chimiques, contrôles non destructifs, etc.

### 5. Les conséquences

- ♦ Sur le plan de la sécurité, de l'indisponibilité, de la non-qualité
- ♦ Produit, des coûts directs. etc.

- ♦ Mineures, majeures ou critiques

## 6. Les causes

- ♦ Imputation extrinsèque : accident, choc surcharge, mauvaise utilisation, erreur conduite, non-respect de consigne ; défaut d'entretien. Manque de précaution. Environnement non-conformité, défaillance seconde, ou en cascade.
- ♦ Imputation intrinsèque : défaut de santé-matière, de conception de fabrication ; de montage, d'installation, mode de défaillance en fonctionnement, usure, abrasion, corrosion, fatigue, détérioration de surface, déformation, rupture, vieillissement. etc.

### 1.4.6.2 Les fiches d'analyses qualitatives de défaillances

Les recueils de ces informations après défaillance doivent se faire sur une fiche d'analyse de défaillance. Elle sera structurée à partir des six pôles étudiés et adaptée à la logique documentaire de l'entreprise. L'organisation du recueil est de la responsabilité de l'agent des méthodes de secteur concerné

La compilation de ces fiches engendre une base de données qualitative complémentaire des données quantitatives.

#### Dans quel cas faut-il analyser une défaillance ?

Certainement pas en temps réel et pour chaque défaillance !

Mais en temps différé, après sélection de pannes répétitives ou coûteuses par l'agent des méthodes, cette hiérarchisation des défaillances peut se faire à partir d'une analyse quantitative de défaillances suivant les graphes de Pareto ou suivant une **AMDEC** (analyses des méthodes de défaillance et leurs effets et de leurs criticités) qui s'appuie généralement sur trois critères.

- ✓ La probabilité d'occurrence.
- ✓ La gravité de ses effets.
- ✓ Le non détectabilité.

### 1.4.7 L'analyse quantitative des défaillances

L'analyse quantitative est basée sur l'étude réglementaire et suivre l'évolution du comportement de chaque équipement afin d'en déduire des priorités d'action.

Suivant la documentation du service suivants :

- Le DTE, dossier technique de l'équipement analysé.
- L'historique d'équipements (les données quantitatives)

- Les données qualitatives relatives aux analyses de défaillance (fiches d'analyse de défaillance et expertises,)
- Modes opératoires pour les interventions fourni par constructeur.

L'analyse quantitative orientent le choix des actions d'amélioration, donc les défaillances à approfondir pour pouvoir les corriger et les prévenir par des interventions correctives programmé.

En fait, les analyses quantitatives permettent d'en déduire :

- Les durées de bon fonctionnement (*TBF, time between failures*) et leur moyenne (*MTBF*) ainsi que le nombre *N* de défaillances. La saisie de ces durées permettra de caractériser la *fiabilité* de l'équipement.
- Les temps d'arrêt de production (*TA*) intrinsèques au matériel et inhérents à chaque défaillance, y compris les durées de « micro défaillances » Ce dernier permettra de caractériser la *disponibilité* de l'équipement.
- Les durées d'intervention (*TTR, time to repair*) et leur moyenne (*MTTR*). Qui permettra de caractériser la *maintenabilité* de l'équipement.

En doit spécifier notre analyse par la mise en familles les relevées précédents

Est suivants des méthodes d'analyse précises. Telle que les méthodes suivantes :

#### 1.4.7.1 Diagrammes de PARETO :

Les diagrammes de Pareto permettent de sélectionner des actions prioritaires à mettre en œuvre, à partir de données statistiques objectives

Le diagramme de Pareto permet de localiser rapidement les équipements qui tombent le plus souvent en défaillance ; Ils permettent également de communiquer grâce à leur facilité d'interprétation visuelle sous les trois Forms d'usages suivant :

- **Le diagramme de Pareto simple.**
- **La méthode ABC de Pareto.**
- **le diagramme de Pareto en NT.** [*Fiabilisation des équipements de Ingexpert*]

Un exemple d'étude pratique sur l'hystérique un compresseur alternatif à piston.

Nature de panne	Heurs d'arrêt	% heurs d'arrêt
Panne mécanique	271 <sup>H</sup>	87,75
Panne hydraulique	18,33	5,93
Panne instrumentation	19,50	6,31

*Tableau N° I-01 : les heurs d'arrêt souvent la nature des pannes du compresseur alternatif A piston*

1. Histogramme PARETO simple

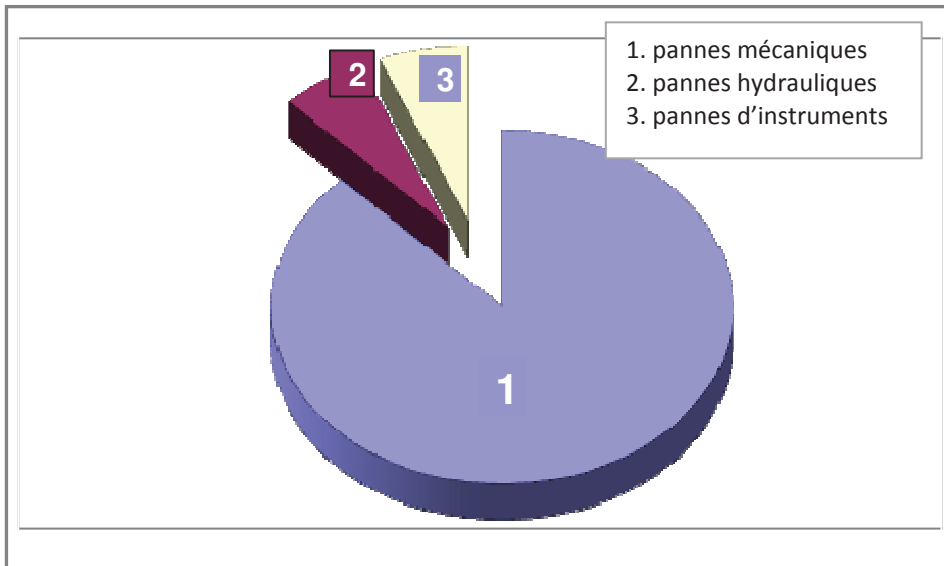


Figure N° I-09 : histogramme PARETO simple

La méthode ABC de Pareto ou loi des 20/80

Les résultats présentent sous la forme d'une courbe appelée courbe ABC dont l'exploitation permet de détecter les éléments les plus significatifs du problème à résoudre, La méthode ABC permet donc au gestionnaire d'identifier des cibles d'actions prioritaires, mais également de déterminer les éléments négligeables pour alléger l'étude. Exemple d'étude pratique sur l'hystérique un compresseur alternatif piston

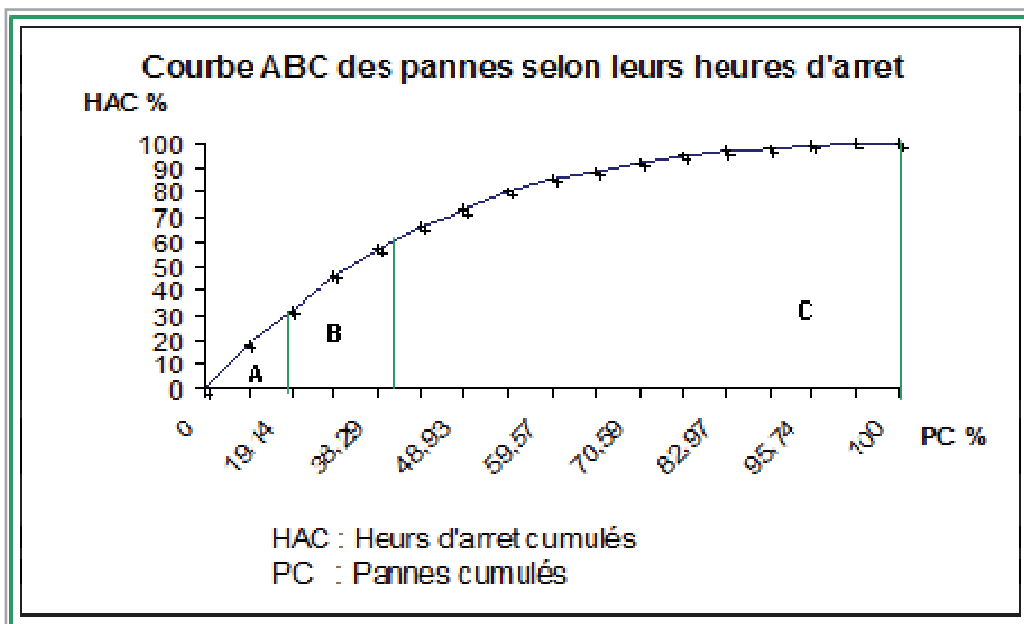


Figure N° I-10 : exemple méthode ABC [mémoire fin d'étude analyse FMD COMP ; TABET]

3. Le diagramme de Pareto en NT.

Cet outil est dédié aux analyses des défaillances. Il consiste à tracer les graphes portant successivement des statistiques de différentes situations d'équipement. Est comparé l'un avec les autres diagrammes.

#### 1.4.8 L'analyse SDF (analyse prévisionnelle de défaillances)

**Définition de la sûreté de fonctionnement (CEN)** « La sûreté de fonctionnement est l'ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance. » **Sdf = Disponibilité + Sécurité**

Notre intérêt de cette technique est de prévoir, puis de supprimer les pannes à l'origine. En effet, pour la maintenance, la meilleure panne est celle qui n'arrive pas, une bonne panne est celle que l'on a prévue, la pire étant la panne inattendue, au mauvais endroit et au mauvais moment.

##### 1.4.8.1 Analyses prévisionnelles et analyses post défaillance

Les analyses prévisionnelles de défaillance réalisées en phase de conception s'appuient sur l'expertise, ou l'expérience acquise à partir des équipements en fonctionnement sur les sites industriels. Cette connaissance du comportement « réel » repose sur les analyses postdéfaillance. Elle est à relativiser en fonction de l'environnement et des conditions de fonctionnement.

Donc la base de cette analyse est un groupe de travail de compétences et complémentaires qui doit exploiter les formes de routeurs d'expériences de suivi pour l'amélioration suivantes des méthodes 'analyse appliqué.

##### 1.4.8.2 Le diagramme d'Ishikawa des 5 M :

Est Un outil d'investigation simple « de la qualité » a vocation à rechercher les causes potentielles d'un dysfonctionnement. Appliqué à la maintenance, il permet une investigation a priori menée à partir de cinq familles de causes de défaillance : les méthodes, la main-d'œuvre, les moyens d'exploitation, le milieu environnant et les matières d'œuvre. [Figure \[2\]](#)

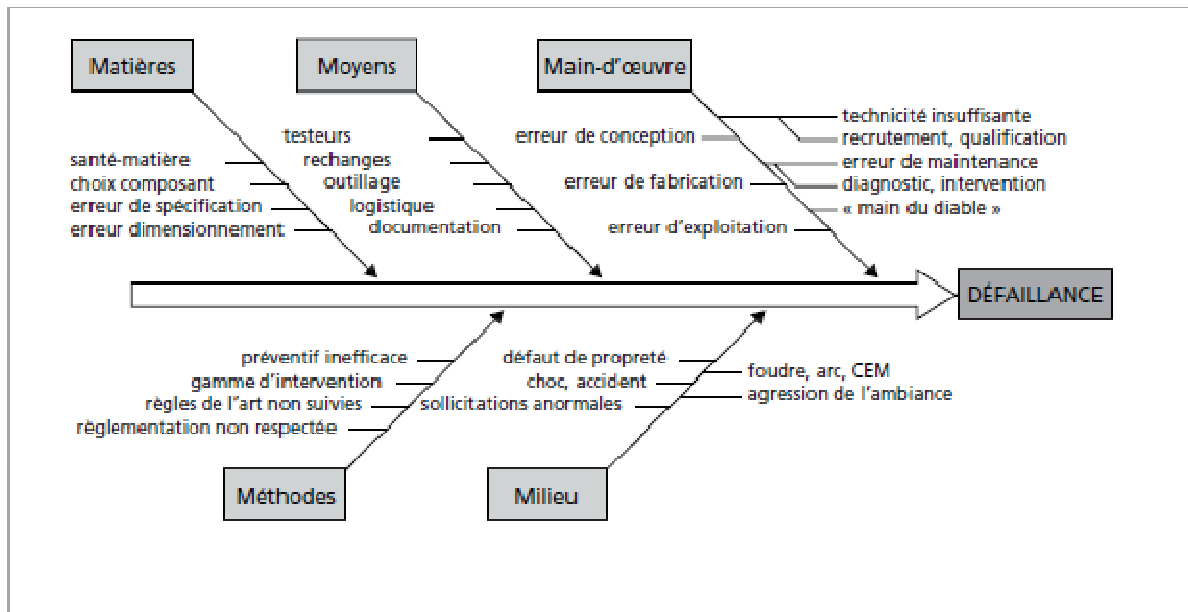


Figure N° I-11 : exemple recherche des causes potentiel d'une défaillance

### 1.4.8.3 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité

**Définition :** « L'AMDEC est l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité. C'est une méthode qui passe au crible tous les aspects d'un problème sans en privilégier, ni en négliger, aucun. Les mailles du crible sont ajustables à la finesse des solutions recherchées. C'est une méthode d'analyse qualitative faisant appel aux compétences d'un groupe de travail dans lesquels chacun maîtrise une des disciplines concernées par l'analyse. Il s'agit, pour le groupe, d'identifier les risques de défaillance, avec leurs causes et leurs conséquences, puis de définir, par un indice de criticité, les actions à entreprendre, dans l'ordre d'urgence et d'importance. L'analyse se concrétise sous la forme d'un tableau faisant apparaître, pour chaque élément traité, ses modes de défaillance, les causes et les effets de ces défaillances, les moyens de les détecter et de les prévenir, pour aboutir aux solutions possibles ».

« Elle est normalisée par l'AFNOR : norme X 60-510 de décembre 1986 ».

#### L'objectif de l'AMDEC :

L'étude AMDEC nous a permis de :

- Réduire le nombre des défaillances
- Prévention des pannes.
- Amélioration de la fabrication, du montage, de l'installation.
- Détection précoce des dégradations.

- Amélioration de la maintenance préventive.
- Amélioration de la surveillance et des tests.
- Réduire les temps d'indisponibilité après défaillance
- Prise en compte de la maintenabilité dès la conception.
- Amélioration de la testabilité.
- Aide au diagnostic.

L'AMDEC fait suite à une analyse fonctionnelle de groupe de travail comprenant :

- Les concepteurs qui ont établi l'avant-projet de l'équipement
- Des techniciens utilisateurs ou mainteneurs chargés d'enrichir le projet de leur connaissance du terrain et des pathologies susceptibles de se produire.

### La démarche pour réalisation d'une AMDEC

1. Constitution du groupe de travail
2. Choix du système à étudier et des objectifs à atteindre
3. Mise au point la fiche d'analyse AMDEC
4. Analyse fonctionnelle
5. Analyse des défaillances potentielles
6. Analyse de la criticité de chaque mode de défaillance
7. Hiérarchisation des problèmes
8. Propositions d'améliorations

#### 1.4.8.4 Arbres de défaillances

Arbres des défaillances AdD (FT) : Un arbre de défaillance construit toutes les combinaisons possibles de défaillances potentielles et les événements qui peuvent provoquer un arrêt de système.

Dans la construction des arbres des défaillances, les défaillances et les événements sont combinés ensemble à l'aide des portes logiques. Cette méthode est souvent utilisée dans les domaines de sécurité.

La méthode se résume par la recherche de l'événement redouté et le calcul de sa probabilité d'apparition, puis la décomposition des événements jusqu'à l'obtention des événements de base provoquant la défaillance [06].

### 1.5. La Sûreté de Fonctionnement (Dependability)

La Sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes technologiques et les défaillances humaines pour éviter ces conséquences (Zwinglestein 1995)

Elle se caractérise par l'analyse des défaillances et de leurs conséquences et s'exprime par un ensemble de caractéristiques : La fiabilité, La disponibilité, La maintenabilité, La sécurité [IMAM, Z. (2015)].

### 1.5.1 La fiabilité (Reliability) :

**Selon la norme (NF X 60-500)** « La fiabilité est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions d'utilisation données, pendant une période de temps donné ».

Le terme « fiabilité » est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité  $R(t)$  OU  $F(t)$ .

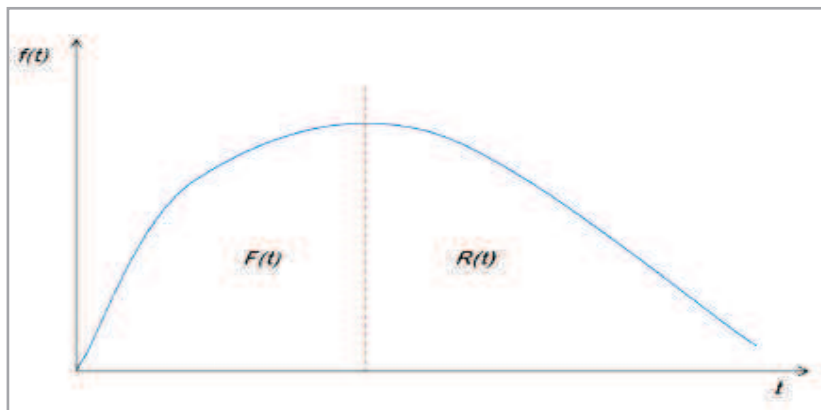
**La fiabilité extrinsèque** : elle résulte des conditions d'exploitation, de qualité de maintenance, d'une manière générale d'évènements relatifs à l'intervention humaine

**La fiabilité intrinsèque** : elle est propre à un matériel est un environnement donné, et ne dépend que de la qualité de ce matériel [Y, T. B. (2007)]

#### 1.5.1.1 Les indicateurs de la fiabilité

**1/ Fonction de réparation** : est généralement notée  $F(t)$  et représente la défaillance

dans l'intervalle de temps  $[0.t]$ . 
$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$



**Figure N° I-12** : Fonction de densité de probabilité et fonction de répartition

**1 / Fonction de fiabilité :**

$R(t) = 1 - F(t)$ , représente la probabilité de non défaillance dans l'intervalle de Temps (t) ; c'est la fonction complémentaire de la fonction de réparation.

**2 / Fonction du taux de défaillance :**

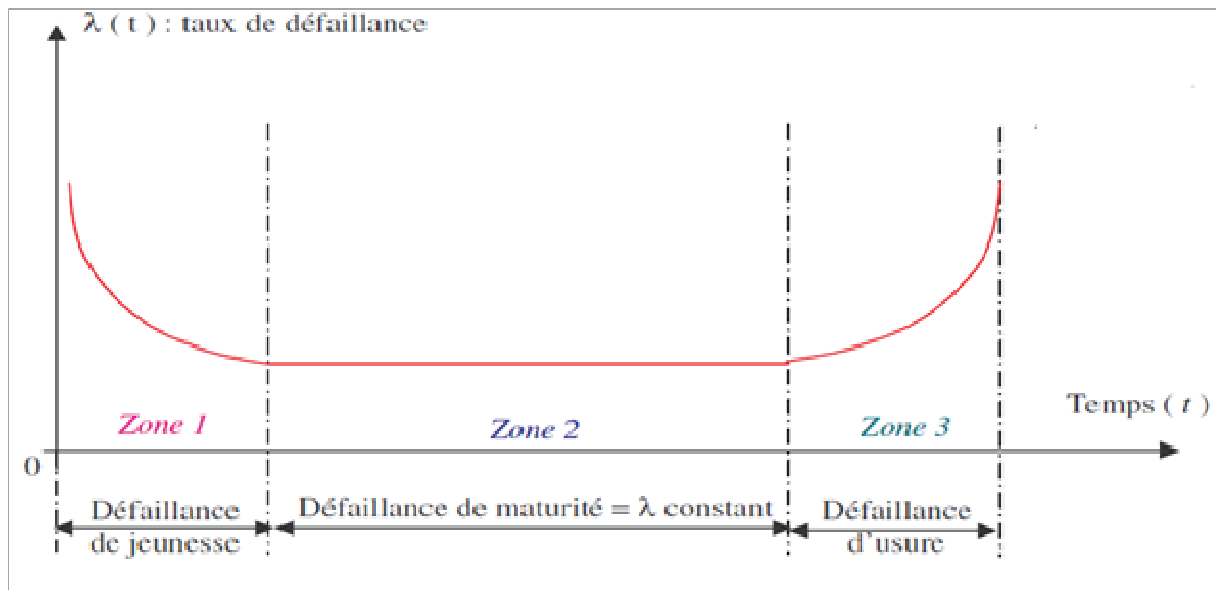
Est noté généralement «  $\lambda(t)$  » et représentée la probabilité de défaillance à  $(t+\Delta t)$   $\lambda(t)$  est une densité de probabilité conditionnelle car elle considère que la probabilité de défaillance

du matériel encore en fonctionnement.

$$\lambda(t) = \frac{\text{Nombre des défaillances}}{\text{Nombre des entités survivantes}}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Le but principal de l'étude des taux des défaillances est d'obtenir des données qui représentent le comportement global de défaillance d'un système le taux des défaillances est représenté par la courbe en baignoire dans la figure



*Figure N° I-13 : courbe baignoire pour la variation du taux de défaillance*

**3 / Le moyen des temps de bon fonctionnement :**

Le MTBF est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

**4 / Le taux moyen de défaillance :**

Le MTTF le moyen taux de défaillance permet de définir la probabilité instantanée de Tomber en panne

**1.5.1.2 Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité**

Il existe deux types de lois dans la fiabilité :

1. *Les lois discrètes* : la loi de Poisson, Binomiale.
2. *Les lois continues* : la loi de Weibull, loi Exponentielle, Normale et loi Log normale

### 1.5.2 La Maintenabilité (Maintainability)

Selon (AFNOR 2001) « Dans des conditions données d'utilisation, l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. ». **Selon la norme (NF X 60-500)** « C'est l'ensemble des actions destinées à maintenir ou rétablir une entité dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise »

Elle se caractérise par la probabilité  $M(t)$

La maintenabilité ne se différencie de la fiabilité que sur ce dernier point : elle caractérise la promptitude de reprise du service attendu après interruption. La maintenabilité, c'est la brièveté des pannes (état dû à une défaillance).

**1 / Dispositif réparable :** un dispositif est dit réparable lorsque est caractérisé par la possibilité à remplacer un ou plusieurs constituants défectueux par d'autres neufs et de même type, sans échanger ceux non défectueux.

**2 / Dispositif non réparable :** un dispositif est dit non réparable lorsque est constitué d'un ou plusieurs composants généralement mécanique ou électrique ou un ensemble des pièces dont la défaillance de l'une entraîne le remplacement de toutes, donc l'ensemble.

#### 1.5.2.1 Les indicateurs de la Maintenabilité :

La fonction Maintenabilité  $M(t)$  est la probabilité d'un dispositif à être réparé avant un temps  $t$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t}$$

Sachant que le système est défaillant à l'instant  $t$ .

#### 1/ Le taux de réparation :

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

Le taux de réparation exprimée en l'unité de temps (interventions/h)

#### 2/ Moyenne de temps de réparation MTTR :

$$MTTR = \frac{\sum t_i}{\sum deF}$$

Avec  $t_i$  temps cumulé de réparation

De  $F$  : nombre totale d'intervention.

### 1.5.3 Disponibilité (Availability)

« Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. » Elle se caractérise par la probabilité  $A(t)$  ou  $D(t)$  d'être en état, à l'instant  $t$ , d'accomplir les fonctions requises.

La disponibilité est une synthèse de la fiabilité et de la maintenabilité et la logistique c'est la proportion du temps passé en état de remplir les fonctions requises dans les conditions données.

L'indisponibilité (son complément) est la proportion du temps passé en panne.

#### 1.5.3.1 Les indicateurs de mesure des différents types disponibilité

##### a. Disponibilité moyenne

La disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné peut être évalué par les rapports suivants :

$$D_m = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps de disponibilité} + \text{Temps d'indisponibilité}}$$

Où :

$$D_m = \frac{TCBF}{TCBF + TCI}$$

Avec : TCBF : temps cumulé de bon fonctionnement

FCI : Temps cumulé d'immobilisation

##### B. Disponibilité intrinsèque :

Cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes de bon fonctionnement et les moyennes de réparation ce qui donne :

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Avec : MTBF : moyenne de temps de bon fonctionnement.

MTTR : moyenne e temps d'immobilisation pour intervention de maintenance.

Cette disponibilité correspond à des conditions idéales, c'est à dire avec un support logistique parfait. MTBF et TCBF d'une part et, TCI d'autre part.

##### C. Disponibilité opérationnelle :

Pour cette mesure, sont pris en compte le temps logistique, ce qui donne :

$$D_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MTL}$$

Avec : MTL : moyenne des temps logistiques.

#### D. Disponibilité instantané :

Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance  $\lambda$  constant et d'un taux de réparation  $\mu$  constant, on montre que la disponibilité instantanée a pour expression

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \quad [\text{Y, T. B. (2007)}]$$

#### 1.5.4 Sécurité (Safety) :

Selon la norme (AFNOR X-06-010), « C'est l'aptitude d'une entité à ne pas causer des dommages dans des conditions données ou à ne pas faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou caractéristiques. »

La sécurité est la notion la plus ancienne dont l'origine se perd dans la nuit des temps. Les travaux de terminologie de L'ISDF montrent que, contrairement aux trois termes précédents dont les définitions ne souffrent que de différence superficielle, les définitions de la sécurité sont très diverses.

$S(t) = \text{Pr}(\text{Éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t])$

La présence d'un danger seul n'est pas suffisante pour définir une condition de risque mais par contre il y aura une incertitude amenée par le danger lui-même, comme un état potentiel, se traduit en un état actuel d'endommagement. La définition qualitative du risque implique les deux notions :

$$\text{Risque} = \text{Endommagement} + \text{Incertitude} \quad [\text{IMAM, Z. (2015)}]$$

#### 1.6 CONCLUSION

Le haut niveau de complexité de l'industrie, la compétitive, les bénéfiques, taux de production sont des obligations pour les responsables pour avoir surveillance, prévoir, maîtriser, optimiser toutes les situations au niveau du system de production, machines, équipements, et installations.

Pour cela les spécialistes de maintenance. Qui resteront maintenant et à l'avenir les professionnels de la santé des machines leur rôle sera souvent double : maintenir les machines et surveiller la production elle-même, la maîtrise de fonctionnement des systèmes de production automatisée plus en plus exotique de façon durable Quel que soit le secteur industriel.

Devant cette importance la stratégie de maintenance et même le choix des différents critères de management et la gestion des opérations et les

interventions sans influer sur les revenus de production et asservie le bon fonctionnement des installations par la détection au stade précoce de toutes les anomalies qui causent les dysfonctionnements du différent organe.

Parmi les stratégies de maintenance est la maintenance conditionnelle qui en doit discuter de manière plus détaillée au prochain chapitre.

# CHAPITRE II

# L'APPROCHE DE LA

# MAINTENANCE

# INDUSTRIELLE

## II.1 INTRODUCTION

La stratégie de maintenance a des répercussions directes sur l'exploitation des Systèmes, la production et les charges financières, la concurrence impitoyable qui vise continuellement à améliorer aussi bien la qualité et les prix des produits que les délais de production, les systèmes de production de plus en plus complexes et sophistiqués qui sont à la fois plus performants et plus fragiles, les problèmes de sécurité des biens et des personnes devant ce constat il oblige les managers doit faire un choix, ce choix doit permettre de satisfaire aux mieux les objectifs fixés a priori et permettre ainsi une exploitation optimale du système[[ZWI, 1996]].

Cependant, il peut être intéressant de ne pas trop intervenir pour ne pas ralentir une production, par exemple. Il est donc nécessaire de trouver un compromis, un équilibre entre maintenance préventive et maintenance corrective, Une stratégie de maintenance qui semble prometteuse est la maintenance conditionnelle.

La maintenance conditionnelle consiste à n'arrêter une machine pour entretien et Corriger les dysfonctionnements de systèmes très divers et souvent complexes (systèmes électromécaniques, systèmes industriels, réseaux. etc.) Grâce à des indicateurs (vibration, température, pollution des huiles), les réparations sont retardées et programmées en tenant compte des impératifs de production.

[(Aide-mémoire Maintenance conditionnelle)]

**II.2 Maintenance conditionnelle « Norme AFNOR FDX 60-000 »** « Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères Prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service »

Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les remises en état nécessaires. » [(JEAN, 2010)].

D'après la *CEN* « maintenance préventive consistant en une surveillance du fonctionnement du bien et des paramètres significatifs de ce fonctionnement

intégrant les actions qui en découlent. La surveillance peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. ».

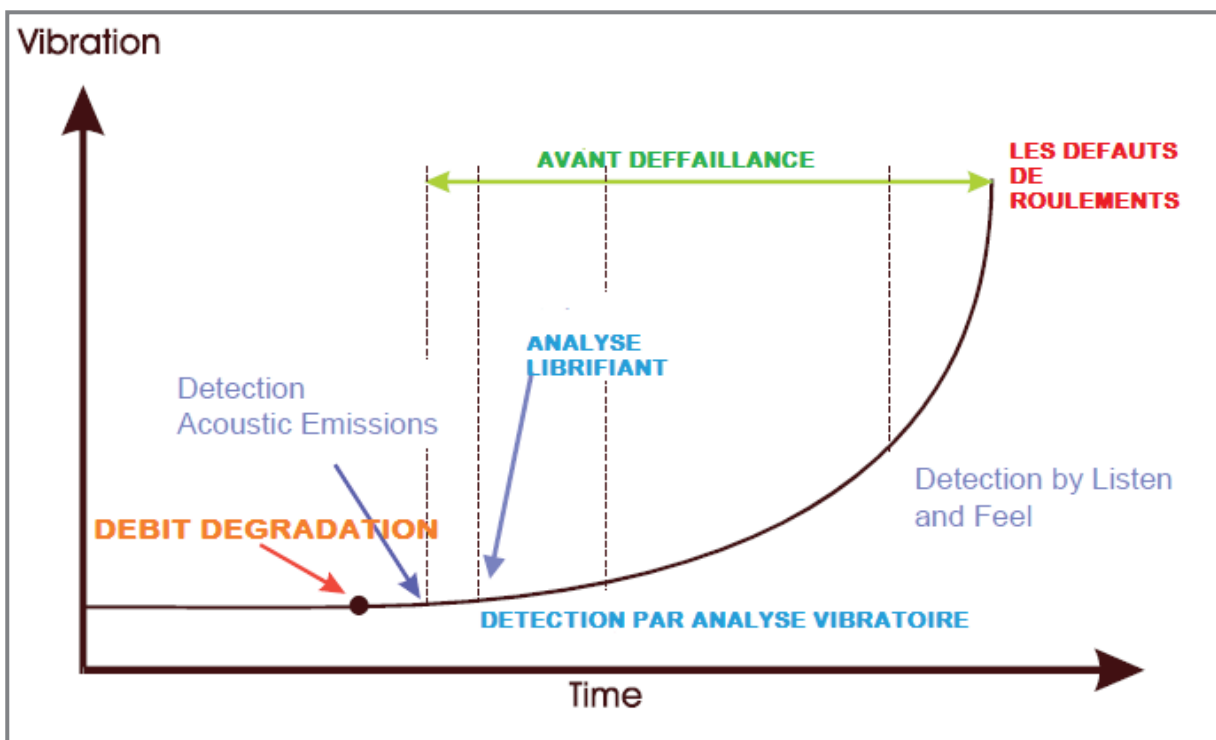
Les normes ont en commun la notion de « surveillance » de l'état à partir d'un paramètre significatif d'une dégradation, souvent par des mesures.

Avant la parution des normes AFNOR, la maintenance conditionnelle s'appelait « *On condition* » ou « *selon l'état* » [(JEAN, 2010)].

Ce type de maintenance est basé sur la détection et la surveillance d'indicateurs de dégradations des systèmes électromécaniques qui déclenchent en cas de dépassement de seuils, des interventions de changement de pièces d'usure avant une éventuelle casse qui pourrait s'avérer très coûteuse.

Les différents outils utilisés dans l'industrie sont :

- La surveillance vibratoire des machines tournantes.
- La thermographie infrarouge.
- L'analyse des huiles.
- Les ultrasons.
- Autres méthodes d'inspection (control non destructifs).



*Figure N° II-01 : optimisation de temps d'utilisations des techniques de surveillance*

**Avantages :**

- optimisation de la durée de fonctionnement
- optimisation de l'intervention (préparation)

- évaluation réelle de l'état de la machine
- évite les pertes de production

**Inconvénients :**

- coût de l'investissement (homme / matériel)
- s'atteindre à un programme suivi [(MERZOUG, 2005)].

**II.3 PRINCIPE DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE**

Le principe de la maintenance conditionnelle. Il est basé sur l'établissement préalable d'un diagnostic est réalisée à partir de l'étude quantitative de l'évolution d'un certain nombre de paramètres caractéristiques de l'état de fonctionnement de l'installation, et puit en suivra sur les mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle, qui permettant ainsi d'atteindre l'objectif précisé a prêtre les étapes suivantes :

- Relevé des mesures.
- Surveillances des seuils préjuger et comparaisons avec les signatures
- Détection d'un défaut qui se développe.
- Établissement d'un diagnostic
- Planification des interventions.bi

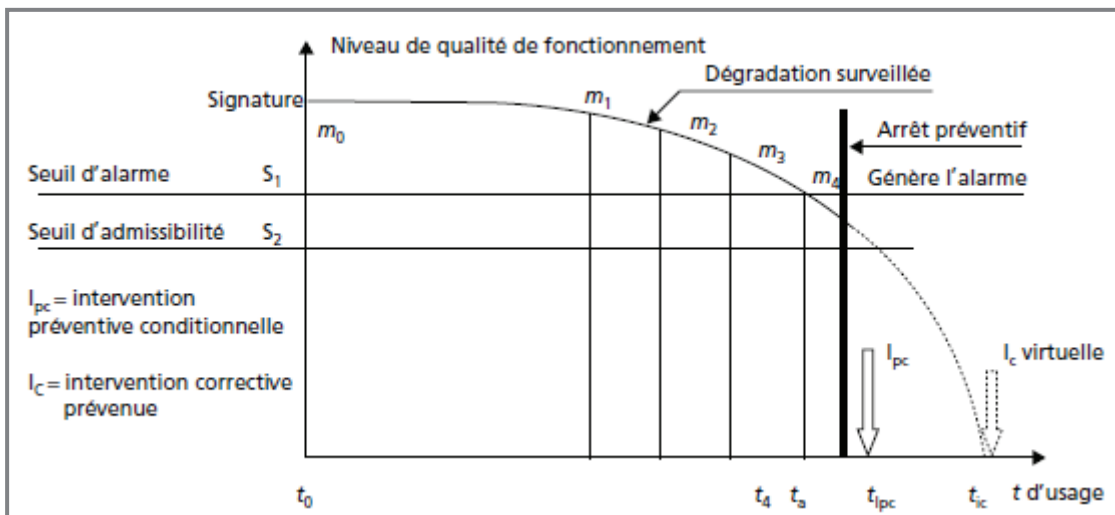


Figure № II-02 : Principe de la maintenance conditionnelle

- La « **signature** » est une prise de référence de l'état de « bon fonctionnement » à l'origine.

**II.3.1 MÉTHODOLOGIE DE LA MISE EN ŒUVRE**

La méthodologie est proposée en neuf étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir

avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer des diagnostics et des pronostics de façon efficace, économique et sans arrêter les machines :

1. Sélection des défaillances à prévenir
2. Sélection d'un (ou  $n$ ) paramètre physique pour surveillance
3. Choix des capteurs
4. Choix du mode de collecte des informations
5. Détermination des seuils :
  - Seuil d'admissibilité ou seuil d'alerte
  - Seuil d'alarme ou seuil de danger
6. Choix du traitement de l'information :
  - De la surveillance à l'analyse
  - De l'analyse au diagnostic
7. Définition des procédures après alarmes
8. Organisation de l'intervention conditionnelle
9. Bilan d'efficacité et retour d'expérience

## II.4 Les outils de la maintenance conditionnelle

Nous avons vu que nous pouvons mettre en œuvre de la maintenance conditionnelle à partir de la méthodologie proposée des principaux outils spécifiques suivant.

### II.4.1 ANALYSE THERMIQUE & THERMOGRAPHIE INFRAROUGE IR

Elle permet de visualiser et de quantifier les échauffements, et de suivre l'évolution des usures et des dérives des différents organes dans le temps.

Une variation de température sur un équipement est souvent signe de dégradation d'usure de défaillances potentielles. Deux techniques sont distinguées :

**1- ANALYSE THERMIQUE** : Mesure de température à l'aide de capteurs de types sondes, thermocouples, thermistances ou thermomètres par contact un contact entre l'élément dont on veut mesurer la température et l'appareil de mesure.

**2- Thermographie I-R** : La thermographie infrarouge est un outil de maintenance préventive conditionnelle et de maintenance prédictive. Dans les mains d'un thermographe, une caméra infrarouge peut être utilisée pour donner la vie au monde

invisible à l'œil humain à partir une scène de thermo gramme qui est l'image des mesures de température [(Beard, 2007)].

**Principe :**

Tout corps dont la température est supérieure à zéro degré absolu qui va ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) émet un rayonnement électromagnétique, et on est capable de détecter ce rayonnement sous la forme de sensation de chaleur.

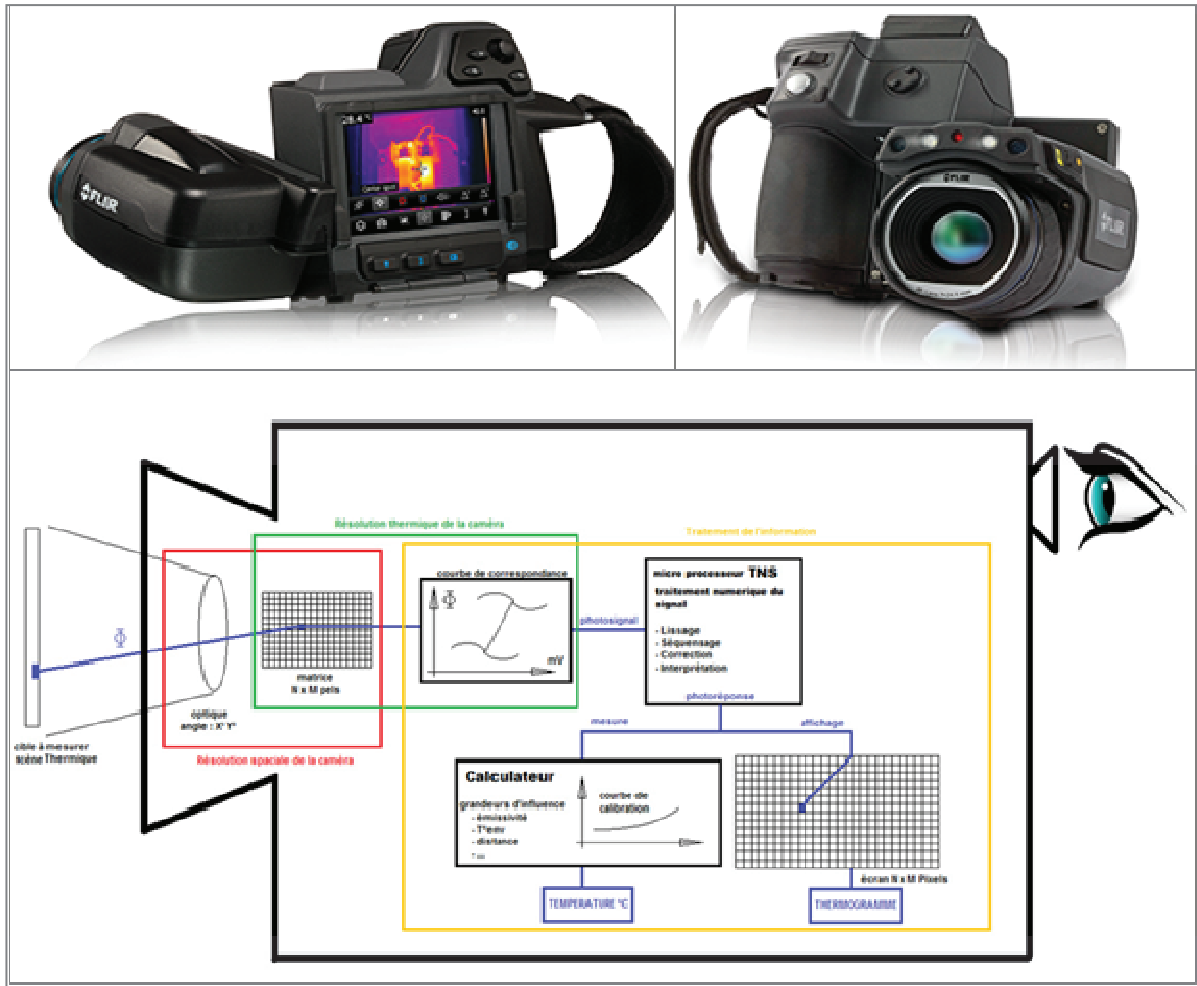
La thermographie infrarouge est la technique permettant de mesurer, par l'intermédiaire d'un détecteur, la puissance du rayonnement électromagnétique dans le spectre des infrarouges, émis par chaque point d'une scène ou d'un objet observé, au moyen de thermomètres à rayonnement ne nécessite aucun contact Ces rayonnements ont des longueurs d'onde qui se situent dans l'infrarouge et sont proportionnels à la température des corps Un calculateur intégré au thermomètre convertit les rayonnements en températures sur base d'un étalonnage référentiel spécifique.

Le thermomètre à rayonnement se compose en fait d'un radiomètre et d'un calculateur, Le radiomètre mesure la puissance de rayonnement émis et le calculateur la transcrit en températures.

Pour les hautes températures c'est le pyromètre qui prend le rôle de radiomètre.

Si on associe à l'observation d'une même scène thermique un système radiométrique de captation spatiale adjoint à un calculateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une **CAMÉRA INFRAROUGE**.

Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique ce dernier est appelée **THERMOGRAMME**.



B

MAINTENANCE CONDITIONNELLE

Figure N° II-03-a : camera IR et principe fonctionnement de IR

Le spectre électromagnétique

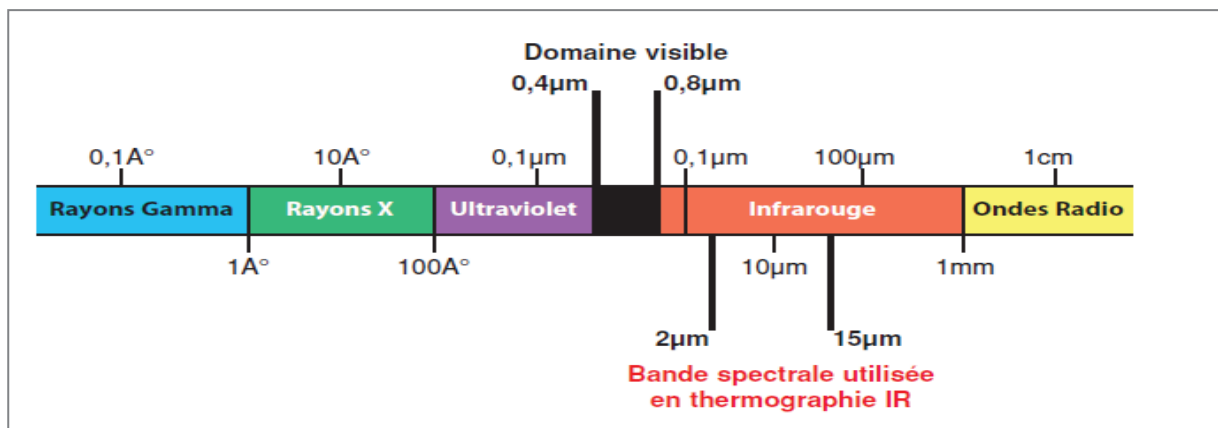


Figure N° II-03-B : spectre électromagnétique

La bande infrarouge s'étend de 0,8 à 1000 µm : celle-ci peut être divisée en plusieurs

Sections :

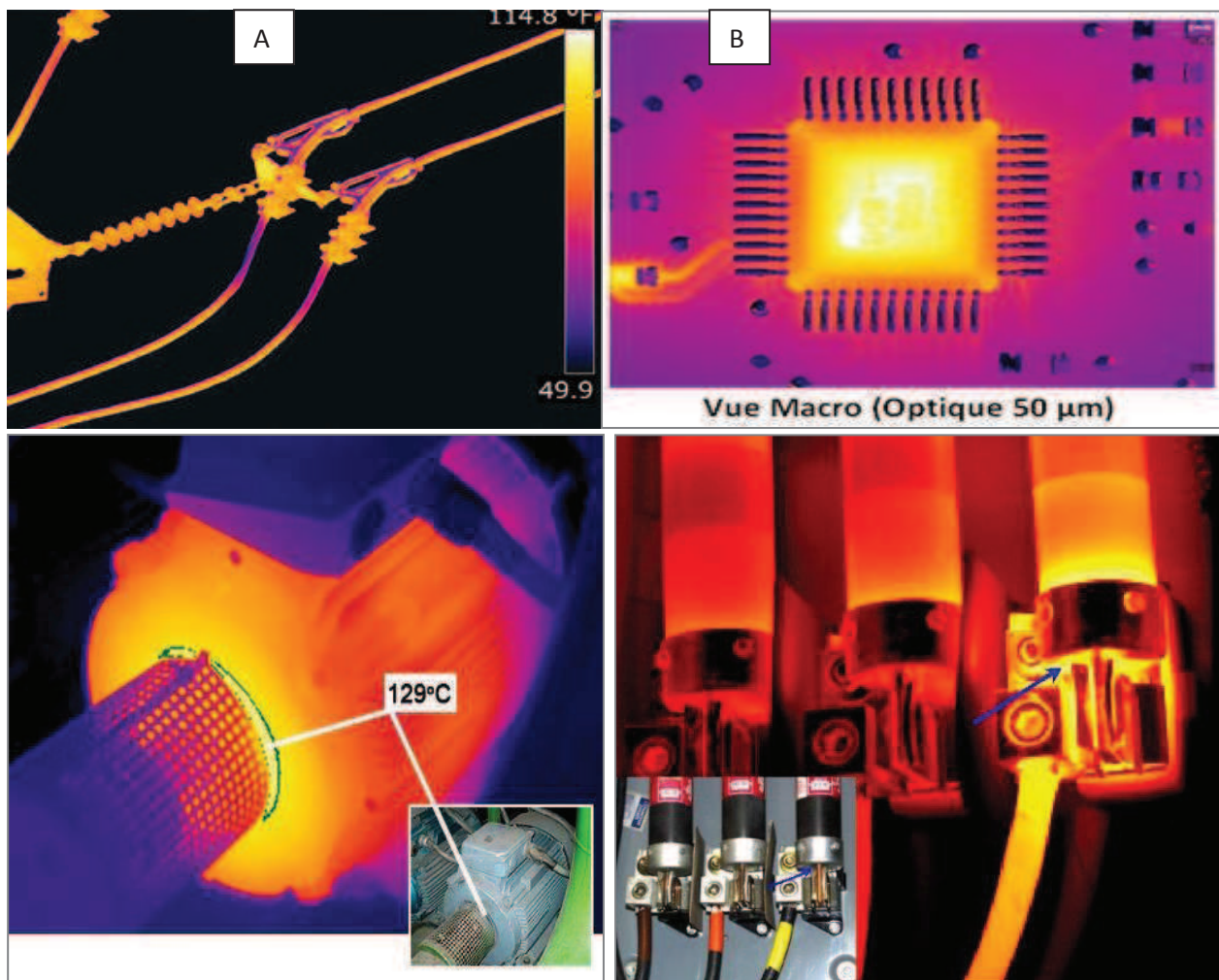
- l'infrarouge proche : 0,8 à 3 µm
- l'infrarouge moyen : 3 à 6 µm
- l'infrarouge éloigné : 6 à 15 µm

- l'infrarouge lointain : 15 à 1000  $\mu\text{m}$ .

### II.4.1.1 Applications de la thermographie infrarouge

Une mesure des infrarouges, permet d'avoir une image du rayonnement que l'on peut relier à la température le champ d'utilisation et d'application de l'infrarouge est privilégiées tel que :

- Contrôle des équipements électriques haute et basse-tension
- Contrôle sur des équipements mécaniques
- Contrôle sur des équipements thermiques
- Contrôles qualitatifs et quantitatifs des échanges thermiques
- Surveillance de carte électrique ;
- Surveillance de l'état des revêtements de four des résistances ;
- Surveillance de la distribution de l'énergie électrique : transfo, armoire électrique ;
- Control l'état des réseaux des fluides des caloporteurs ou frigorigifs



**Figure N° II-04 :** exemples des images thermographiques (A : ligne haut tension  
B : carte électronique C : échauffement Moteur, D : échauffements fusible).

En fin cette technique aide au diagnostic rapide, et d'une mise en œuvre facile, avec une haute gamme de sécurité, mais avec un coût aissy important.

#### II.4.2 STROBOSCOPIE :

Le principe de base de la stroboscopie est le suivant : lorsque les éclairs du stroboscope dirigés sur un objet animé d'un mouvement périodique, ont la même fréquence que celle du phénomène observé, l'objet apparaît comme immobile. Cette technique est utilisée en aide au diagnostic suivant deux applications :

1. Visualisation de vibrations périodiques : l'immobilisation d'un composant animé par des mouvements oscillatoires permet de vérifier que les vibrations ne dépassent pas un seuil maxi.
2. Contrôle d'organes de transmission : à ce niveau, intervient la notion d'observation de phénomènes dynamiques sans arrêter l'équipement. L'application caractéristique est la vérification de courroie pendant la rotation ce qui permet de détecter des fissures invisibles en statique.

Une utilisation très simple, une mise en œuvre aisée et un coût faible, sont les principaux avantages de cette technique. Un seul regret, le domaine d'application restreint.

#### II.4.3 ANALYSE ULTRASON

L'ultrason est un Vibration de même nature que le son prenant naissance et se propageant dans tout Support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité mais correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kilohertz a plus de 100 MHz (microscopie acoustique, application électronique).

[\[\(www.larousse.fr\)\]](http://www.larousse.fr)

Les ultrasons ont de nombreuses applications : sonar, écholocation, échographie médicale, contrôle non destructif industriel.

La gamme 1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel Cela n'est pas un hasard car ces fréquences correspondent, pour les matériaux courants, a des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilite de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques. [\[Mémoire fin d'étude Yacine ferg\]](#)

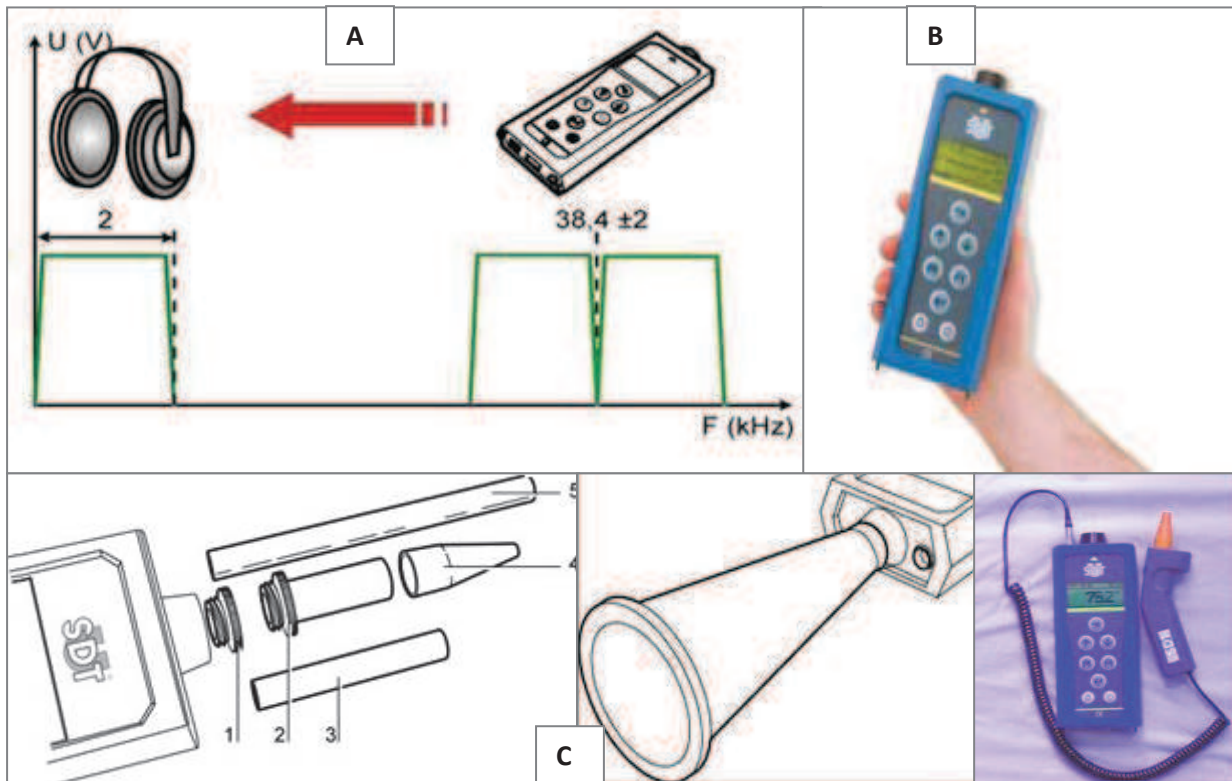
**Domaine d'applications :** le champ d'application pour l'analyse ultrasonique en maintenance est principalement pour le diagnostic de différents des défauts Y compris les suivantes :

- Détections des fuites (La fuite pneumatique de valeur ou de gaz, liquide etc.)
- Contrôle d'étanchéité.
- Contrôle de graissage.
- Contrôle l'usure mécanique du roulement.
- Inspections électriques.
- Monitoring des vibration acoustiques
- Contrôle des vans et des installations hydrauliques

L'utilisation de ce type d'outil permet d'éviter des démontages inutiles, la mise en Œuvre est aisée et le coût faible par rapport aux bénéfices potentiels. Un atout supplémentaire est la possibilité de suivre avec précision un phénomène d'usure mais Le domaine d'application est relativement restreint. Ce qui constitue un inconvénient.

### II.4.3.1 Principe de détections des ultrasons

Pour détecter il faut un équipement ayant la capacité de recevoir les fréquences ultrasonore et convertie en sons audibles.



**Figure N° II-05 : A, B ; C : l'appareille et capteur détecteur et ces accessoires.**

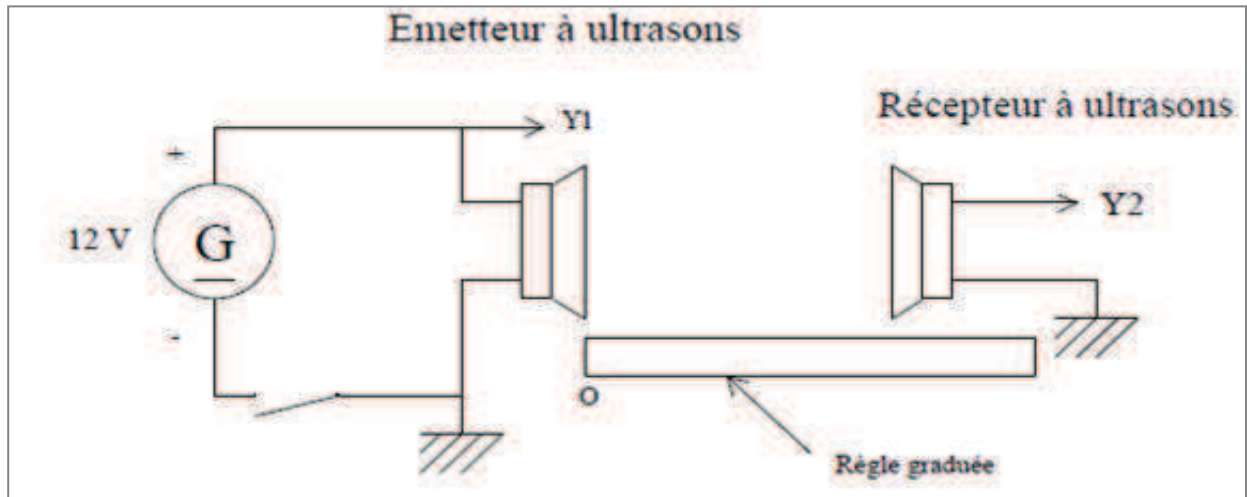


Figure N° II-05 : principe des ultrasons (séminaire G I Strasbourg SDT)

#### II.4.5 ANALYSES DES HUILES

Service proposé par les groupes pétroliers fournisseurs de lubrifiants, et adaptés à la maintenance des moteurs Diesel, des circuits hydrauliques et des systèmes mécaniques pour lesquels la qualité de l'huile est prédominante pour la durée de vie [(JEAN, 2010)].

Elle donne des indications qualitatives et/ ou quantitatives sur les dépôts de matières correspondants aux usures.

L'analyse des lubrifiants permet de noter les anomalies de fonctionnement des machines (incriminer un organe de l'installation), renseigne sur l'état de l'usure de l'équipement sans démontage de l'équipement à diagnostiquer :

- Huile hydraulique
- Huile moteur ;
- Huile de coupe ;
- Huile synthétique
- Graisse ;
- Huile isolante.

Deux paramètres importants conditionnent la lubrification correcte machines

L'état de lubrifiant et l'état des surfaces lubrifier, les analyses des échantillons

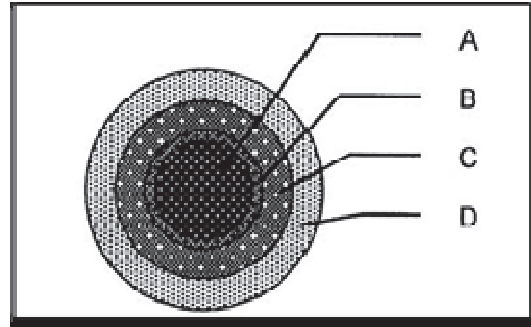
Du fluide baser sur Les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant et d'autre part identifier les éléments mécaniques d'usures.

Deux facteurs prépondérants interviennent pour modifier les caractéristiques du lubrifiant : **la dégradation** et **la contamination**

Le suivie des caractéristiques physico-chimiques permet d'apprécier l'état de dégradation et comtifier l'état de contamination suivant un référence pré établie

Les inducteurs prise en compte sont :

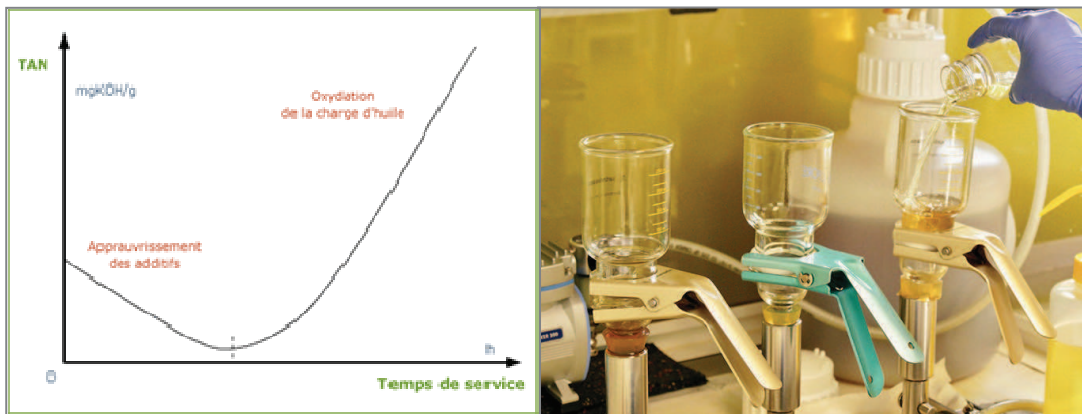
- Aspect, couleur, odeur ;
- Analyse d'une tache d'huile
- Viscosité ;
- Indice de viscosité ;
- Indice d'acidité ;
- Point d'éclaire
- Pollution etc...



**Figure N° II-06 : Tache d'huile**

**Exemple :** Dans une huile moteur, la présence de cuivre ou de plomb peut indiquer en fonction des quantités une usure prématurée des paliers du vilebrequin et la présence de bore indiquera un passage de liquide de refroidissement dans le moteur.

Ce système d'aide au diagnostic permet de donner un État de santé de l'équipement à diagnostiquer, donc d'intervenir avant la panne catalytique de la machine et éviter des démontages inutiles. Le technicien a pour tâche le prélèvement de l'huile (seulement cela).



**Figure N° II-07 : principe de l'analyse d'huile**

L'avantage se résume dans le faible coût de l'analyse. L'inconvénient majeur est le domaine d'application restreint l'analyse des huiles des moteurs reste l'application privilégiée.

## II.4.6 L'analyse vibratoire

Tous Les éléments d'une machine, lors du fonctionnement, engendrent des efforts internes et des déformations au sein de la structure. Ces déformations et efforts varient en fonction de la fréquence de rotation et des défauts de l'élément (roulement à billes, ...). Ces déformations et ces efforts entraînent le déplacement de la structure par rapport à elle-même, ce qui constitue la vibration.

L'analyse vibratoire a pour but de déterminer les forces internes et externes qui sont appliquées à une installation et de statuer sur la gravité de leurs présences et de leurs amplitudes, Ces dernières et occupent de ce fait une place privilégiée parmi les grandeurs à prendre en considération pour assurer la surveillance des machines.

Ces machines vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations à un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement, dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc... Apparaissent, l'allure de cette image change, ce qui permet, de quantifier l'intervention. La plupart des défauts mécaniques ou électromécaniques peuvent être détectés par cette technique.

### *MESURAGES :*

L'analyse vibratoire est basée sur un système de mesurage e de traitement et analyse doit être fait en considérants un but : surveillances protection diagnostic connaissances des comportements des machines est leurs éléments constitutifs.

La chaîne de suivi vibratoire est constituée de trois éléments principaux :

- Les capteurs : (accéléromètres, vélocimètres, etc.)
- Conditionnements :(redressements, filtrages ...etc.)
- Traitements : (analyses FFT, analyses d'enveloppe...etc.)

### II.4.6.1 Domaine d'application pour l'analyse vibratoire

Parmi les différentes techniques de surveillances sur le plan industriel

Le domaine d'application de l'analyse vibratoire reste le plus répondu pour la surveillances, protection et diagnostic sur les machines, et en plus Pratiquement l'analyse vibratoire couvre la détection de majorités des problèmes et elle est la plus utilisées dans la détection précoce des défauts de dysfonctionnement

Voire le tableau suivant :

DEFAUT	TYPE DE SURVEILLANCE								
	ANALYSE DES HUILES	Analyse ACOUSTIQUE	T <sup>®</sup>	THERMOGRAPHIE	P	DÉBIT	ANALYSE VIBRATOIRE	STROBOSCOPIE	ALIGNEMENT
Balourd							1		X
Désalignements			X	X			1	X	X
Roulements	X	X	X	X			1		
Paliers	X	X	X	X	X	X	X		1
Engrenages	X	X					1		
Résonnance		X					1	X	X
Cavitations		X					X		
Courbure d'arbre							1		X
Déséquilibre électriques							1		
Tourbillon D'huiles		0					1		1
Courroies							X	1	
Souillures							1	X	X
Contamination	1						1		
Manque de lubrifiant	1	X	1				1		X
adapte		1	non adapte		0		moyenne	X	

**Tableau N°02 : Les principale méthodes de détection suivant les défauts potentiels**

*[Tableau suivant une formation SKF SONTRACH]*

Cette technique est très difficile à mettre en œuvre en particulier en ce qui concerne le placement du capteur qui doit être localisé au plus près des éléments en mouvement sur une partie rigide et si possible sans éléments intermédiaires (problème d'accessibilité sur de nombreuses machines). Généralement les capteurs sont placés sur les paliers et les points de fixation des machines.

L'interprétation des résultats est aussi une tâche complexe qui nécessite une grande expérience de cette technique par contre, quand cet outil est mis en œuvre correctement les acquis peuvent être considérables et éviter des démontages importants donc des arrêts de production inutiles [\[\(fethi, 2009\)\]](#).

## II.5 Conclusion

Avant tout pour que la maintenance conditionnelle, soit efficace, doit dans tous cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel, aussi avoir le niveau technique et l'expériences nécessaires pour applique Les différentes applications suivant une étude préétablie pour évaluer et standardisée les mesures des secteurs ou les champs d'application par les choix rationnelle parmi les différentes techniques d'application et les indicateurs fiables pour avoir présenté des meilleurs décisions sur le plan de managements et organisations et augment la maitrise des comportements de matériel et outils de production, aussi l'améliorations des capitaales investie dans ce dernier.

Parmi tous les paramètres de surveillance et diagnostic l'analyse vibratoire est de loin le plus riche aux informations recueillies, précision de diagnostic et autorise la prise des décisions répondu à la base de la maintenance conditionnelle c'est pour cela en doit traiter prochainement de manière plus détaillé l'analyse vibratoire en maintenance.

# CHAPITRE III

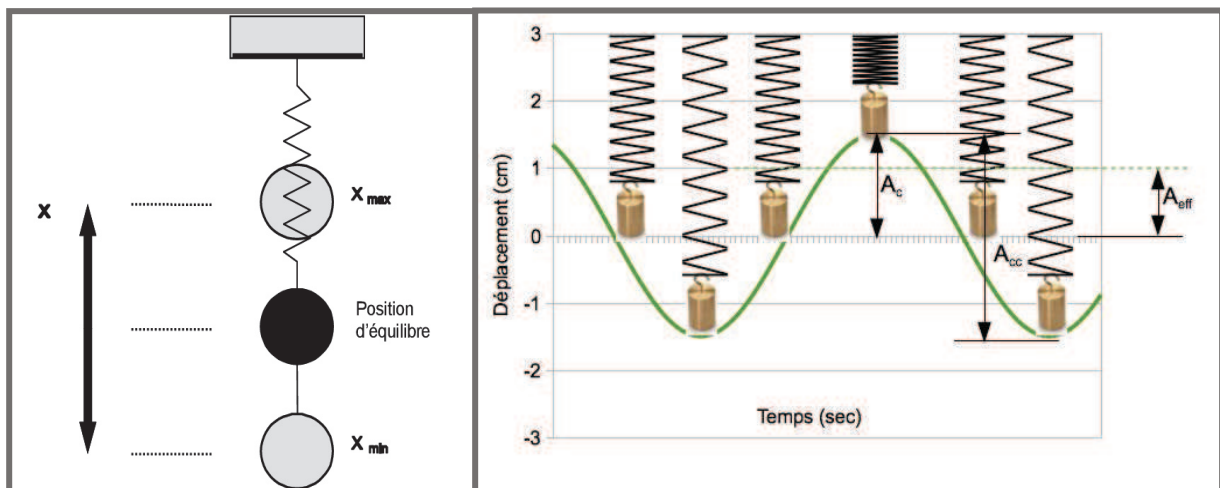
## THÉORIE DE L'ANALYSE VIBRATOIRE

## III.1 INTRODUCTION

La surveillance est le concept de base sur lequel reposent les deux formes de base des maintenances préventives que ce soit conditionnelle ou prévisionnelle surveiller les machines ne doit pas seulement remplir sa fonction initiale « de sécurité » mais aussi permettre la détection précoce des défauts et d'en suivre l'évolution dans le temps à partir des choix d'un ou plusieurs indicateurs pour assurer la détection au stade précoce des défauts [ (A.boulenger, 2003)].

## III.2 NOTIONS DE BASE ET THEORIE DE VIBRATION

**III.2.1 QU'EST QU'UNE VIBRATION :** Un système est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement dont chaque particule ou élément va-et-vient périodique autour d'une position moyenne appelée « position d'équilibre » figure21.



**Figure N° III-01 :** naissance d'une vibration (SONATRACH FORM).

La transmission du mouvement vibratoire peut se faire soit au travers d'un gaz (généralement de l'air) ou d'un fluide (eau, huile...), soit au travers d'une matière solide comme la structure d'une machine, ses paliers, ses rotors ou encore la tuyauterie qui lui est associée... L'exemple le plus simple d'un système en vibration est sans doute donné par le mouvement d'une masselotte suspendue à un ressort et relâchée après Traction Cet exemple (figure 21) montre que si le mouvement est entretenu par une force d'excitation périodique.

## III.2.2 CARACTÉRISATIONS D'UN VIBRATION

L'exemple (**figure 01**) montre que si le mouvement est entretenu par une force D'excitation périodique :

- 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** ».
- La durée du cycle lorsque la masselotte oscille autour de sa position d'équilibre pour une seul fois s'appelle la « **période** ».

**III.2.2.1 LA FRÉQUENCE :** La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné ; Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz).

(Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz).

**Les unités :** L'unité normalisée (unité SI) de la fréquence est le Hertz (Hz),

**1 hertz = 1 cycle par seconde**

On rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute).

$$1 \text{ Hz} = \frac{1 \text{ CPM}}{60} = \frac{1 \text{ RPM}}{60}$$

**III.2.2.2. PÉRIODE :** La période T d'un phénomène ou l'intervalle de temps parant deux passages successifs en même position et dans le même sens ; La période s'exprime en Secondes (s).

### III.2.2.3 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 = 1/50e de seconde**

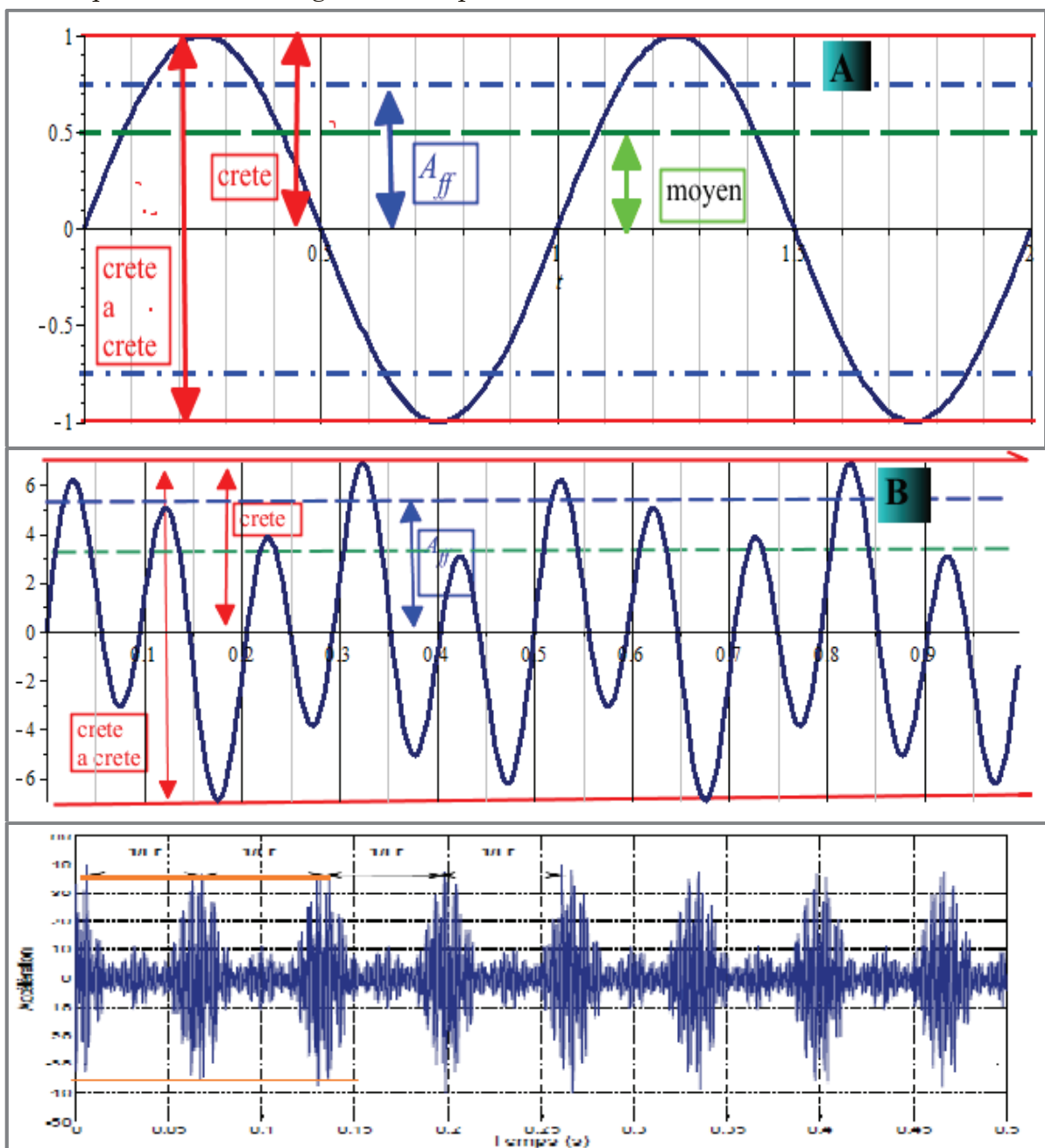
La fréquence f est donc l'inverse de la période T :

$$f = \frac{1}{T}$$

**III.2.2.4 L'AMPLITUDE :**

On appelle **amplitude** d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre.

- **L'amplitude « crête (Ac) »**. Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.
- **L'amplitude « crête à crête (Ac-c) »** appelée « peak to peak » (Ap-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** » ( $Ac-c = 2Ac$ ).
- **L'amplitude « efficace (Aeff) » 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 N° III-02 :** Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal (en a), complexe (en b), impulsionnel périodique (en c).

Dans le cas d'une **vibration sinusoïdale** (induite par exemple par un balourd), les amplitudes crête, crête à crête et efficace sont liées par les relations suivantes :

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_C = 0,707 A_C$$

$$A_{C-C} = 2\sqrt{2} A_{eff} = 2,828 A_{eff}$$

Dans le cas d'un signal vibratoire complexe, il n'existe pas de relations mathématiques liant les valeurs crête et efficace. Ces trois grandeurs, dont deux ne peuvent donc se déduire l'une de l'autre, devront donc être mesurées ou

$$A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt}$$

$$A_C = \sqrt{\max[S^2(t)]}$$

$$A_{C-C} = \max[s(t)] - \min[s(t)]$$

Calculées simultanément par l'appareil de mesure suivant les formules :

Avec :

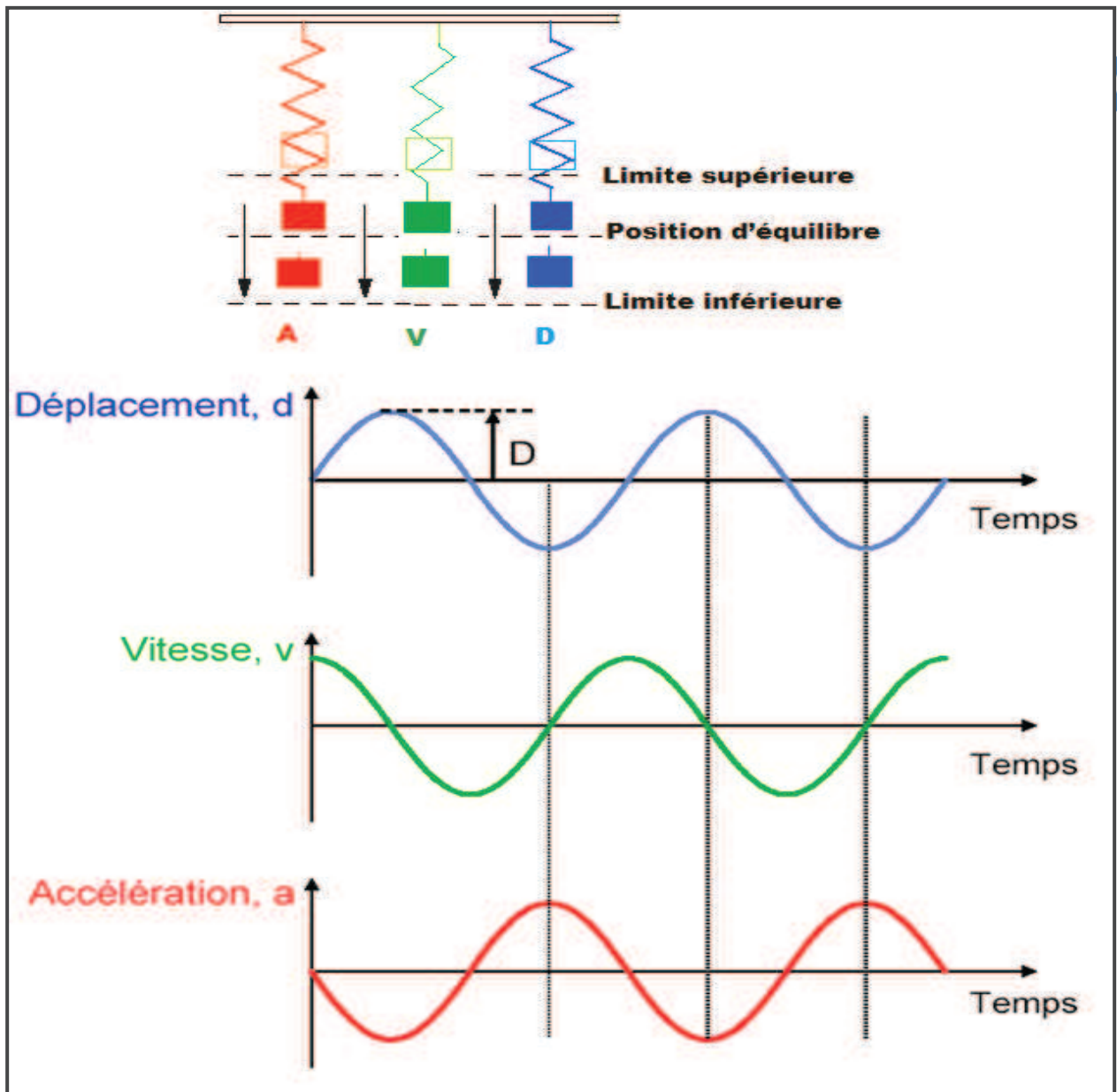
- **max [s(t)]** : amplitude instantanée la plus élevée atteinte par le signal pour la période d'observation T
- **min [s(t)]** : amplitude instantanée la plus faible atteinte par le signal pour la période d'observation T
- **s(t)** : fonction représentative du signal.

### III.2.2.5 GRANDEURS ASSOCIÉE À L'AMPLITUDE D'UNE VIBRATION

On peut déduire en général qu'une vibration est caractérisée par trois grandeurs physiques ou cinématiques fondamentales qui sont :

1. **Déplacement** : indique la position du point par rapport à un point de référence « **Distance** » Les unités courantes : **mm ; μm**
2. **Vitesse** : correspond à la variation de ce déplacement par unité de temps  
Les unités courantes : **mm /s ; μm/s**
3. **Accélération** : correspond à la variation de cette vitesse par unité de temps

Les unités courantes : mm /s<sup>2</sup> ; μm/s<sup>2</sup>



C

L'ANALYSE VIBRATOIRE

Figure N° III-03 : Représentations du mouvement d'un système masse-ressort selon les grandeurs (déplacements ; vitesse et Accélération).

III.2.2.6 RELATIONS ENTRE DÉPLACEMENT, VITESSE ET ACCÉLÉRATION

La vitesse est définie comme étant la dérivée du déplacement et l'accélération comme la dérivée de la vitesse (ou la dérivée seconde du déplacement).

Le déplacement X est représenté par :  $X(t) = A \sin(2 \pi ft)$

En dérivant cette équation, on obtient la vitesse v du mouvement vibratoire :

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

Et en dérivant à nouveau, on obtient son accélération :

$$A(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

$V(t) = 2\pi f x(t)$  et décalé de  $2\pi f$

$A(t) = -(2\pi f)^2 x(t)$  en opposition avec le déplacement avec  $(2\pi f)^2$

Ces relations montrent que la vitesse  $V$  et l'accélération  $A$  du mouvement de la masselotte sont, au même titre que son déplacement  $X$ , représentées par des fonctions sinusoidales de même **fréquence** décalées dans le temps, Cependant, si les fréquences restent identiques

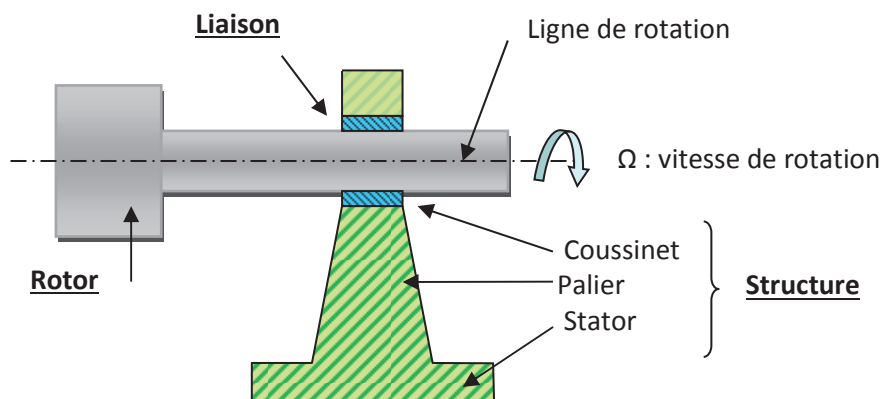
Les valeurs d'amplitudes diffèrent, Alor que :

**Un rapport de  $2\pi f$  entre déplacement et vitesse ou vitesse et accélération et entre  $(2\pi f)^2$  déplacement et accélération [ (A Boulenge, 2009)].**

### III.2. 3 LES VIBRATIONS DES MACHINES ET FACTEURS D'INFLUENCE :

Les machines sont des systèmes dans lesquelles se compose des organes et des ensembles qui se distinguer : des rotors, stators et des liaisons, le rotor est une structure rotative qui assuré le mouvement rotatif pour un ou plissures machines,

Une structure non rotative comprend les différents éléments tel que : stator, les paliers, coussinets, le massif et le radier (ou la fondation qui assure la liaison entre massif et le sol) ...etc.



**Figure N° III-04 : Représentations les organes et origines de vibration**

Les liaisons : le rotor est lié à la structure avec des liaisons qui assurent le guidage du rotor, en fin les liaisons sont classé en général en trois catégories :

- Les liaisons à fluide.
- Les liaisons à roulements, paliers.
- Les liaisons magnétiques [ (R.BIGRET, 1994)]

Les mouvements des machines est assuré en collaboration entre ces derniers organes qui se traduit à des forces de vibration engendrées.

L'amplitude d'une vibration détermine l'importance du phénomène qui l'induit et souvent, par sa valeur élevée ou la rapidité de son évolution, la gravité du défaut et l'urgence d'une intervention corrective. Cependant, **L'amplitude mesurée par un capteur est seulement une image des forces dynamiques transmises par la structure de la machine.** Cette image peut être fortement altérée par cette dernière, mais aussi par de nombreux autres Facteurs d'influence tels que :

- La position du capteur et son mode de fixation,
- La bande passante de la chaîne d'acquisition,
- Le type de machine et ses conditions de fonctionnement,
- La nature des défauts susceptibles de l'affecter.

Cependant, les grandeurs vibratoires (déplacement, vitesse ou accélération) Induites par ces forces dynamiques présentent le grand intérêt d'être facilement Mesurables ; d'où la place prépondérante qui 'occupe l'analyse vibratoire en dépit de toutes ces difficultés comme technique de surveillance et de Diagnostic de machines à des fins de maintenance. Les facteurs d'influences Sont nombreux et peuvent être regroupés en quatre familles distinctes.

**III.2.3.1 transfert vibratoire :** Les machines est le siège de forces dynamique d'origine diverses ces forces sont d'autre part susceptible d'être modifier selon l'état d'enivrement dans laquelle la machine intègre Les vibrations qui représentent la réponse a ces forces des différents organes constituant La machine et des éléments auxquelles liées.

La force d'excitation et la vibration qu'elle induit sont liées par la relation :

$$s(t) = h(t) * f(t)$$

Relation dans laquelle la fonction «  $h$  », communément appelée « réponse Impulsionnelle ou fonction de transfert », caractérise le transfert vibratoire entre le point d'application de la force dynamique d'excitation et le point de mesure.

Dans cette relation, l'opérateur «  $*$  » représente le produit de convolution.

La réponse en fréquence de la structure donnée par différentes techniques, correspond, pour chaque fréquence, au coefficient qui lie l'amplitude de la Force à celle de la vibration qu'elle induit ainsi qu'au déphasage entre ces deux grandeurs. Le module de cette fonction présente un certain nombre de maximales appelés « fréquences propres ». à chaque fréquence propre est associé un mode de déformation (flexion, torsion...) ou un mouvement particulier sans déformation de la structure (pompage, tangage, lacet...) appelé « mode propre ».

La maîtrise du transfert vibratoire joue un rôle essentiel au niveau de la surveillance vibratoire des machines et tous sa contribution sur les valeurs des grandeurs mesurées.

- Si la grandeur vibratoire mesurée représente l'accélération la fonction transfert est appelée « **ACCÉLÉRANCE** ou **INERTANCE** ».
- Si elle représente la vitesse vibratoire elle est appelée « **MOBILITÉ** ».
- Si elle représente le déplacement elle est appelée « **COMPLIANCE** ».

### III.2. 3.2 l'environnement de la machine :

Le comportement vibratoire d'une machine dépend fortement de son environnement ; qui est caractérisé par la nature de son procédé de production dans laquelle s'intègre et les structures dans auxquelles elle est physiquement reliée. Ces facteurs d'influence classent en deux catégories selon leur mode d'action :

- **L'environnement actif** : (alimentation en énergie ; procédé ; sources extérieures ; machines voisines ; équipements statiques tel que four, chaudière, réacteurs chimiques susceptible à induire des excitations vibratoires spécifique dues aux résonnances acoustiques ...) qui influe directement sur les forces internes de la machine ; souvent qui génère des forces affectent ses comportements.
- **L'environnement passif** : Les effets des masses, inerties, rigidités et amortissements des différents éléments Constituant la machine et les structures auxquelles elle est liée par des liaisons (châssis support, fondations, tuyauterie...) dont les liaisons affectent son transfert vibratoire.

Ces facteurs d'influence sont spécifiques à chaque machine, à chaque structure, à chaque procédé, cette spécificité annihilent de fait tout crédit à l'utilisation de

cratères standard même s'ils sont définis par type machine et classe de structure.

**III.2.3.3 La prise de mesures :** Le fondement de la surveillance vibratoire périodique d'une machine repose sur l'analyse des évolutions de comportement vibratoire d'une collecte à l'autre. La comparaison de valeurs d'indicateurs ou de formes d'images n'est valable que si les procédures de prise de mesure respectent **le principe de reproductibilité**. Ce principe signifie que la proposition « forces d'excitation identiques et transferts vibratoires identiques » qui entraîne un « comportement vibratoire identique » soit toujours vérifiée. Pour cela, il est indispensable que les conditions de fonctionnement de la machine, les caractéristiques du capteur et son mode de fixation soient identiques d'une collecte à l'autre ainsi que la bande passante de l'unité de conditionnement du signal délivré par le capteur. Ces conditions étant respectées, toute modification de comportement vibratoire traduira alors une modification :

- Soit des forces d'excitation dues à l'apparition de défauts,
- Soit du transfert vibratoire « mécanique » dû à des défauts de liaison (desserrage, fissuration d'ancrages), vieillissement de plots de suspension.

#### III.2.3.4 La nature de la pathologie affectant la machine :

L'énergie vibratoire et son étendue spectrale induite par un défaut dépendent fortement :

- De la nature du défaut (balourd, désalignement, desserrage, jeux de paliers ou d'accouplement, écaillages de denture ou de bague de roulement...)
- De la vitesse de rotation de la ligne d'arbres qu'il affecte.

Les facteurs susceptibles d'affecter de manière significative la mesure d'une Grandeur vibratoire ou l'interprétation de son évolution sont nombreux et Parfois difficiles à maîtriser. L'opérateur doit toujours faire preuve de rigueur Au niveau de la prise de mesure et d'esprit critique au niveau de l'interprétation des évolutions. [ (A Boulenge, 2009) ] [ (F.YACINE, 2006)].

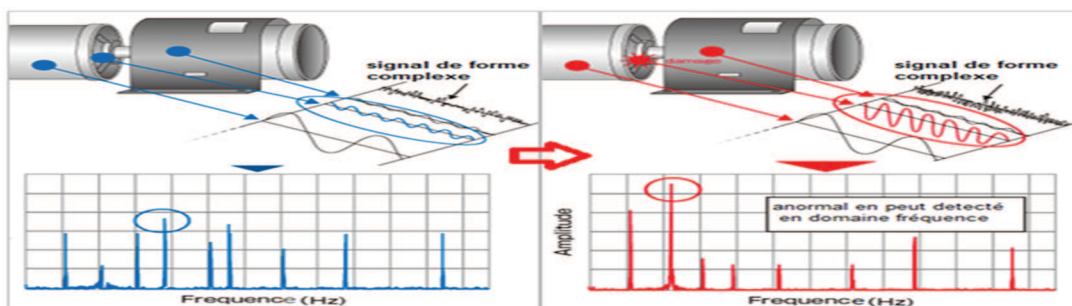


Figure No III-05 : la nature des défauts avec spectre (www.imv.co.jp)

III.3. LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE

III.3.1 types de surveillances :

On distingue deux types de surveillance selon les collectes des données ou mesures :

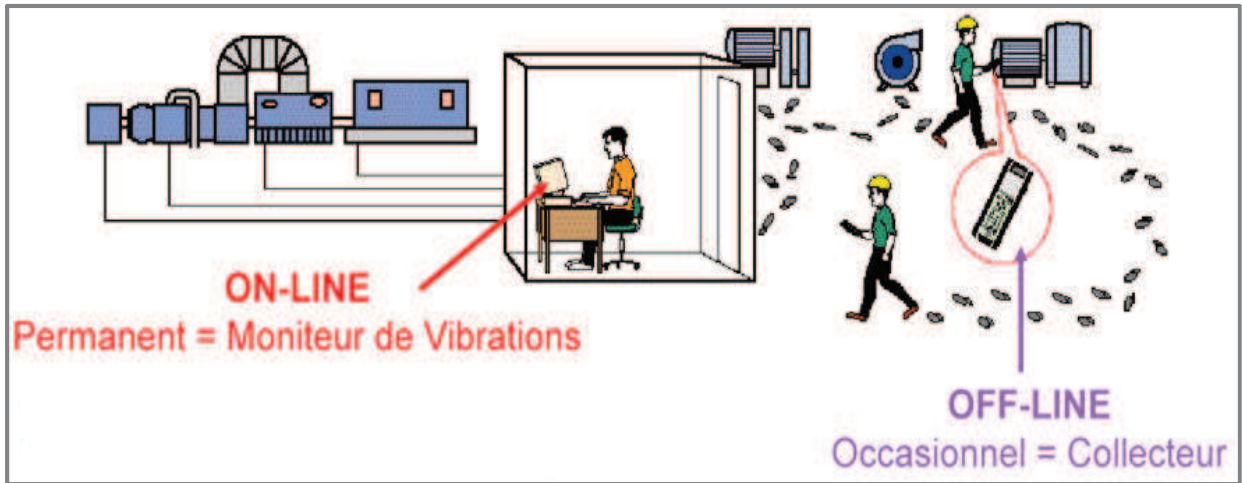


Figure N° III-06-a : les modes de Surveillance vibratoire (image formation SKF SONATRACH)

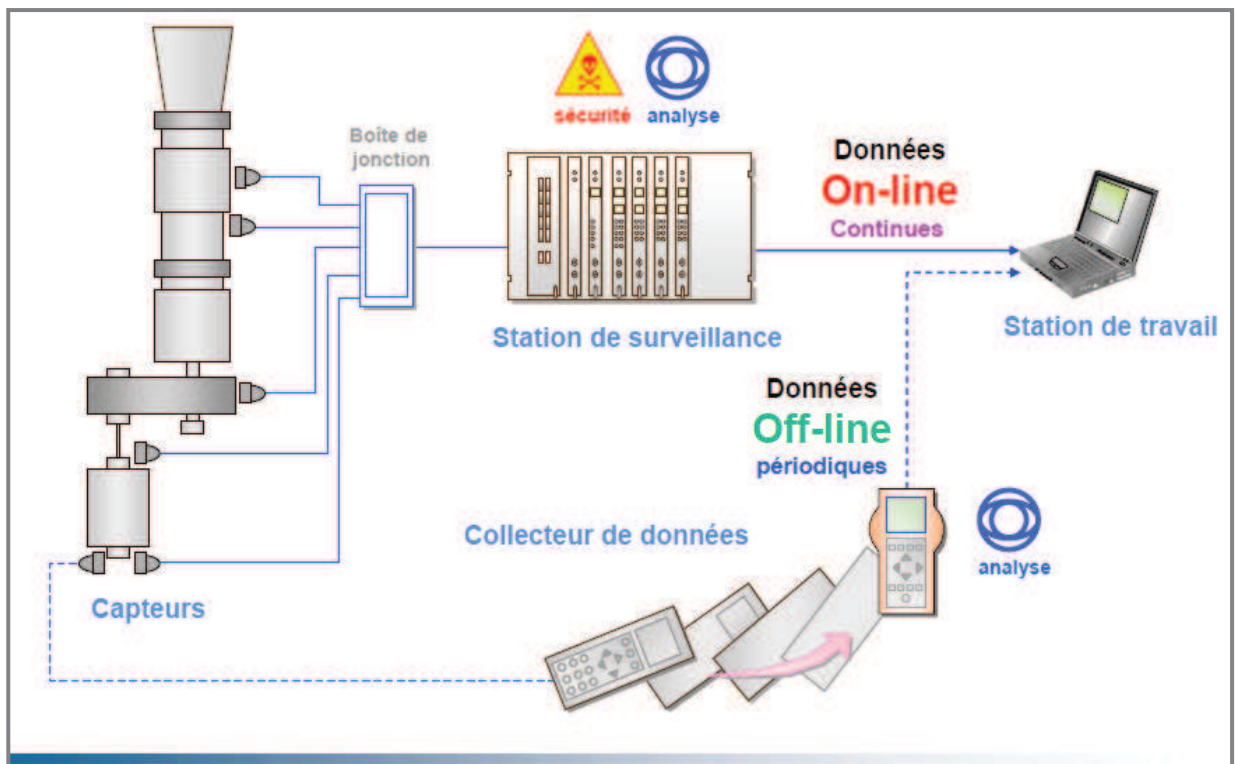


Figure N° III-06-b : les modes de Surveillance vibratoire (image formation SKF SONATRACH)

III.3.2 SURVEILLANCE ONLINE /OU PERMANENTE :

Les machines sont surveillées de manière continue par un monitor de suivi ou une sale de control ou un tableau de télémaintenance, Les capteurs sont installés à demeure sur la machine. Initialement destiné à assurer la sécurité d'un équipement par son arrêt immédiat en cas de dépassement du seuil de danger par

C  
L'ANALYSE VIBRATOIRE

la valeur d'un indicateur, avec le progrès technologique l'utilisation des systèmes d'acquisition multivoies et la micro-informatique est plus souvent.

• **Avantages de la surveillance permanente :**

- Un suivi permanent des valeurs des indicateurs choisis,
- Une détection possible des défauts à évolution rapide,
- Une association possible et facile avec d'autres paramètres procédés :  
Température, vitesse, charge, intensité absorbée, pression...,
- Un arrêt automatique de l'installation, envisageable sur alarme,

• **Inconvénients de la surveillance permanente :**

- Le coût de sa maintenance est élevé.
- Le coût de formation du personnels spécialisées.
- Le risque d'effet de masque.

### III.3.3 SURVEILLANCE OFFLINE OU PÉRIODIQUE :

Les machines sont surveillées de manière périodique et en suivre l'évolution dans le temps a des intervalles réguliers à l'aide D'un appareil portable le plus souvent informatisé appelé « collecteur de données », Ce Jorn de surveillance est réservé pour les systèmes industrielle qui n'influe pas sur la sécurité des personnes Ou l'environnement.

• **Avantages et inconvénients de la surveillance périodique :**

- Le faible coût de l'investissement de base au regard du nombre de machines qui peut être surveillées avec un seul appareil et un ou deux capteurs.

• **Les principaux inconvénients sont :**

- Resèq de d'avoir un défaut entre les collectes des données.
- Un historique d'évolution d'indicateurs bien moins riche

[ (A.boulenger, 2003)].

### III.4. MISE EN PLACE DE LA SURVEILLANCE PAR ANALYSE VIBRATOIRE :

Il existe des techniques de surveillance fiables et économiquement intéressantes, pour mettre en place une stratégie de surveillance la mieux appropriée, fiable et faisable aussi avec des indicateurs prédéterminer adapter avec elle qui nous a permet de planifier les interventions, les travaux en phase opérationnel de la surveillance.

La démarche d'implanté une stratégie de surveillance comporte deux parties :

- Mettre en place la stratégie

- Démarrer la surveillance

### III.4.1 Premier Partie : Mettre en place la stratégie de surveillance

#### III.4.1.1 Sélection des machines sensibles :

Calcifications des machines par criticité en parc machine et ressortir les quelques machines, réellement « stratégiques » par l'analyse de méthode de :

- DIAGRAMME DE PARETO.
- DIAGRAMME ABC.

#### III.4.1.2 Étude du contexte d'utilisation des machines à surveiller :

« **Surveiller = noter** » On ne peut surveiller que ce que l'on connaît bien, Alor pour chaque machine en doit noter :

- La cadence du travail du machine (volume horaire 24/24 ou 12/24 ou 16/24...).
- Ses particularités (l'état de marche).
- Les organes et les points les plus faible et leur mode défaillance (**AMDEC**).
- L'historique machine (détail des incidents ou des pannes).

#### III.3.1.3 Vérification de la faisabilité technique de la surveillance :

Bien aux machines sélectionnées et dans des conditions satisfaisantes Pour cela, on vérifie que peuvent être respectées les conditions suivantes :

- Vérifier L'aptitude d'accessibilité aux points de mesure.
- Vérifier la vitesse de rotation et de la charge durant la prise de la mesure.
- Choix de la durée de prise de mesure (selon fréquence de rotation et fréquence De manifestation des défauts).
- Établir une reproductibilité des conditions de mesure (définir plusieurs classes de fonctionnement avec des seuils d'alarme propres à chacune d'elles et d'archiver car les conditions de fonctionnement quasi-identiques).
- L'adéquation surveillance/chaîne de mesure (les fréquences auxquelles peuvent se manifester les défauts redoutés, se situent dans la bande passante de la chaîne de mesure (Du capteur à l'analyseur).

#### III.4.1.4 Évaluation du bousin avant du choix de la stratégie :

La surveillance d'une machine par suivi d'évolution d'indicateurs (surveillance par indicateurs scalaires énergétiques et dépassement de seuils, surveillance par dépassement de gabarits spectraux, surveillance par indicateurs typologiques)

présentant un niveau de fiabilité et de précocité de détection mais aussi de difficulté de mise en œuvre très différents d'un mode à l'autre, pour l'apparition éventuelle d'un défaut insensible aux indicateurs définis.

Un autre mode de surveillance est envisageable, la surveillance par diagnostics périodiques Beaucoup mieux adaptée à la détection exhaustive et précoce des défauts de toute nature.

La surveillance par suivi d'indicateurs et la surveillance par diagnostics périodiques sont deux stratégies très différentes, La première est bien adaptée au concept de la maintenance conditionnelle, la seconde à celui de son prolongement qu'est la maintenance prévisionnelle. Avant d'arrêter son choix sur L'une ou l'autre, il convient d'évaluer pour chaque équipement ce que peut apporter chacune de ces deux approches.

#### III.4.1.5 Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par indicateurs

Pour les machines sous surveillance par suivi d'indicateurs le choix des indicateurs selon les critères suivants :

- Le type d'organes surveillés
- Le type de défauts redoutés
- Le niveau de fiabilité recherché
- La complexité cinématique de la machine
- Le coût du matériel de surveillance

#### III.4.1.6 Critères de Choix des indicateurs pour la Surveillance par diagnostics périodiques

L'étude approfondie de la cinématique de l'installation et l'établissement de sa fiche cinématique complète : cette étude permet de :

- **Connaître** les composantes cinématiques de base sur lesquelles de traitements spécifiques sera effectué.
- **Déterminer** les plages d'analyses et les résolutions nécessaires
- L'identification des anomalies
- La détermination des déphasages relatifs
- L'identification de l'origine cinématique des chocs et des phénomènes de modulation

- L'analyse de la sévérité des anomalies avec la démarche suivante :
  1. Suivie de collecte des données (mesures, spectres...).
  2. De localiser, voire d'identifier le défaut
  3. Estimer la gravité des défauts
  4. De prendre une décision

Elle est réalisée en fonction des niveaux vibratoires, l'évolution des mesures (l'image vibratoire) et les seuils préétablis pour le suivie des systèmes

#### III.4.1.7 Finalisation du choix de stratégie

Ce choix final dépendra :

- Les conceptions général (sécurité des personnes et des biens,).
- Du rapport coût de la surveillance/coût réel de la panne redoutée.
- De la fiabilité recherchée.
- Établir le plan général de suivi et auscultation des systèmes.

#### III.4.1.8 La stratégie mixte

Suivant des bousions critique de certaines machines il est bien souvent pour les mêmes machines, on emploie une stratégie mixte de surveillance, c'est-à-dire qu'on emploie alternativement les deux stratégies de surveillance : la surveillance par indicateurs énergétiques simples et le diagnostic, selon l'un des deux modèles suivants :

*Modèle 01 :*

1. En premier lieu, on utilise un mode de surveillance par suivi d'indicateurs calculés dans des bandes fréquentielles plus ou moins étendues avec une périodicité donnée jusqu'à ce que les valeurs de ces indicateurs atteignent des seuils prédéfinis.
2. Puis, pour trouver l'origine et la gravité du défaut redouté un diagnostic est effectué Et de nouveaux indicateurs sont éventuellement définis en fonction des anomalies identifiées afin de fiabiliser la surveillance jusqu'à ce qu'une action corrective Soit décidée.

*Modèle 02 :*

1. Un diagnostic préalable de la machine avant sa mise sous surveillance est effectué Si l'existence de défauts naissants est révélée, on définit des

indicateurs de surveillance particuliers, sensibles aux manifestations dynamiques des défauts qui viennent d'être révélés

### III.4.2 Deuxième partie : Démarrer la surveillance

#### III.4.2.1 Préparation et prise des mesures

- Préparation de plan de surveillance.
- Installation des données sur les caractéristiques de chaque machine.
- Installation des données caractéristiques des organes et éléments de chaque machine.
- Définir les Précautions à prendre lors de la prise des mesures.
- Installer tout le système en place (capteurs ; soft...).

#### III.4.2.2 Établissement de la signature initiale :

La première série de mesures effectuées sur la machine, Elle servira de référence pour les comparaisons ultérieures et, à ce titre, elle devra être la plus complète et la plus précise possible, Cette signature sera refaite dans des conditions opératoires identiques après chaque opération corrective.

#### III.4.2.3 Détermination des seuils d'intervention :

La détermination des seuils d'intervention est certainement l'une des opérations les plus délicates et les plus importantes puisque, tant que la valeur d'un (ou des) indicateur(s) choisis pour la surveillance n'excède pas une valeur prédéfinie, l'installation est considérée en bon état et aucune procédure d'investigation complémentaire ou d'intervention corrective n'est engagé, Il existe au moins deux seuils pour l'intervention [figure15 page 26] :

- Les seuils d'alarme.
- Les seuils de danger ou de panne.

#### III.4.2.4 Traitement et analyse des Rapport de mesure et historique des pannes

La réussite de la politique de surveillance est d'avoir continu toutes les opérations préliminaires telle l'inspection, control et études pour avoir le maximum de bénéfice de notre démarche de surveillance qui est représenté dans :

- Études et traitement de tout le document de surveillance (historique de pannes machine, fiche cinématique...etc.)
- Bienfait de rumeur d'expériences pour les experts



L'analyse est effectuée selon des courbes d'évolution d'un indicateur ce dernier permet de détecter de façon très visuelle l'apparition des défauts auxquels ils sont sensibles. L'évolution dans le temps d'un indicateur est souvent représentée par une courbe constituée d'une suite de points indiquant la valeur de l'indicateur à chaque date de mesure.

### III.5 DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE SURVEILLANCE DES SYSTÈMES PAR ANALYSE VIBRATOIRE :

Dans ce concept de maintenance, la surveillance des systèmes électromécaniques doit non seulement remplir sa fonction initiale « de sécurité » mais surtout permettre la détection précoce de défauts et d'en suivre l'évolution dans le temps. La détection des défauts à un stade précoce offre la possibilité de planifier et de préparer les interventions nécessaires.

#### III.5.1 LA SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS VIBRATOIRES

##### III.5.1.1 Les indicateurs :

Toute machine en fonctionnement induit des vibrations celle-ci sont les représentations directes des forces dynamiques engendrée par les pièces en mouvement et occupent une Place privilégiée parmi les grandeurs à prendre en considération pour assurer La surveillance des machines, ces grandeurs est appelée « **indicateurs** ».

La surveillance par indicateurs vibratoire joue un rôle très important dans le diagnostic de l'état machines des installations aussi des systèmes électromécaniques à des fins de maintenance.

Un indicateur de surveillance est un grandeur vibratoire dérivant des trois grandeurs cinématiques de base caractérisant un mouvement vibratoire (accélération, vitesse, déplacement) qui est sensible à l'apparition ou à l'évolution d'un ou plusieurs défauts.

Les trois grandes familles d'indicateurs :

1. Les indicateurs scalaires
2. Les indicateurs spectraux
3. Les indicateurs typologiques (spécifique)

##### III.5.1.2 Seuil d'un indicateur :

Chaque indicateur est doté d'un « seuil » qui dépend :

- De l'indicateur considéré et de la nature des défauts qui lui sont associés (déséquilibre, desserrage, désalignement, écaillage de roulements, ...).
- Du type de machine ou système surveillée et de ses conditions de fonctionnement (vitesse de rotation, charge).

Le concept de seuil associé à un indicateur est un des points clés de la surveillance de la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle, tant que la valeur n'excède pas une valeur prédéfinie ou seuil, l'installation est considérée en bon état ; aucune investigation ou arrêt pour intervention corrective n'est envisager Le choix du seuil est fondamental.

- ❖ Une valeur trop basse entraîne des alarmes non justifiées.
- ❖ Une valeur trop élevée entraîne une détection précoce.

En doit définir au moins deux seuils :

**A. Seuil d'alarme** : déclenche une procédure de « diagnostic » pour localiser l'origine de l'anomalie.

**B. Seuil de danger** : nécessite un diagnostic immédiat de l'état de l'installation pour statuer sur l'urgence arrêt d'une action corrective.  
[ (MERZOUG, 2005)].

### III.5.2 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SCALAIRES ÉNERGÉTIQUES (ANALYSE TEMPORELLE) :

#### III.5.2.1 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « Larges bandes ».

Ce type de surveillance par des indicateurs larges bandes ou dite :

« NIVEAU GLOBAL » « MESURES GLOBALES » Qui caractérises les mouvements vibratoires global induit par Le fonctionnement normal où Anormal de la machine est caractérisé ici par un ou plusieurs indicateurs dont l'évolution sera suivie de manière périodique ou continue. Ce type de suivi permet ainsi de connaître l'état vibratoire de la machine et d'en surveiller l'évolution, sans pouvoir bien souvent déterminer avec précision la cause de la vibration (désalignement, balourd ...), Ces indicateurs représentent le plus souvent l'amplitude efficace (et parfois L'amplitude crête, les mesures est effectuer dans une plage très étendue, souvent dans la bande passante de l'appareil de mesure ou dans une bande fréquentielle normalisée.

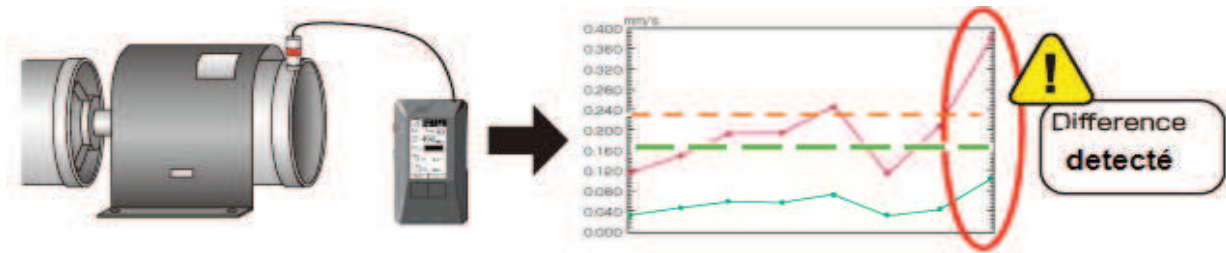


Figure N° III-07 : courbe de tendance qui montre suivi par indicateurs (www.imv.co.jp)

Avantages de surveillance par type d'indicateurs :

- Son faible coût de mise en œuvre, qui ne nécessite ni investissement coûteux En matériel, ni formation importante, ni niveau de qualification élevé.

Inconvénients :

- Danger de l'effet masquée
- Suivre l'évolution sans pouvoir détectée l'origines des défauts.

**Note** : si  $d_i$  représente l'amplitude efficace des manifestations vibratoires induites par un défaut donné  $i$  affectant une machine, l'amplitude efficace totale NGD induite par l'ensemble des défauts affectant cette dernière est alors égale à :

$$NGD = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_i^2 \dots d_n^2}$$

Alors que l'amplitude efficace globale NGD induite par l'ensemble des défauts affectant une machine est très proche de celle correspondant au défaut qui induit l'énergie vibratoire la plus élevée, dans l'exemple suivant qui décrit un peu plus loin met en évidence ce danger de l'effet de masque dans le suivi en mode global « large bande » : La valeur de l'indicateur du niveau global en mode vitesse NGV d'un des paliers d'une moto-soufflante (figure 25) est de 5,22 mm/s. Ce niveau global est en réalité composé de la façon suivante :

$$NGD = \sqrt{5^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 1,5^2} = 5,22$$

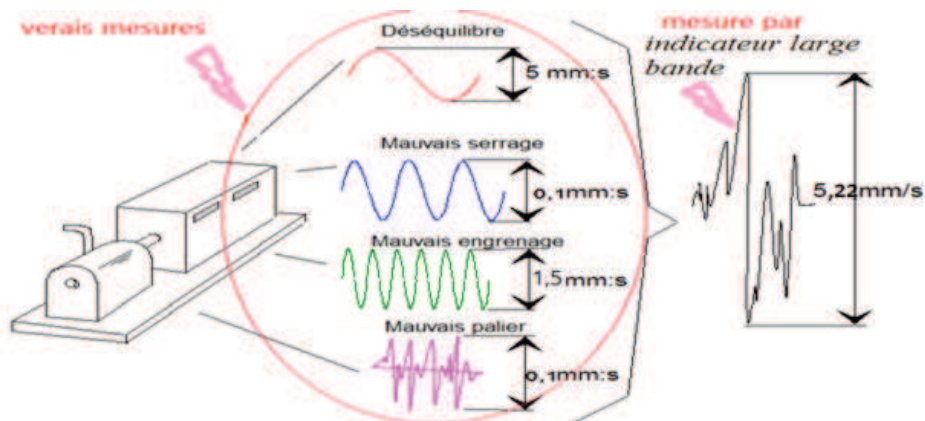


Figure N° III-08 : Effet de masque lié à la mesure d'un indicateur scalaire large bande

### III.5.2.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « bandes étroites ».

Pour minimiser les dangers qui présentent les effets masques des indicateurs large bande le Suivie des systèmes avec des indicateurs bandes étroites offrent la possibilité de mesurer ou de calculer ces indicateurs scalaires dans plusieurs bandes de fréquences définies par l'utilisateur, d'en suivre l'évolution et d'associer à chacun d'eux des seuils.

Ces possibilités permettent à l'utilisateur :

- De définir des indicateurs et des seuils dont les sensibilités sont beaucoup mieux adaptées à la nature de chaque défaut qu'il souhaite surveiller,
- De réduire, voire d'éliminer, les effets masque induits par le fonctionnement « normal » de l'installation à surveiller.

### III.5.3 SURVEILLANCE PAR SUIVI D'INDICATEURS SPECTRAUX ET TYPOLOGIQUE

#### Indicateurs spectraux

Cette technique de dépistage consiste à comparer le spectre vibratoire issu de chaque mesure avec le spectre de référence de la machine surveillée, obtenu dans des conditions identiques, à un moment où l'état de l'installation a pu être considéré comme satisfaisant. Bien souvent, ce spectre de référence ou signature est remplacé par un gabarit ou un masque de référence fixant les limites acceptables Tout changement significatif du nouveau spectre se traduit par un débordement du gabarit.

La performance de la surveillance par suivi d'évolution spectrale et dépassement de gabarit qui permet d'éliminer les effets de masque dans la mesure où la résolution d'analyse choisie est en adéquation avec la cinématique de la machine surveillée et les manifestations dynamiques des défauts recherchés.

L'évolution technologique permet de calculer un spectre et son gabarit avec un nombre de lignes spectrales très élevé et augmente sa sensibilité.

Pour cela et empiriquement, on pourra souvent choisir comme découpage, pour la plupart Des machines stratégiques :

- **Un spectre BF basses fréquences** : dont l'étendue sera limitée aux dix premiers ordres de la fréquence de rotation et dont le nombre de lignes sera suffisamment élevé pour séparer les ordres de la fréquence de rotation des ordres de la fréquence du courant d'alimentation dans le cas d'un moteur asynchrone ou à

courant continu, ou pour séparer les premiers harmoniques des fréquences de rotation des différentes lignes d'arbres constituant l'installation.

- **Un spectre HF hautes fréquences** : dont l'étendue correspondra à la bande passante de la chaîne d'acquisition. Il est destiné à suivre les évolutions énergétiques des réponses à des excitations périodiques ou aléatoires des modes hautes fréquences de paliers, roulement, dentures.
- **Zooms** : des zooms centrés autour des principales composantes cinématiques de la machine (fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence de passage de pales, d'encoches...) destinés à suivre les évolutions des distributions d'amplitudes des bandes latérales de modulation associées.
- **spectre PBC pourcentage de bande constant** : Certains produits offrent la possibilité de regrouper les spectres BF, MF et HF de résolutions différentes en un spectre unique représenté avec une échelle fréquentielle logarithmique par concaténation ou par transformation de plusieurs spectres à résolutions constantes en un spectre dont la résolution est alors inversement proportionnelle à la fréquence le suivi de la forme spectrale des indicateurs par comparaison avec un gabarit est plus fin et plus fiable que les deux techniques précédemment étudiées, sous réserve d'une constance des conditions de fonctionnement de la machine, notamment en ce qui concerne sa vitesse de rotation, celle-ci conditionnant la superposition des fréquences.

#### III.5.4 Les outils de surveillance

Les outils de surveillance ou les méthodes temporelles sont basés sur l'analyse Statistique du signal recueilli.

##### II.5.4.1 La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire large bande très utilisé, bien qu'il présente des inconvénients, Le premier inconvénient, il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts. Le deuxième inconvénient, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. La forme discrétisée de la valeur efficace est donnée par :

$$V_{efficace} = V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}$$

Où  $S(t)$  est le signal temporel mesuré,  $N_e$  représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de fréquences d'analyse liées à la structure des machines surveillées.

#### II.4.4.2 Les indicateurs crêtes

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête est le mieux adapté pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles telles que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré [ (Pachaud, 1998)].

Il est possible de distinguer principalement : Le facteur de crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace :

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\text{Valeur crête}}{\text{Valeur efficace}} = \frac{\text{Sup}|S(t)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}}$$

Le facteur  $K$  est défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace

$$\text{Facteur } K = \text{Valeur crête} \cdot \text{Valeur efficace} = \text{Sup}|S(t)| \cdot \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [S(t)]^2}$$

Le facteur  $K$  est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle (analyse « spot ») des roulements. Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements.

Contrairement au facteur de crête, le facteur  $K$  est un indicateur instable.

#### II.4.4.3 Le Kurtosis

Le Kurtosis vient du mot grec « **Κυρτοσις** » ou Kyrtois qui signifie « bosse » qui veut dire aplatissement en français et "convexity" ou "peakiness", "spikiness" qui est la réduction des pics en anglais [ (R.BIGRET, 1994)], ce paramètre a été introduit pour la première fois par le mathématicien Britannique Pearson en 1905 pour comparer une distribution quelconque à la distribution Gaussienne.

Comme le Kurtosis d'une distribution Gaussienne est égale à 3, cette valeur est devenue référence pour évaluer le degré d'aplatissement d'une distribution par

rapport à celle normale. Pearson a distingué trois distributions : Mesokurtic, Leptokurtic, et Platycurtic, respectivement pour un Kurtosis égale, supérieur ou inférieur à trois (3). Certains mathématiciens utilisent le Kurtosis Excess qui est égal au Kurtosis moins trois (-3), et de ce fait le Kurtosis excess d'une distribution Gaussienne est égale à zéro.

Mathématiquement est donné par [ (Pachaud, 1998) ] :

$$Kurtosis = \frac{M_4(S(t))}{M_2^2(S(t))} = \frac{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^4}{\left[ \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} (S(t) - \bar{S})^2 \right]^2}$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,  $\bar{S}$  est la valeur moyenne des amplitudes.

### III.6. LE SUIVI PAR DIAGNOSTIC

Diagnostic est un mot du grec « **diagnosis** : connaissance » est l'action d'identifier une maladie (défaut une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine) [ (A.boulenger, 2003)]. Le diagnostic doit permettre d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible d'en préciser la gravité de cette dernière, Alor La philosophie du diagnostic est donc fondamentalement différente de celle de la surveillance traditionnelle reposant sur le simple suivi d'évolution de l'énergie vibratoire à partir d'un nombre restreint d'indicateurs.

#### III.6.1 BUT DU DIAGNOSTIC

- Identifier les sources d'anomalies
- Compère l'état des composants
- Optimiser les coûts d'arêtes techniques
- Fiabiliser les outils de la production
- Contribuer à l'amélioration du capital investi dans l'outil de production

#### III.6.2 OUTILS DE DIAGNOSTIC :

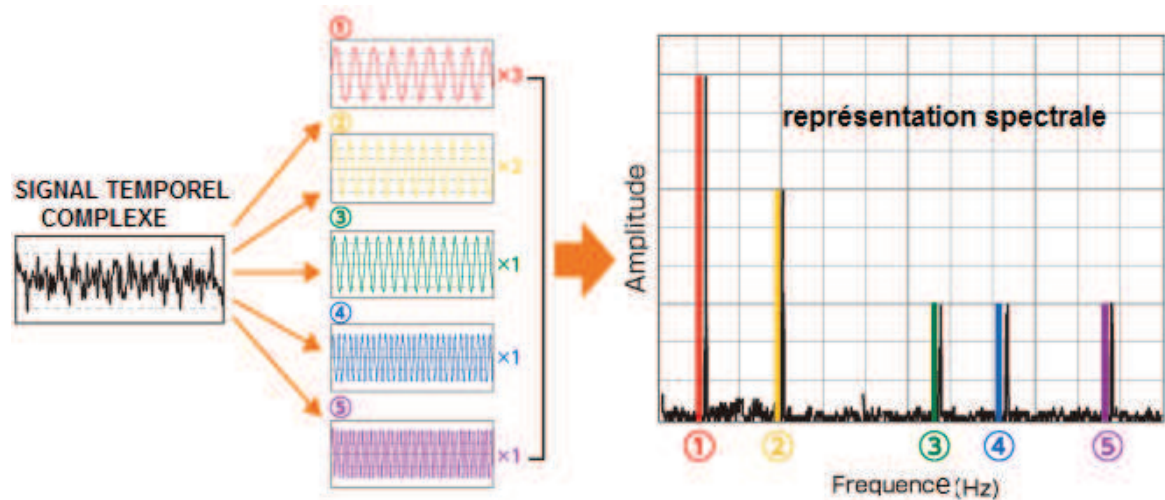
##### III.6.2.1 L'ANALYSE SPECTRALE (descripteurs du domaine fréquentiel)

Le signal vibratoire est le pouvoir de représenter une vibration en fonction du temps dans une forme exploitable, on a cherché à le représenter dans un diagramme amplitude-fréquence appelé « **spectre** » Elle permet d'identifier avec précision les fréquences des composantes discrètes constituant le signal, d'en quantifier les amplitudes [ (A Boulenge, 2009)].

L'analyse spectrale est avant tout la base de tout diagnostic, La qualité d'une analyse spectrale dépend de sa capacité à révéler toutes les fréquences des composantes constituant le signal, composantes qui permettent d'identifier les défauts recherchés.

Pour Une bonne analyse nécessite :

- De choisir une résolution  $\Delta f$  et une bande d'analyse B en adéquation avec la Cinématique de la machine et les images spectrales des manifestations vibratoires Induites par le défaut recherché,
- De ne pas intégrer le signal délivré par le capteur avant d'en calculer le spectre. Cela n'exclut pas la possibilité a posteriori de quantifier l'amplitude de certaines Composantes ou familles de composantes en vitesse ou en déplacement,



*Figure.N° III-09 : exemple calculé spectral d'un signal temporel (www.imv.co.jp)*

- D'afficher les amplitudes spectrales en décibels ou avec une échelle logarithmique Et non avec une échelle linéaire.

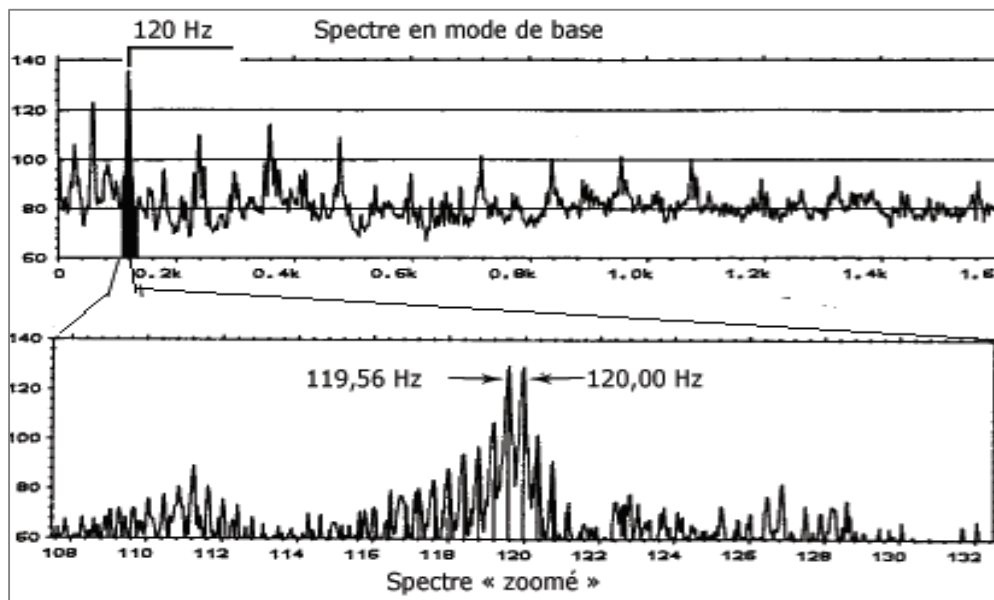
Enfin aucune bande de fréquences ne peut contenir la fréquence des principales composantes Alor l'opérateur devra faire appel à la technique du zoom FFT.

### III.6.2.2 L'ANALYSE DU SPECTRE ZOOM :

L'observation du spectre en fréquences relevé sur le palier défectueux offre une autre possibilité d'analyse. Dans ce cas il faut rechercher les fréquences caractéristiques des défauts. Elles sont calculées en fonction de la vitesse de rotation et des caractéristiques du roulement. Les fréquences résultantes se situent au voisinage des fréquences de rotation, et sont donc chargées de vibrations parasites. Ainsi, ces raies ne deviennent visibles que lorsque le défaut

est déjà très avancé. La situation sera plus favorable si en utilisant les zones de résonances de la structure, plus riches en énergie. On obtient un meilleur rapport signal /bruit lorsque l'on s'éloigne des fréquences de rotation.

Une autre méthode intéressante, lorsque l'on ne connaît pas les fréquences caractéristiques de défauts, consiste à surveiller l'évolution du *fond de spectre* dans les domaines de hautes fréquences (on appelle *fond de spectre* silhouette générale formée par les raies non discrètes) La fonction zoom FFT permet de centrer la plage d'analyse B autour de n'importe quelle fréquence  $f_0$  en translatant le spectre de telle sorte que cette dernière devienne la fréquence zéro. De ce fait, elle permet d'obtenir la résolution  $\Delta f$  souhaitée pour un nombre de lignes spectrales beaucoup plus faible en jouant sur l'étendue de la bande d'analyse B



**Figure N° III-10 :** Le spectre "zoomé" l'existence d'un bien de deux composantes vibratoires d'amplitude élevée : l'une à deux fois la vitesse de rotation du moteur (119,56 Hz) ; l'autre à deux fois la fréquence du courant d'alimentation mentionné plus haut (120 Hz).

#### Ne pas confondre :

- *Le zoom graphique*, ou « loupe » qui divise à la fois la bande d'analyse et le nombre de lignes, améliorant ainsi la lisibilité graphique sans modifier la résolution et qui s'avère une fonctionnalité très utile pour examiner un spectre calculé avec un nombre de lignes Très élevé.

- Le zoom FFT, ou « vrai zoom » qui permet d'augmenter la résolution d'analyse grâce à une concentration des lignes spectrales dans une bande de fréquences restreinte autour d'une fréquence centrale

### III.6.2.3 L'ANALYSE CEPSTRALE :

Cette fonction (transformée inverse du logarithme du spectre) permet, dans un Spectre de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toute famille de Composantes périodiques.

Le cepstre est un opérateur mathématique qui associe à un spectre permet d'identifier et quantifier immédiatement toutes les structures périodique (peigne de raies ou famille de bande latérale) contenues dans ce spectre.

**Propriété :**  $\log(x \cdot y \cdot z \dots) = \log x + \log y + \log z + \dots$

Une vibration être considérée comme le produit d'une force d'excitation  $e(t)$  par la réponse impulsionnelle de la structure  $h(t)$  au point de fixation du capteur.

$$S(t) = e(t) * h(t)$$

$$F[s(t)] = E(f) * H(f)$$

$$\log[F(s(t))] = \log E(f) + \log H(f)$$

$$F^{-1}[\log F(s(t))] = F^{-1}[\log E(f)] + F^{-1}[\log H(f)]$$

$$\text{Donc } \|C[s(t)]\| \quad \|C[s(t)] = C[e(t)] + C[h(t)]$$

Le cepstre d'un signal vibratoire donc être considéré comme la somme de 2 fonctions :

-le cepstre de la réponse impulsionnelle de la structure sur laquelle est fixée le capteur

- une fonction représentant le cepstre des forces d'excitation

#### Intérêt

Cette technique permet le diagnostic de modulations de nombreux défauts surtout sur des engrenages (desserrages, jeux de palier ou de clavette, écaillage de roulement ou de denture...) même à basse vitesse, le cepstre est un outil puissant de diagnostic, Le cepstre peut être aussi efficacement utilisé comme indicateur de surveillance :

- En tant qu'indicateur scalaire très sensible à l'apparition de peigne de raies constituant les manifestations vibratoires des défauts précités alors que, à

cause des effets de masque, l'impact vibratoire énergétique de ce type de défaut peut être souvent très faible donc non détectable par les indicateurs larges bandes couramment utilisés.

- En tant que complément spectral associé à un gabarit.

C

L'ANALYSE VIBRATOIRE

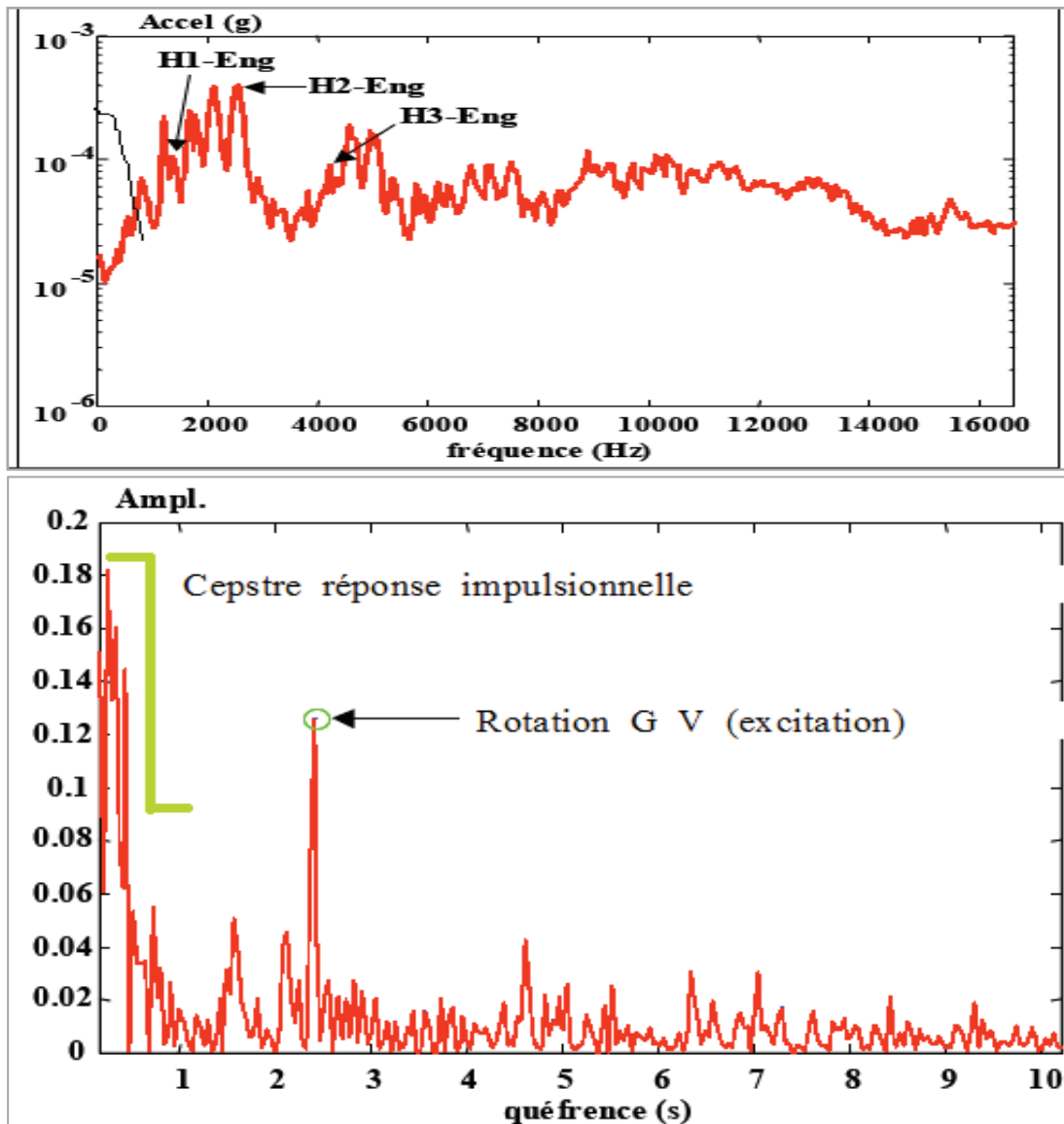


Figure N° III-11 : Le spectre d'un signal associé avec son cepstre de structure

#### III.6.2.4 MODULATIONS (Analyse des fonctions de modulations) :

Le suivi d'un signal temporel ou fréquentiel délivré par un capteur sur machine est rarement constitué uniquement de composantes d'amplitudes et de fréquences purement des grandeurs cinématiques. En effet, ces fréquences sont le plus souvent modulées en amplitude ou en fréquence de manière périodique ou aléatoire. L'information la plus intéressante n'est donc pas toujours donnée par l'amplitude

ou la fréquence d'une composante cinématique, mais par l'analyse de ses fonctions de modulation. Les phénomènes vibratoires de modulation peuvent être regroupés en deux catégories :

1. Les phénomènes de type chocs dont l'information est portée par la réponse d'un mode propre de structure à une excitation impulsionnelle. Les fréquences porteuses sont, dans ce cas, indépendantes de la cinématique de la machine et de sa vitesse de rotation. Elles dépendent uniquement des fréquences des modes propres des différents éléments constitutifs (roulements, paliers, engrenages...) et de son environnement proche (châssis, charpente, fondations)
2. Les phénomènes de type sinusoïdal dont l'action induit des variations de L'amplitude ou de la fréquence d'une composante liée à la cinématique de la Machine (fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence D'encoches ...) et de ce fait, aux différentes forces dynamiques de même Nature dont elle est le siège.

#### III.6.2.5 L'ANALYSE D'ENVELOPPE :

Les forces impulsionnelles induisant par les différents phénomènes de type choc des éléments de la machine avec son environnement proche qui excitent des modes propres des différents éléments constituant la machine Ces modes répondent sous forme de trains d'oscillations libres et amorties dont les fréquences correspondent aux fréquences propres de ces modes et dont l'espacement correspond à la période de répétition des chocs.

Les fréquences propres de ces modes sont bien sûr indépendantes de la cinématique de la machine. Les informations intéressantes à extraire ne sont pas dans le signal proprement dit mais dans son enveloppe.

Les techniques de démodulation « globale » aussi l'analyse des fréquences de démodulation HFRT (High Frequency Résonance Technic) permet d'identifier les fréquences de répétitions des phénomènes impulsionnels excitateurs.

Les fréquences de résonances peuvent être considérées comme des fréquences porteuses dont les amplitudes sont modulées par les défauts. L'enveloppe du signal peut donc représenter les défauts, mieux que son spectre

Sa mise en œuvre se décompose en quatre étapes distinctes :

1. Identification des zones hautes fréquences de concentration de l'énergie

Vibratoire « **bosses spectrales** ».

2. Filtrage passe-bande du signal autour de chaque « **bosse** ».
3. Extraction de l'enveloppe du signal filtré.
4. Calcul du spectre d'enveloppe.

### III.6.3 LES ANALYSES COMPLÉMENTAIRES SPÉCIFIQUES

Ces analyses, généralement complémentaires des techniques habituelles précédemment exposées ; suivants les types des machines (machines électriques, ou à vitesse variable ...etc.) lorsque si nécessaire pour mieux affiner le diagnostic

Parmes ces analyse sont :

#### III.6.3.1 L'ANALYSE DES SIGNATURES DE L'INTENSITÉ DU COURANT(MCSA)

Toute variation du flux du courant d'alimentation d'un moteur se traduit par un courant induit inverse, proportionnel à la variation et de même fréquence. Cette variation peut être due à une fluctuation de couple ainsi qu'à tout mouvement intempestif ou à une mise en vibration du circuit magnétique à L'intérieur du solénoïde constitué par le stator. [ (A Boulenge, 2009)].

La méthode AIC ou (SCA) représente un moyen très sensible, sélectif et rentable pour la surveillance à distance d'une grande variété de machines industrielle lourdes Difficiles d'accès (pompes immergées, milieu stérile ou microbien, nucléaire, cryogénie, hautes températures), l'analyse des signaux des courants statoriques peut être capable de détecter, de différencier, et suivre l'état d'avancement des anomalies tels que les défauts des dents d'engrenage, les roulements.

Cette propriété est aussi utilisée pour assurer la surveillance des machines qui cherche à détecter l'apparition de chocs induits par des rattrapages de jeux angulaires ou des fluctuations de couple sans devoir arrêter les machines de qui sont de nature lourd, en effet, l'analyse des signaux des courants statoriques peu :

- fournit la capacité de surveillance non intrusive sur un site distant à l'équipement de mesure.
- offre une grande sensibilité à une variété d'anomalies électromécaniques affectant les installations opérationnelles.
- peut être réalisée rapidement par un personnel relativement peu qualifié en utilisant des équipements peu coûteux.



- Est également applicable à des machines (AC et DC) de grande puissance.

[ (A, 2015).]

L'analyse de la signature des courants statoriques peut être donc réalisée à l'aide de plusieurs techniques telles que la représentation dans le repère DQ, l'analyse spectrale et la décomposition en ondelette.

*Analyse spectrale des courants :* Les signaux de courant moteur peuvent être obtenus à partir des sorties des capteurs de courant qui sont placées d'une manière non intrusive sur l'un des fils d'alimentation. Ces signaux sont ensuite analysés afin de présenter les indicateurs de défauts à détecter, Les techniques de traitement du signal à mettre en œuvre dépendent dans leurs modalités de la grandeur physique analysée (intensité du courant, vitesse de rotation) et du type de moteur (CC ou AC). Elles reposent essentiellement sur l'analyse du spectre et Sur la démodulation de composantes. [Torsional\_Vibration\_Effects\_on\_Induction]

Dans le cas d'un moteur à courant continu, le traitement du signal consiste en une analyse spectrale basses fréquences dont l'étendue et la résolution se définissent à partir du fichier cinématique de la machine et en une démodulation de l'amplitude et de la fréquence de la composante de GRAËTZ.

Dans le cas d'un moteur alternatif, le traitement consiste en un filtrage passe bande du signal autour de la composante principale du courant et en une démodulation de l'amplitude et de la fréquence de cette dernière. [ (A Boulenge, 2009)]

### III.6.3.2 L'ANALYSE DES DÉPHASAGES

Les différentes méthodes et transformation du fourrier ne donne aucune information sur les déphasages entre composantes. Cela signifie que des phénomènes se produisant à la même fréquence mais en des temps différents seront confondus dans le spectre, par exemple, sera identique pour la dégradation d'un pignon de réducteur, que celui-ci ait une ou plusieurs dents cassées (à moins qu'il y ait une symétrie de défauts), On appelle « déphasage » l'écart temporel entre deux signaux sinusoïdaux de même fréquence, écart que l'on exprime le plus souvent en degré ou en fraction de tour

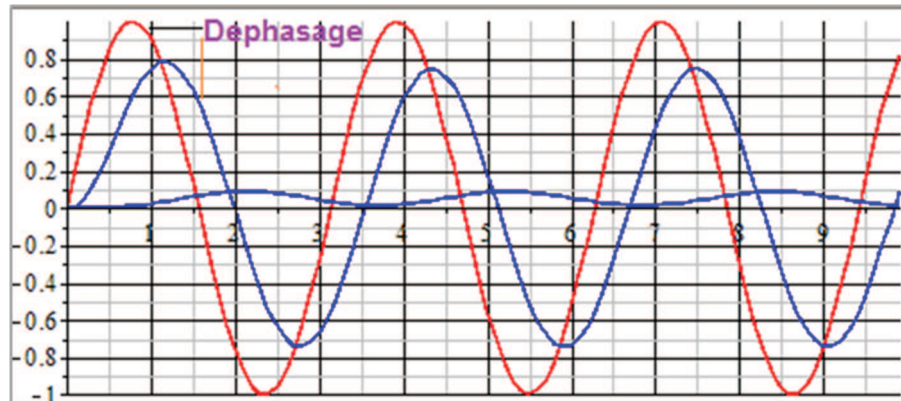


Figure N° III-12 : Exemple d'un déphasage

Ce déphasage, qui renseigne donc sur le décalage de deux phénomènes ou sur le décalage entre la manifestation de ce phénomène et sa réponse au point de mesure, se détermine généralement analogiquement

Avec un phasemètre ou se calcule numériquement généralement à partir de l'inter spectre entre deux signaux, l'inter spectre se définissant comme le produit de la transformée de Fourier du premier signal par le conjugué de

La transformée de Fourier du second.

#### a. ANALYSE DES ORBITES CINÉTIQUES

Une vibration est une grandeur vectorielle au même titre que la force dynamique qui la génère. Il est donc important de connaître le mouvement vibratoire d'un point dans l'espace, au moins dans un plan radial par rapport à l'axe de rotation, c'est-à-dire de pouvoir observer l'orbite du mouvement de l'arbre.

Le tracé d'une orbite se fait pratiquement à l'aide des capteurs sans contact (des sondes sur le principe des courants de Foucault) et consiste à créer une courbe de Lissajous à partir de deux signaux issus de deux capteurs fixés sur un palier selon deux directions radiales orthogonales, L'orbite cinétique contient toutes les informations concernant les vibrations relatives d'arbre ou de façon détailler

La forme de l'orbite, qui donne alors des informations très précises sur la nature du défaut dépend du déphasage des signaux délivrés par les deux capteurs

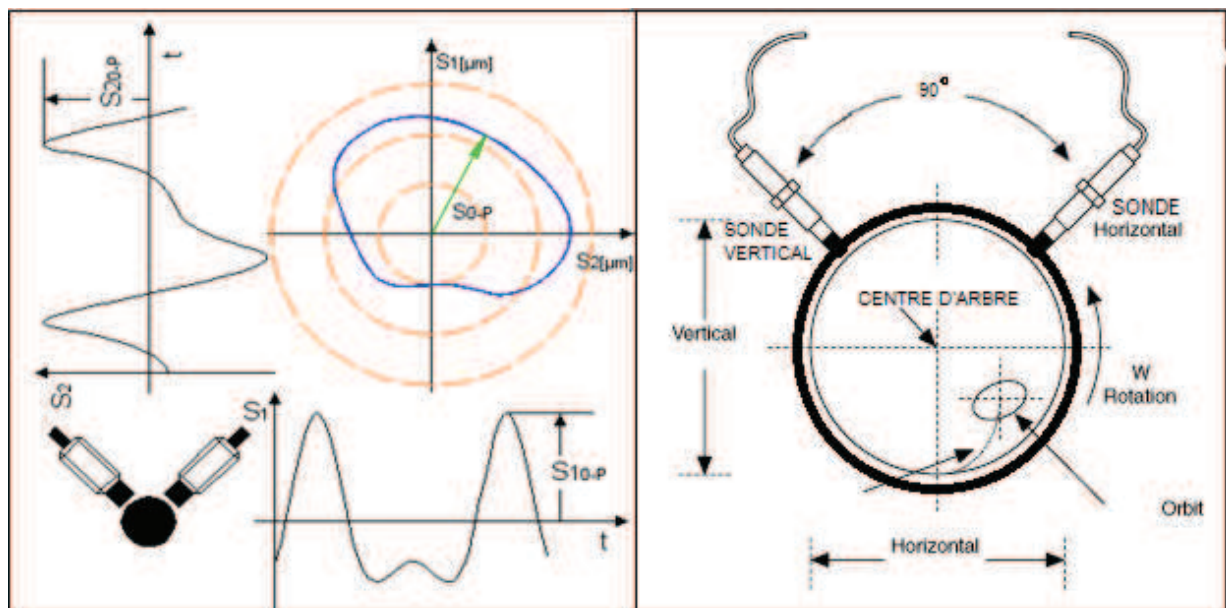
Pour un signal sinusoïdal les réponses sur les questions suivant :

- Le tracé de l'orbite à l'ordre 1 de la fréquence de rotation est-il circulaire  
Ou elliptique, faiblement excentré ou elliptique quasi rectiligne ?
- Axialement, les quatre points cardinaux d'un palier vibrent-ils en phase ou  
En opposition de phase deux à deux ?

- Pour une direction de mesure donnée, deux paliers consécutifs se déplacent-ils en phase ou en opposition ?

Permettent d'affiner un diagnostic de balourd (balourd statique, balourd dynamique...), de défaut de lignage, de déformation de ligne d'arbres, de charge directionnelle...etc. [ (A Boulenge, 2009)].

Dans le cas où le signal n'est pas sinusoïdal mais présente un taux de distorsion harmonique élevé, les formes des orbites peuvent devenir beaucoup plus complexes présentant des boucles ou des points de rebroussement.



**Figure N° III-13 :** mesures des orbites cinétiques d'un mouvement d'arbre (SONATRACH-FORMA).

### **b. Analyse modale des structures (ODS)**

L'ODS ou l'analyse la déforme opérationnelles de la structure C'est une technique de visualisation de mouvement vibratoire d'un système sous les conditions de fonctionnement, ce dernier peut être décomposé en un grand nombre de systèmes masses ressorts à un degré de liberté en parallèle, caractérisé chacun par sa fréquence d'oscillations libres, et qu'il existe un décalage entre l'application d'une force dynamique et la réponse de chaque système, lorsque la fréquence d'excitation est au-dessus à la fréquence propre C'est cette propriété qui est souvent utilisée pour statuer sur

[ (mouhamed, 2012)]

L'existence réelle d'un mode et pour analyser le comportement vibratoire de l'ensemble d'une machine et de sa structure support.

En peut effectuer cette opération en marche ou à l'arrêt selon des maillages prédéfinis de la structure.

**En marche**, les forces d'excitation sont internes à la machine. On mesure à l'aide d'un capteur tri axial le mouvement relatif de chaque nœud du maillage par rapport à un point fixe de référence. Un logiciel d'analyse de déformées calcule automatiquement les transferts vibratoires de chaque nœud par rapport au point de référence et permet de tracer pour chaque fréquence excitatrice, la déformée opérationnelle de la machine et des structures qui lui sont liées (châssis support, tuyauterie...).

**À l'arrêt**, chaque nœud du maillage est excité à l'aide d'un marteau de chocs (Marteau instrumenté d'un capteur de force) et le point de référence est Équipé d'un capteur dans les trois plans. Un logiciel calcule pour chaque point du maillage le transfert force/vibration et extrait automatiquement les différentes fréquences de résonance à partir d'un test automatique de cohérence et de rotation de phase, permettant de tracer la déformée modale associée à chaque fréquence propre identifiée.

L'analyse de ces deux déformées (en marche et à l'arrêt) apporte des éléments essentiels pour la formulation d'un diagnostic. [ (A Boulenge, 2009)].

### III.6.3.3 LES TECHNIQUES D'ANALYSE POUR DES CAS DES MACHINES À RÉGIME VARIABLE

Toutes les machines ne fonctionnent pas à vitesse ou charge constantes (ce qui rend très difficile l'interprétation des évolutions d'éventuels indicateurs de surveillance périodique). Il est cependant bien souvent nécessaire de connaître avec précision les zones de fonctionnement critiques de ces machines, soit pour exclure ces zones des plages d'exploitation, soit pour en tenir compte au niveau des seuils de surveillance. Deux cas de figures sont à considérer :

#### **a. La vitesse de rotation est constante mais la charge varie :**

Le tracé des diagrammes « **indicateur/charge** » à vitesse de rotation constante peut être réalisé très simplement en faisant varier par palier un à un certain paramètre représentatif de la charge et en notant manuellement les valeurs.

La vitesse de rotation étant quasi constante, le calcul de la transformée de Fourier avec une résolution fréquentielle suffisante ne pose aucun problème particulier,

Certains systèmes d'acquisition disposent de fonctionnalités permettant le tracé automatique de tels diagrammes. Un signal électrique lié à une grandeur représentative de la charge déclenche automatiquement une acquisition et le traitement adapté à chaque variation positive ou négative.

### **C. La vitesse de rotation varie :**

Plusieurs techniques peuvent être utilisées et sont disponibles avec certains produits :

- **Le moyennage spectral instantané ou « Peak Hold »** Procédé de calcul d'un spectre à partir de spectres instantanés, calculés à partir de blocs temporels acquis les uns à la suite des autres avec un taux de recouvrement le plus élevé possible ( $\square 75\%$ ). L'amplitude de chaque ligne spectrale du spectre résultant correspond à l'amplitude la plus élevée de la ligne de même rang des spectres instantanés.

- **Le spectrogramme** : il existe deux types :

1. **Le spectrogramme par TFRCT ou STFT** (transformation de Fourier rapide à court terme).

2. **Le spectrogramme TFR ou FFT** (par échantillonnage angulaire et transformée de Fourier rapide).

L'intérêt des méthodes d'analyse de variation de vitesse basées sur le spectrogramme est de permettre l'extraction d'ordres, c'est-à-dire le tracé de l'évolution de l'amplitude de chaque ordre de la fréquence de rotation en fonction de cette dernière (figures 4.32 b et c). Ces tracés permettent de connaître non seulement les fréquences de différents modes excités mais aussi de savoir quels sont les ordres des composantes qui les excitent alors que le moyennage spectral instantané « Peak Hold » ne donne aucune information sur l'origine de l'excitation et sur l'amplitude de la réponse du mode à cette dernière.

#### III.6.3.4 L'ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE

Dans le traitement du signal, l'analyse temps-fréquence comprend des techniques qui étudient simultanément un signal dans les domaines temporels et fréquentiels en utilisant les différentes représentations temps-fréquence.

En pratique l'intérêt de l'étude temps-fréquence est que l'analyse par la transformée de Fourier classique suppose que les signaux sont infinis dans le

temps, tandis que la majorité des signaux en pratique sont de courte durée et changent considérablement au cours de cette durée.

Cette technique dérivée de l'analyse synchrone permet de visualiser en trois 3D dimensions des phénomènes cycliques à fréquence variable, à travers une de plusieurs Transformations connues tels que la transformée de Fourier à court terme (TFCT), La Transformée en ondelettes et la transformée de Wigner Ville (TWV).

### III.7 LA CHAÎNE DE MESURE

Une chaîne de mesure de vibrations doit comprendre les étapes suivantes :

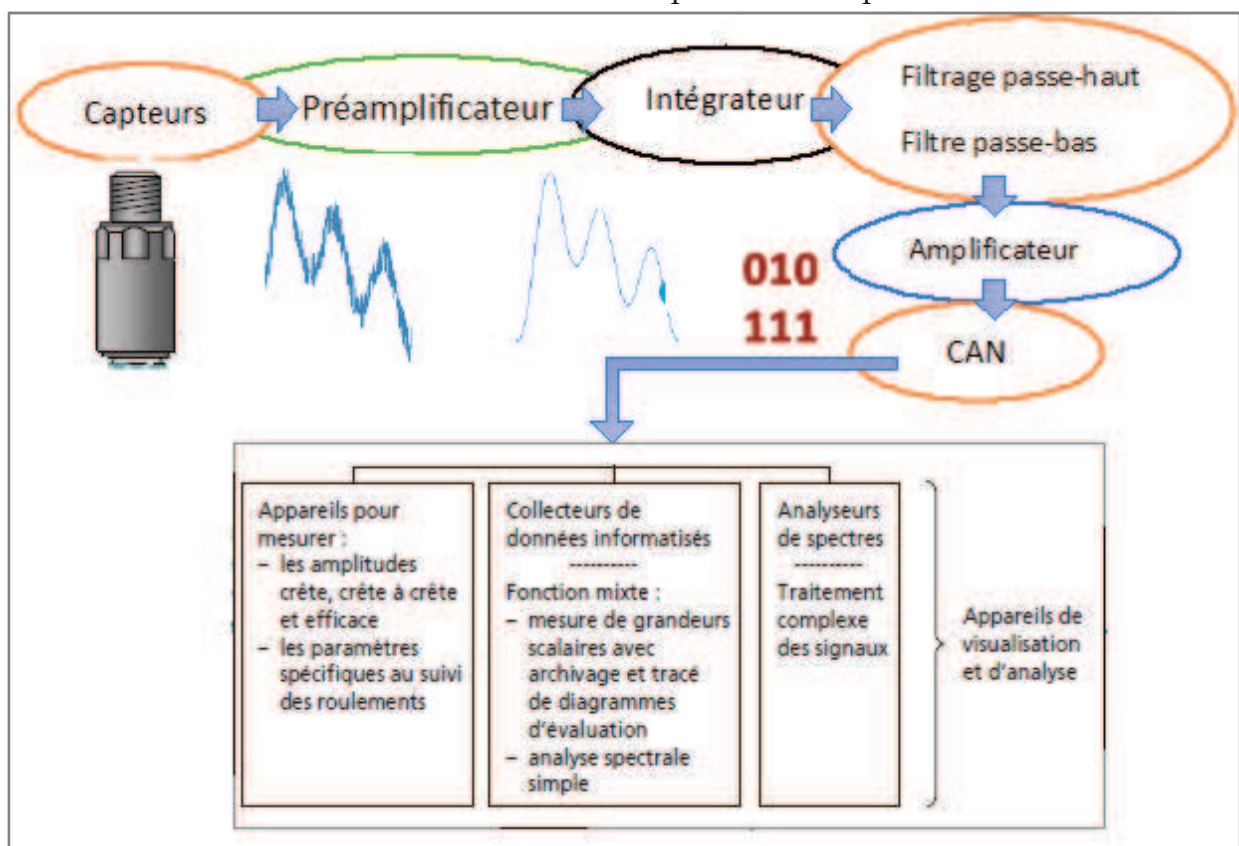


Figure N° III-14 : la chaîne de mesures d'un capteur

**1. Spécifier la grandeur vibratoire qu'en veut mesurer :**

Déplacements vitesse ou accélérations etc....

**2. Transformer la vibration mécanique en un signal électrique :**

(C'est le rôle du capteur)

**3. Conditionner le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable :** (C'est le rôle du préamplificateur.)

**4. Intégrer le signal.** Transformer si nécessaire le signal délivré par un accéléromètre en un signal représentant la vitesse ou le déplacement).

**5. Limiter la plage de fréquences du signal :**

C'est le rôle des filtres passe-haut, passe-bas, ou passe-bande, à fréquences de coupure fixes ou réglables par l'utilisateur.

**6. Amplifier de nouveau le signal obtenu :**

Cette amplification permet d'adapter la gamme dynamique d'entrée du convertisseur pour avoir la meilleure qualité de signal sans le tronquer.

**7. Numériser le signal :**

C'est le rôle du convertisseur analogique/numérique (CAN) qui transforme le signal en données numériques

**III.7.1 Les capteurs de vibration :**

Le capteur, quelle que soit la nature du signal qu'il délivre (accélération, vitesse, déplacement...) constitue le premier maillon de la chaîne de mesure. Sa fonction est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique, Les capteurs utilisant ces principes peuvent être *actifs* ou *passifs*. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire.

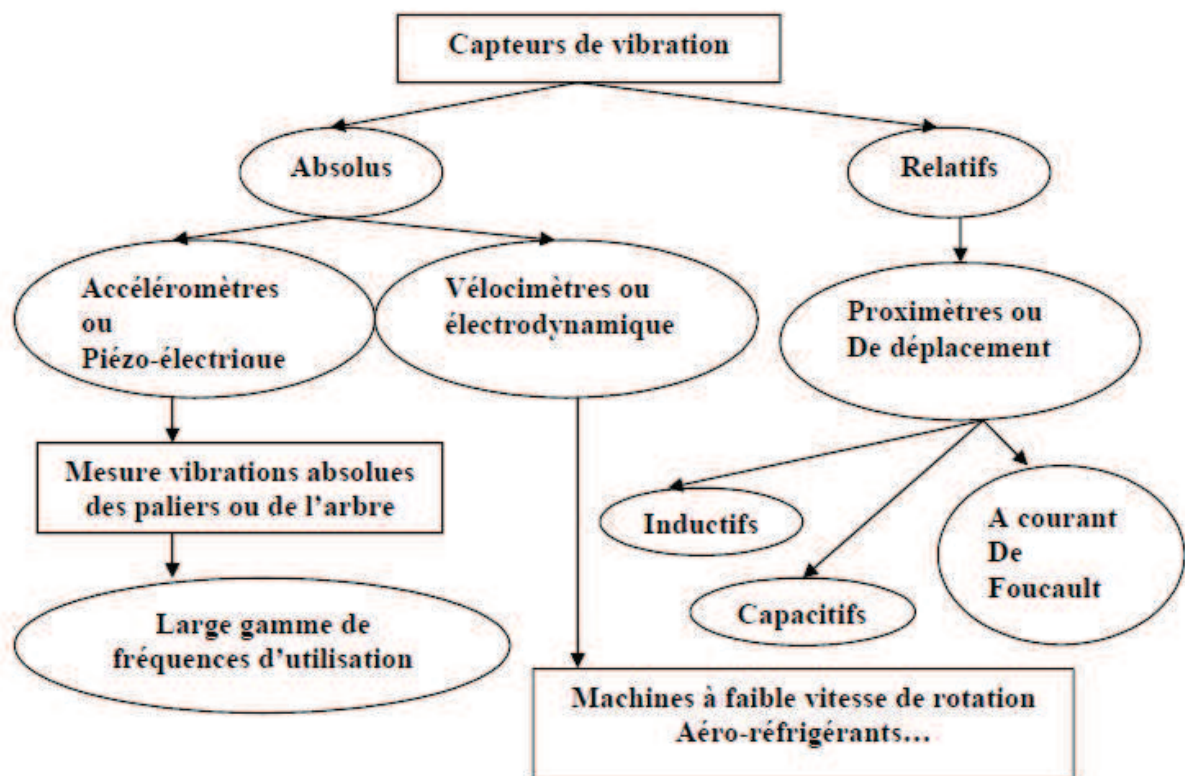


Figure N° III-15 : l'organigramme de capteurs de vibration

Un capteur se caractérise principalement par :

**La bande passante :** est la plage de fréquences de laquelle le capteur permet de à mesurer Avec une précision exemple [3-8 000 Hz].

**La dynamique :** C'est le rapport entre la plus petite et la plus grande valeur d'amplitude mesurable du capteur sans distorsion du signal ni bruit de fond.

**La sensibilité :** C'est la relation qui lie la grandeur sortie électrique délivrée par le capteur et grandeur d'entre ou le mode physique Exemple 10 pico-coulombs par g ou 10 millivolts par  $\mu\text{m}$ ).

**Sa tenue en température :** la température peut sensiblement modifier la sensibilité du capteur et même dans le cas d'un capteur piézoélectrique

En doit désigner la plage de températures qui 'influencer sur les capteurs.

**Ses grandeurs d'influence :** designer les grandeurs d'influence sur les mesures du capteur.

#### III.7.1.1 capteur de déplacements (sonde de proximité)

Aujourd'hui, le prosimètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault, Ces capteurs sont utilisés principalement sur les paliers lisses des turbomachines. Ils permettent de mesurer le déplacement relatif de l'arbre par rapport au palier.

Un oscillateur envoie un signal d'amplitude constante à très haute fréquence au capteur. Le signal, appelé signal porteur, produit un champ magnétique en passant au travers de la petite bobine située à l'extrémité du capteur, L'arbre situé à proximité absorbe une partie de l'énergie du champ magnétique qui, à son tour, produit une réduction proportionnelle de l'amplitude du signal porteur.

Plus l'arbre se rapproche du capteur, plus l'amplitude du signal s'en trouve affectée. La modulation du signal porteur traduit donc l'importance du déplacement relatif de l'arbre par rapport au palier. Le signal est ensuite

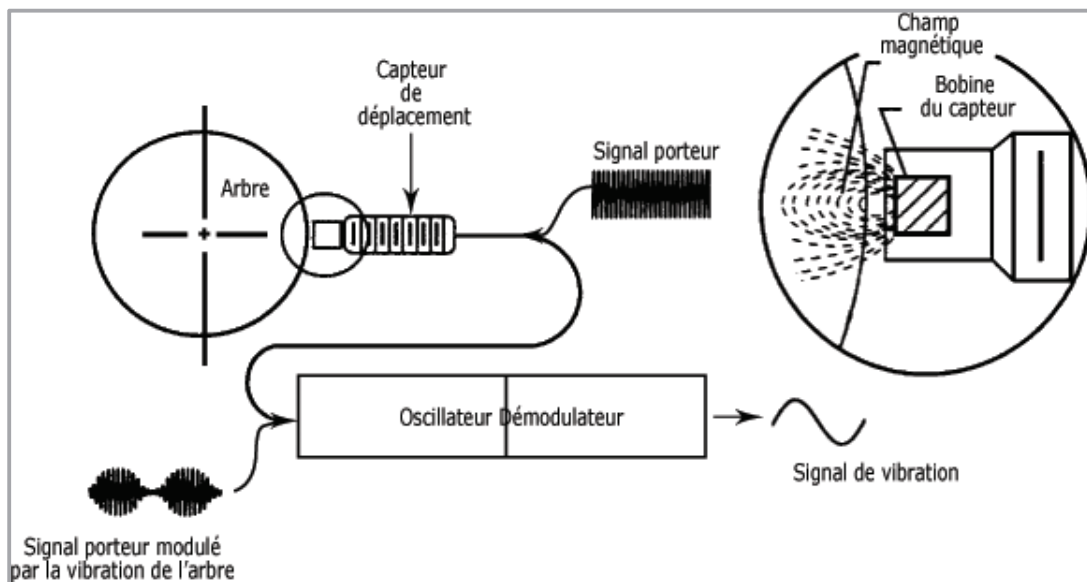
Démodulé et la vibration est mesurée.

#### **Avantages**

- La mesure directe du mouvement de l'arbre ;
- Mesure sans contact avec palier ;
- La mesure faite directement en unités de déplacement ;
- Le fonctionnement jusqu'à des fréquences extrêmement faibles.

*Inconvénients*

- Mauvaise qualité du signal occasionnée par la présence d'irrégularités à la surface des arbres ;
- L'installation minutieuse requise ;
- La très faible gamme dynamique du capteur (la gamme dynamique est le rapport de l'amplitude la plus élevée à l'amplitude la plus faible qui puisse être mesurée) qui est de l'ordre de 100/1 ;



**Figure N° III-16 :** Principe de fonctionnement d'un capteur de proximité (AIDE-VIBRA).

## III.7.1.2 Les 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 ; Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine.

**Avantages :** Facile à installer, Avec une très bonne sensibilité, Son alimentation de l'extérieur

**Inconvénients :** relativement lourd et encombrant, la bande passante est limitée en (10-1000 HZ) s'influe pas les pièces mobiles et sensible aux champs magnétiques

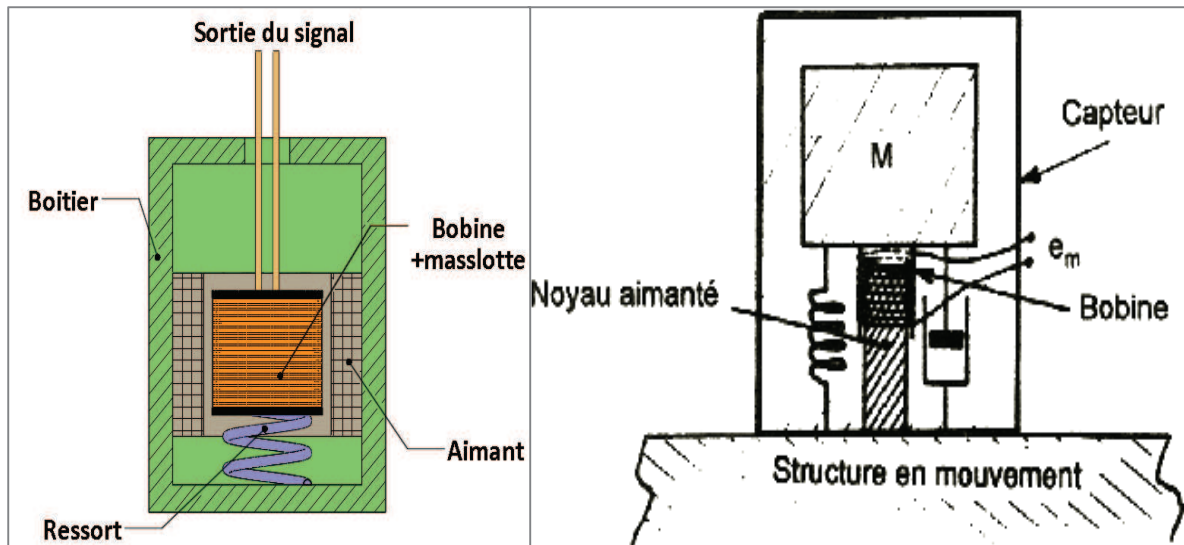


Figure N° III-17 : Principe de fonctionnement d'un capteur vélocimètre (Doc- Bruel et Kjaer)

### III.7.1.3 Les accéléromètres

Les accéléromètres **piézoélectriques** tendent à devenir les capteurs de vibrations Absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines, Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. Schématiquement (figure ), un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique 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 piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. Selon la direction de travail de l'élément piézoélectrique à l'intérieur du capteur, il existe un capteur à compression ou de capteur à cisaillement, plus sensible aux forces multidirectionnelles susceptibles de l'actionner.

#### **Critères de choix d'un accéléromètre :**

Les particularités de l'installation surveiller, concernant l'environnement des machines comme un fort champ électromagnétique, une température excessive, une zone à risque d'explosion (qui nécessite des capteurs antidéflagrants), le choix d'un accéléromètre sera déterminé :

- Par sa bande passante qui doit être en adéquation avec la cinématique de l'installation surveillée entre  $3f_r$  < **bande passant** <  $200f_r$ .
- Par sa sensibilité qui devra être en adéquation avec la typologie vibratoire



Susceptible d'être induite par chaque machine

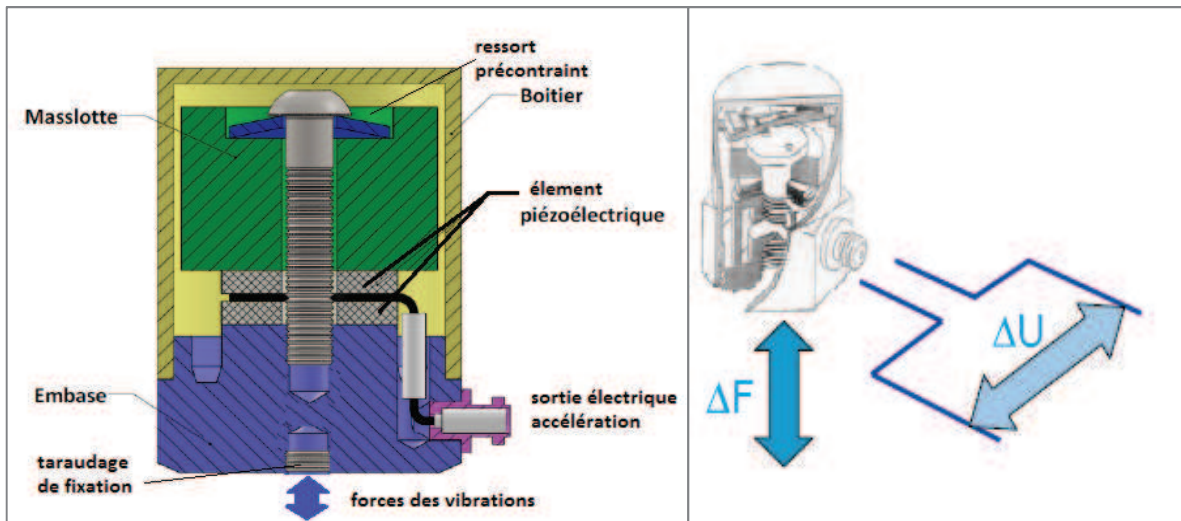


Figure N° III-18 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre (Documentation Bruel et Kjaer)



**Effet piézoélectrique :**

$$\left. \begin{aligned} Q &= k \cdot p \\ P &= F/S \\ F &= M \cdot a \end{aligned} \right\} \rightarrow Q = K \cdot a$$

Avec :

- $Q$  : charge électrique générée par l'effet piézo-électrique [PC]
- $P$  : pression exercée sur la céramique [N/m<sup>2</sup>]
- $F$  : Force exercée sur la céramique [N]
- $S$  : Surface de contact entre la masse sismique et la céramique [m<sup>2</sup>]
- $M$  : Masse sismique [kg]
- $a$  : Accélération du capteur [m/s<sup>2</sup>]
- $k$  : Constante [PC/N/m<sup>2</sup>]
- $K$  : Facteur de transmission [PC/m/s<sup>2</sup>]

**Avantages des accéléromètres :**

- L'étendue de la bande passante,
- Une gamme dynamique très étendue
- L'obtention de la vitesse vibratoire et du déplacement par intégration
- Une excellente précision sous des différents conditions environnementales,
- Une excellente fiabilité dans le temps puisqu'aucun élément n'est mobile,
- Un grand rapport sensibilité/masse.

**Inconvénients :**

- Haut impédance
- Principalement la forte dépendance de sa bande passante avec la rigidité de Sa liaison avec la surface vibrante,
- Nécessite des préamplificateurs, ou adaptateurs d'impédance.

III.7.1.4 l'emplacement des capteurs et mode de fixation

Il serait souhaitable de réaliser les mesures de vibrations selon les trois directions possibles deux directions radiales (RH et RV) et une autres sur l'axial (Ax).

Et en chois la fixation des capteurs sur les paliers pour un installation de plusieurs paliers voire (*Figure.Nº*)

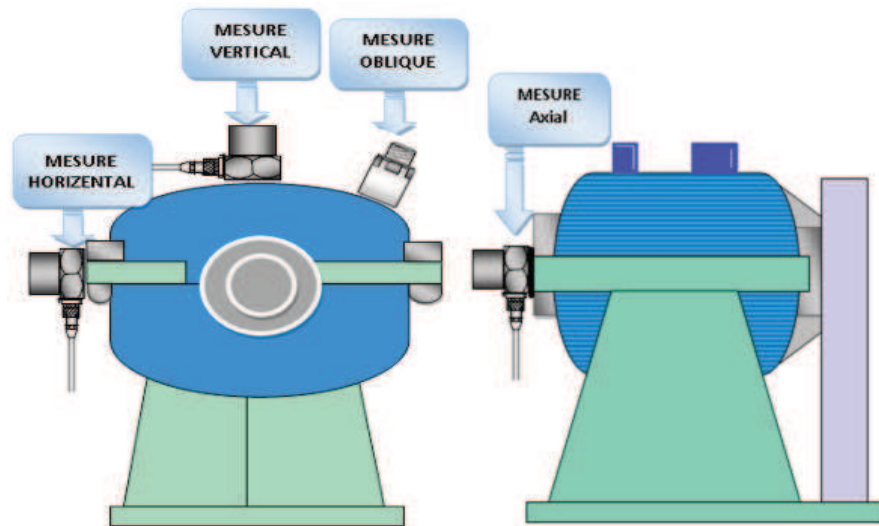


Figure.Nº III-19 : l'emplacement des capteurs

**Les mode fixation** : des capteurs sur les paliers ou sur la surface de mesure est l'un des facteurs le plus critique pour l'obtention de résultats exacts à partir de Mesures des vibrations pratiques, il y a plusieurs types de fixation tel que fixation a goujon, a Collage direct, fixation a aimant et a point de touche, notons que plus la fixation est rigide plus la réponses s'élargit vers les hautes fréquences

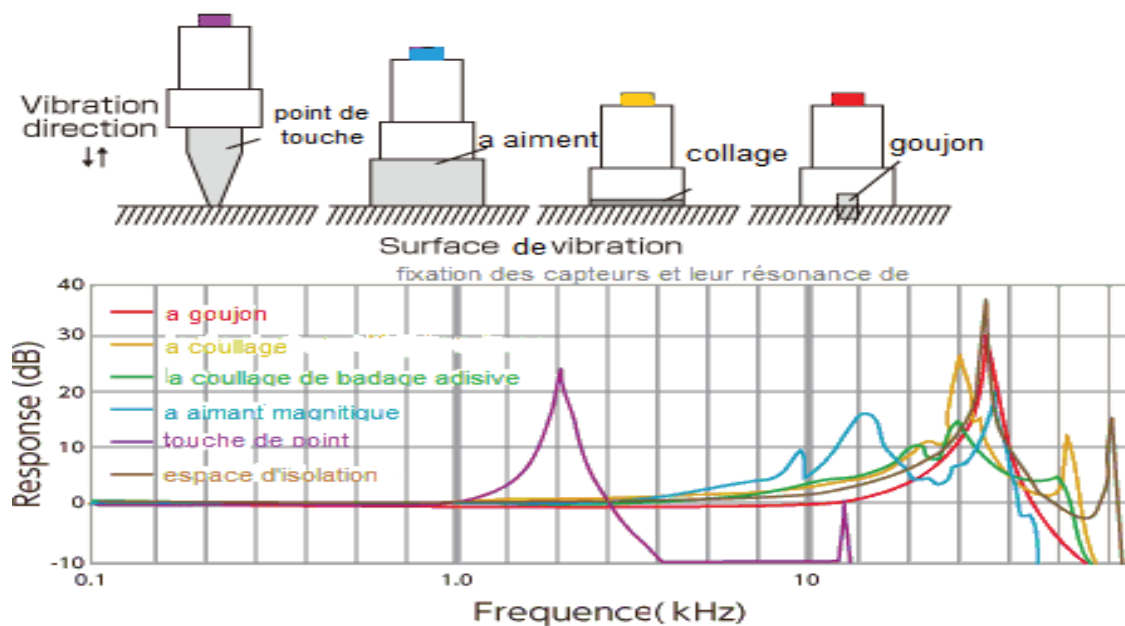


Figure.Nº III-20 : exemple des modes de fixation des accéléromètres et leurs résonances

### III.7.2 les types de mesures suivants la nature de vibrations

Dans une machine tournante les vibrations se transmettent du rotor aux structures à travers les liaisons qui peuvent être les roulements ou les paliers, alors que les vibrations seront donc mesurées au niveau des paliers, on distingue trois types de vibrations ; les vibrations relatives d'arbres, les vibrations absolues d'arbres et les vibrations absolues des paliers.

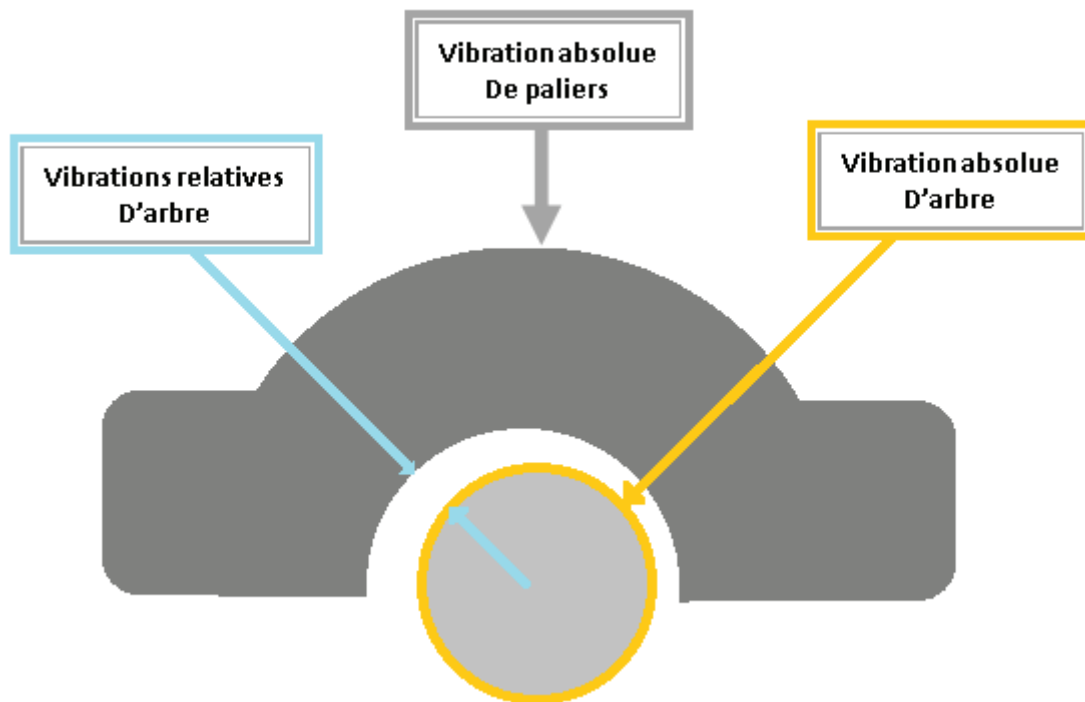


Figure N° III-21 : les différents types de mesures vibratoires

#### III.7.2.1 mesures des vibrations absolues du palier

Les vibrations absolues des paliers sont les vibrations qui apparaissent à la surface de la machine, et plus particulièrement sur les paliers et généralement la mesure de la norme de vibration décrit l'état global ou les mesures globales qui est selon les normes basé sur les valeurs efficaces.

#### III.7.2.2 mesures des vibrations relatives d'arbre

On entend par vibrations relatives d'arbre les mouvements rapides de l'arbre par rapport à ses paliers. Elles représentent les réactions du rotor aux forces alternatives agissant sur lui. Par exemple, un rotor balourdé est le siège de vibrations d'arbre : son centre de masse se déplace sur une orbite appelée « ORBITE CINÉTIQUE ».

### III.7.2.3 mesures du vibrations absolues d'arbre

Il est évident que des rotors légers tournant dans une structure très rigide et très lourde ne produiront que des vibrations de paliers faibles. C'est le cas de la plupart des compresseurs rotatifs. Par contre, les mouvements relatifs de l'arbre par rapport aux paliers lisses seront importants. L'amplitude des vibrations relatives d'arbre sera supérieure aux vibrations absolues des paliers dans un rapport variant entre 10 et 50. Dans ce cas, il conviendra de surveiller les premières.

Lorsque la masse du rotor augmente, dans une même structure, le rapport entre vibrations relatives d'arbre et vibrations absolues de paliers change, Il est toujours utile ici de mesurer les vibrations relatives d'arbre, mais il est sage aussi de surveiller les vibrations absolues de paliers, De cette manière, on peut connaître parfaitement le comportement vibratoire de la machine, Dans le cas de très grosses machines, comme par exemple les turbomachines de production d'énergie de grande puissance, le rapport entre la masse du rotor et celle des paliers augmente encore. Les vibrations absolues de paliers peuvent alors devenir aussi grandes que les vibrations relatives d'arbre, Dans ce cas, on mesure de préférence *LES VIBRATIONS ABSOLUES D'ARBRE*.

*Les vibrations absolues d'arbre sont la somme vectorielle des vibrations relatives d'arbre et absolues de paliers dans une direction radiale donnée.*

### III.7.3 interprétations des mesures

Généralement en travaille *avec le suivi de tendance*, Pour les mesures globales à une intervalles de temps réguliers, par exemple une fois par mois, et l'on établit un suivi en fonction de temps. Il est ainsi possible d'établir une référence considérée comme *bon état*. Si, au fil du temps, on s'écarte de cette valeur, on peut diagnostiquer un début de dégradation. Il est impératif dans cette méthode de prendre des mesures tout à fait comparatives.

Pour les utilisateurs d'un nombre important de machines du même type, il existe une autre méthode. On utilise les mesures sur tous les paliers dans des conditions d'utilisation similaires. On en déduit une valeur moyenne. Les mesures qui s'écartent trop de cette valeur moyenne laissent supposer des

défauts. Grâce à cette technique, on va pouvoir fixer des seuils, qui pourront servir par exemple de critères d'acceptation lors de la réception d'une machine.

### III.7.4 Les appareils de mesure, de collecte et d'analyse

#### III.7.4.1 Les appareils de mesure d'indicateurs scalaires larges bandes

Ce type d'appareils permet de mesurer l'amplitude efficace du signal vibratoire (Accélération et/ou vitesse) dans plusieurs plages fréquentielles comprenant

Souvent une plage réservée à la mesure d'un indicateur sensible à la présence

De défauts de type impulsionnel, Ces appareils équipés de filtres programmables,

D'intégrateurs, et d'un écran d'affichage et ils peuvent se présenter sous forme :

- Un module de surveillance à poste fixe destiné à la surveillance en continu
- De simples appareil portatifs dont certains peuvent également être  
Équipés d'un capteur de température infrarouge et d'un tachymètre

L'utilisation de ce type des appareils est très simple mais avec pour inconvénients

Talque parfois pour certains paliers la prise de mesure impossible ou dangereuse

Aussi la mauvaise reproductibilité des mesures a cause la non-maîtrise de

La rigidité de la liaison du capteur avec le palier lorsque le capteur est tenu à la main.

(F.YACINE, 2006)

#### III.7.4.2 Collecteur et analyseurs de signaux

Les capteurs de vibration convertissent le mouvement de vibration d'une machine en un signal électrique. Cependant, ce signal en forme brute est inutile à moins

qu'il ne soit conditionné pour fournir des informations significatives reflétant l'état mécanique de la machine. Ainsi, on a besoin d'un collecteur analyseur de vibration

qui peut collecter un signal électrique d'un capteur et le transformer en données

Significatives, pour la plupart d'entre eux, des fonctions d'analyses spectrales et

d'analyses de signaux plus ou moins complexes. De plus, grâce à une gestion

informatisée des données, il a rendu possible la surveillance périodique d'un grand

nombre de machines. (A Boulenge, 2009)



Figure.N° III-22 : collecteur analyseur de vibration (Documentation Bruel et Kjaer)

### III.7.5 Base de données et logiciel de surveillance vibratoire

Le Collecteur de vibration recueille et stocke une quantité limitée de données. Donc, ces informations doivent être téléchargées à un ordinateur pour former un historique de mesures vibratoire sur les différentes machines. Pour exécuter les susdites tâches et aider aussi dans la collecte, la gestion et l'analyse de données des machines, on a besoin d'un progiciel de surveillance vibratoire. Ces programmes de gestion de données pour la maintenance des machines tournantes stockent des données de vibration et font des comparaisons entre des mesures récentes, des anciennes mesures et les seuils prédéfinies d'alarme. Les mesures transférées au logiciel d'analyse de vibration sont rapidement examinées pour des écarts(déviations) de conditions normales. Niveaux globaux de vibration, Spectres, signal temporelle et d'autres paramètres sont produits pour aider analyser ces changements de vibration. On peut aussi générer des rapports montrant les machines qui ont une vibration excessive dépassant les seuils d'alarme.

### III.8 les normes vibratoires et seuils de jugement :

Les normes les plus utilisées dans le cadre de la maintenance vibratoire des machines tournantes de façon périodique (offlines) sont les suivantes :

- Norme ISO 10816 qui remplace les normes  
Norme ISO 2372  
Norme AFNOR E90-300

Ces normes ont pour objectif d'établir des directives générales pour le mesurage et l'évaluation des vibrations mécaniques prises sur les parties non tournantes des

machines (si rotor rigide) et ainsi caractériser leurs conditions de marche en ce qui concerne un fonctionnement sans incident et leur influence sur les machines adjacentes.

Niveaux vibratoires		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire (mm/s rms)	28				D
	18			D	C
	11.2		D	11.2	18
	7.1	D	7.1	C	7.1
	4.5	4.5	C	4.5	B
Bande passante adaptée au type de la machine	2.8	C	2.8	B	2.8
	1.8	1.8	B	1.8	A
	1.12		1.12	A	
	0.71	0.71			
	0.45	A	A		

Tableau N°03 : normes vibratoires ISO 20816

**GROUPE I**

Éléments de moteurs ou de machines qui, dans leurs conditions normales de Fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine (par Exemple moteurs électriques produits en série, puissance jusqu'à 15 kW).

**GROUPE II**

Machines de taille moyenne (en particulier moteurs électriques de puissance comprise entre (15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissance jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

**GROUPE III**

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations lourdes et relativement rigides dans la direction des vibrations.

**GROUPE IV**

Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans la direction des vibrations (par exemple groupes turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

**III 8. 1 Seuils de jugement :**

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants :

- zone A Bon
- zone B Admissible
- zone C Encore admissible
- zone D Inadmissible



### III 8.2 Choix des seuils vibratoires :

#### III8.2.1 Seuils de vitesse vibratoire :

Selon la norme **ISO 10816** l'intensité vibratoire est la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace dans la gamme de fréquences (**10-1000 Hz**) sur chaque palier, support et bride dans les trois directions perpendiculaires entre elles (horizontales, verticales et axiales).

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants : bon, admissible, encore admissible, inadmissible.

### III.10 Conclusion

Nous avons présente dans ce chapitre des notions de base concernant les vibrations aussi les différentes méthodes de surveillances et la démarche qui en peut suivie pour attendre les résultats nécessaires de diagnostic a fin de maitrisé

La maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire par des indicateurs

Ou par diagnostic suivant les techniques de surveillance associées à chacun.

Il faut dire que la surveillance et diagnostic la seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines ou les systèmes électromécaniques Ces défauts se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire (changement de sa signature vibratoire).

En fin en a présenté de façon général les notions de base de traitement de signal

Aussi les différents technique et les étapes pour visualiser un spectre suivant un signal délivré par un capteur tel qu'amplification, filtrage, échantillonnage etc.

Pour avoir un meilleur diagnostic suivant l'utilisations des théories de traitement de signal et vibrations il faut étudier de façon plus détailler les différentes images vibratoires des défauts selon les déférents applications ou mesures et c'est le but de prochain chapitre.

# CHAPITRE IV

## LES IMAGES VIBRATOIRES DES PRINCIPAUX DÉFAUTS

## IV.1 INTRODUCTION

La première démarche d'une action de surveillance ou diagnostic des systèmes électromécaniques est de demander quels sont les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de se rencontrer sur la machine à surveiller, pour avoir l'identification d'anomalies à un stade précoce, et suivi de leurs évolutions. La seconde concerne et les manifestations de ces défauts, c'est-à-dire, quelles informations, quels paramètres descripteurs du défaut faut-il élaborer et mesurer pour disposer des bonnes informations qui permettront la décision si la situation est normale ou non, aussi celles qui permettront de trouver ultérieurement l'origine et la gravité des défauts.

## IV.2 LES DÉFAUTS DES SYSTÈMES ÉLECTROMÉCANIQUES

Les défaillances susceptibles d'apparaître sur les machines les systèmes industriels ou systèmes électromécaniques peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques, magnétiques ou bien encore différents tel que pneumatiques, hydrauliques, Leurs origines sont diverses et peuvent être représenté comme suit [110]

- *Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts* : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ..., etc. ;
- *Les amplificateurs de défauts* : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, ..., etc. ;
- *Les vices de fabrication et les erreurs humaines* : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ..., etc.

### IV.2 images vibratoire des Défauts liées à la fréquence de rotation du rotor

#### IV.2.1 défauts de balourd

Un rotor est parfaitement équilibré si son axe principal d'inertie se confond avec son axe de rotation, Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence d'un

déséquilibre de l'arbre d'une machine, Ce phénomène se produit durant sa rotation et il est dû aux mauvaises répartitions spatiales de la masse dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante.

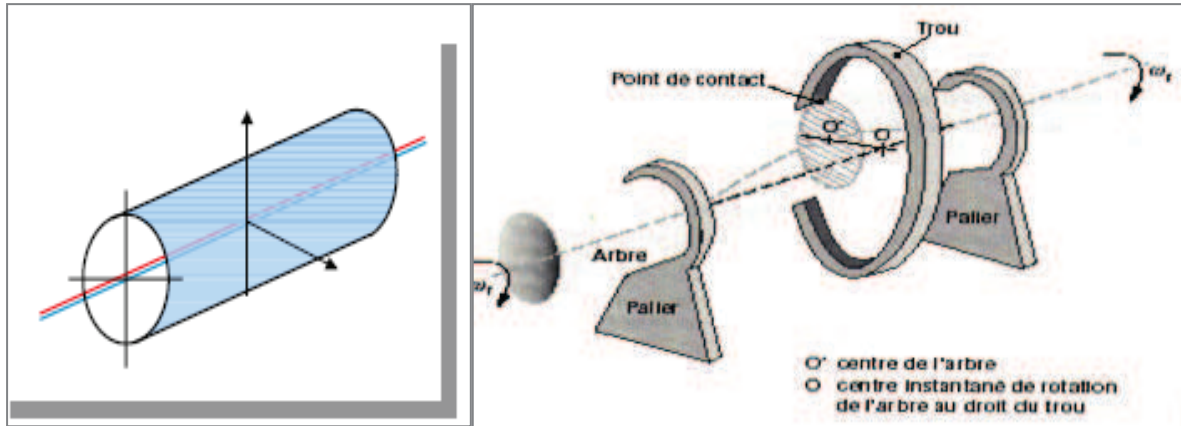


Figure N° IV-01 : le principe de balourd (SFK).

### IV.2.1 Types des balourds

Suivant la répartition du balourd sur le long du rotor, on distingue trois types de balourd.

#### IV.2.1.1 Balourd d'origine mécanique

##### A. Balourd statique :

Dans ce cas, les deux paliers supportant le rotor vont subir en même temps un effort centrifuge du au déséquilibre. Il n'y aura donc aucun déphasage entre les mesures prises au même point, sur les deux paliers

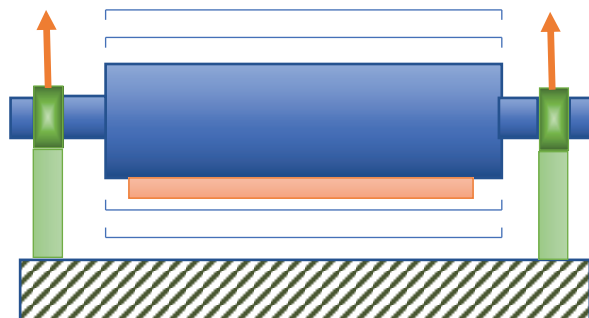


Figure N° IV-02 : le balourd statique

La force centrifuge est une force radiale, proportionnelle à la vitesse de rotation selon la relation suivante :

$$F = M \cdot r \cdot W^2$$

Ou  $W$  : vitesse de rotation

On voit clairement que les efforts exercés sur les deux points de mesures sont parfaitement en phase, les efforts s'exercent dans la même direction (déphasage nul).

### B. Balourd couple

Dans le cas d'un 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 et donc révélateur d'un balourd dynamique, **figure**

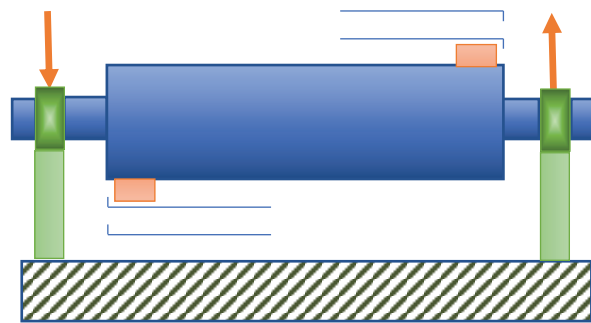


Figure N° IV-03 : le balourd couple

Cette répartition du balourd ne peut plus être détectée par oscillation, le rotor au repos n'ayant plus de position préférentielle. Le rotor en rotation entraîne un mouvement de « culbute » autour de son axe giratoire (perpendiculaire à l'axe de rotation), car les deux balourds exercent un couple. Ce type de répartition de balourd est appelé couple de balourd. Pour corriger le couple de balourd, il est nécessaire d'avoir un couple contraire, c'est-à-dire deux balourds correcteurs de même valeur décalés de 180° correspondant au balourd d'origine, et placés dans les deux plans de correction. Il faut prendre en considération les couples de balourd surtout dans le cas de rotors en forme de cylindre allongé.

### c. Balourd dynamique

Dans la réalité, le rotor ne possède pas qu'un seul balourd, mais en théorie une multitude répartie arbitrairement le long de l'axe de rotation.

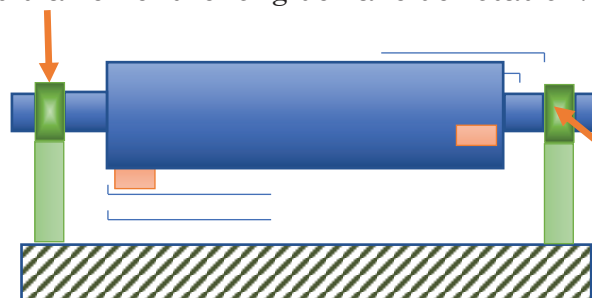


Figure N° IV-04 : le balourd dynamique





On y remédie par deux balourds résultants (représentés ici par des flèches) placés dans deux plans quelconques et ayant en général des valeurs et des positions angulaires différentes. L'état de ce balourd ne pouvant être constaté vraiment qu'en rotation, on parle de balourd dynamique, Il se décompose en un balourd statique et un couple de balourd, l'une ou l'autre composante pouvant prédominer. Deux plans de compensation sont nécessaires pour corriger complètement un balourd dynamique. Presque tous les rotors ont un balourd dynamique. Les machines à équilibrer horizontales et verticales conviennent pour de tels cas.

#### IV.2.1.2 Balourd d'origine thermique

##### A. Déformation des rotors de turbine

Lorsque les rotors ne sont pas homogènes, ou lorsque la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques. S'ils se déforment de façon dissymétrique, les centres de gravité se déplacent et les efforts varient. Le critère de diagnostic repose alors sur la corrélation entre les variations de température et l'évolution des vibrations. La rapidité de l'évolution renseignera sur l'origine du défaut.

#### IV.2.1. 3 Balourd d'origine électriques

##### A. Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques

Comme précédemment, une non-homogénéité du rotor peut induire des déformations. En raison de l'énergie importante dissipée par effet Joule ou par hystérésis, il est nécessaire de refroidir les rotors. Toute dissymétrie de débit (canaux de ventilation bouchés ou pertes de charge différentes) se traduira lors d'une variation de puissance par une variation des vibrations. Les vibrations sont alors fonction de l'échauffement qui dépend de l'intensité du courant dans le rotor, mais aussi de la température du fluide de refroidissement, ou de sa Pression. Un effet similaire peut être obtenu en cas de court-circuit entre spires, provoquant une dissymétrie d'échauffement. Il faut, pour trouver l'origine de cette déformation, compléter les informations précédentes par des mesures électriques (isolement, résistance interne ou courants).

##### B. Glissement et dilatation contrariée des bobinages de machines électriques

Si un obstacle s'oppose à la dilatation d'une barre, ou si les forces de frottement deviennent élevées, la dilatation du bobinage ne peut plus se faire librement et le rotor se tord. On observe alors dans ce cas une évolution du niveau vibratoire.

#### IV.2.1. 4 Balourd liée au défauts spécifique (évolutifs)

Si au passage par un orifice (palier, joint d'étanchéité par exemple) l'arbre s'échauffe de manière dissymétrique, soit parce qu'il frotte, soit parce que le brassage d'huile provoque un échauffement plus intense d'un côté de l'arbre que de l'autre si de plus, La déformation de l'arbre qui résulte de cet échauffement déplace à son tour le point chaud (vibration maximum décalée par rapport au point chaud qui lui donne naissance), alors, toutes les conditions sont réunies pour amorcer un phénomène de variations cycliques du déséquilibre.[

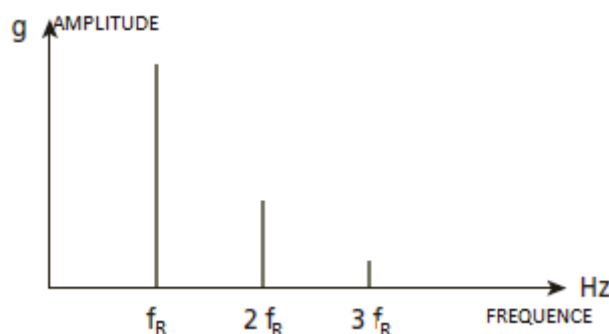
#### IV.2.1. 5 Les outils de détections et Typologie du balourd

##### A. Analyse spectrale

Un défaut de balourd est donc en peut révéler par les trois capteurs (déplacement vélocimètre ou accéléromètre :

- Une composante d'amplitude élevée à la fréquence de rotation du rotor en Direction radiale, parfois en direction axiale dans le cas de rotors en porte à faux,
- Pas ou très peu d'harmoniques,
- Pas d'harmonique d'amplitude prépondérante (**en mode accélération**) à Deux ou trois fois la rotation,
- Pas de sous harmoniques,
- Une amplitude qui peut varier fortement avec la vitesse de rotation

Alor L'image vibratoire sera donc constituée d'une composante d'amplitude Prépondérante à la fréquence de rotation du rotor



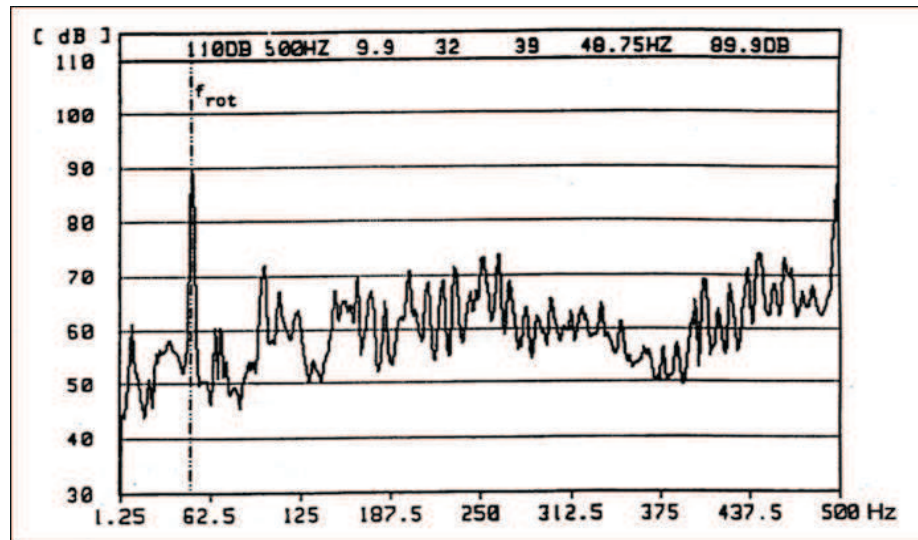
**Figure N° IV-05 a :** Image vibratoire théorique d'un balourd. Prépondérance de l'amplitude liée à la fréquence de rotation sans ou avec peu d'harmoniques et sans bandes latérales de modulation.

Généralement, la raie à cette fréquence se voit plus nettement sur un spectre

Issu d'une **mesure prise radialement** (souvent dans la direction **radiale**

**Horizontale**), excepté pour les rotors en porte-à-faux pour lesquels on peut

Constater également, dans la direction axiale, la prépondérance de l'amplitude de cette composante.



*Spectre réel d'un ventilateur tournant à 2925 tr/min*

**Figure N° IV-05 b :** Spectre du palier (direction radiale horizontale) côté turbine d'un ventilateur tournant à 2 925 tr/min (48,75 Hz : 228 mg ou 7,3 mm/s) traduisant la présence d'un balourd(A-M).

### B. L'analyse des phases

L'analyse spectrale de deux types de balourd présentera un spectre identique. L'information de phase n'est pas représentée dans un spectre. Pour pouvoir faire une distinction entre les types de balourd, il est obligatoire de faire une analyse de phase. Lors d'un équilibrage, il est important de savoir de quel type de balourd il s'agit. Pour un balourd statique, un plan d'équilibrage suffit alors que pour un balourd de couple il faut nécessairement deux plans d'équilibrage.

En effet, le déséquilibre induisant une force tournante va produire son effet Maximum à des moments différents tout au long de la circonférence du Palier et ce **décalage est appelé déphasage**, l'analyse de déphasage nous a permet pas seulement de détecter les défauts de balourd aussi comtifiée le nombreux défaut masque qui influent sur ce dernier dont l'amplitude élevée est correspondant à la fréquence de rotation, alors l'analyse de phase seul permet de Différencier :

- Les défauts induisant des efforts rotatifs comme le balourd,

Si le déphasage entre deux mesures vibratoires sur les deux paliers de la machine :

- est égale à  $0^\circ$  alors le balourd est statique
- est égale à  $180^\circ$  alors c'est un couple de balourd
- est quelconque alors le balourd est dynamique. [A. Bou/C. pa.009\_1]



- Les défauts induisant des contraintes directionnelles (non tournantes) comme les efforts induits par une courroie trop tendue, un desserrage de palier, le faux rond d'un pignon, une excentricité de poulie...etc.

## IV.2.2 Défaut d'alignements

Parmi les principales causes de réduction de la durée de vie des équipements, est les défauts d'alignement, Un défaut d'alignement peut apparaître lorsqu'un arbre doit entraîner un autre arbre, souvent par l'intermédiaire d'un accouplement. Le défaut est créé lorsque l'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés.

Il y'a en générale deux types de désalignement

- Désalignement angulaire
- Désalignement radial

Mais aussi il existé un troisième type est désalignement mixte entre radial et angulaire.

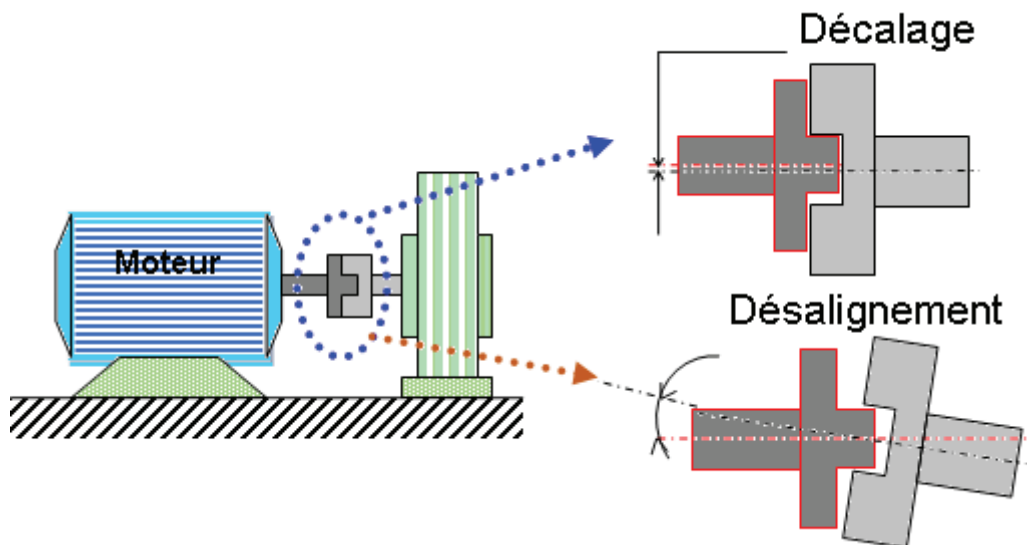


Figure N° IV-06 : principe désalignements

### IV.2.2.1 Désalignement angulaire

Un défaut d'alignement est révélé par la présence d'une raie d'amplitude prépondérante (principalement lorsqu'elle est exprimée en accélération) dont la fréquence correspond généralement à l'ordre 2 de la fréquence de rotation (Parfois trois ou quatre fois).

#### A. Image vibratoire Désalignement angulaire

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la

fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes

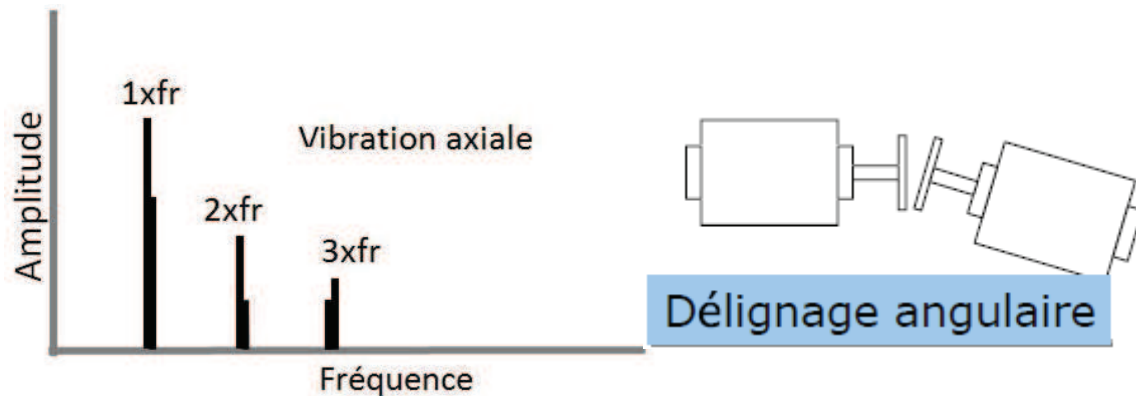


Figure N° IV-07 : image désalignement angulaire (formation).

### B. Analyse de déphasage

On doit observer aussi un déphasage de  $180^\circ$  entre deux mesures axiales réalisées sur les deux paliers situés de côté de l'accouplement.

#### IV.2.2.2 Image vibratoire Désalignement radial

##### A. Image vibratoire de désalignement radial

Ce défaut se traduit par une vibration élevée à 2xfr dans la direction radiale

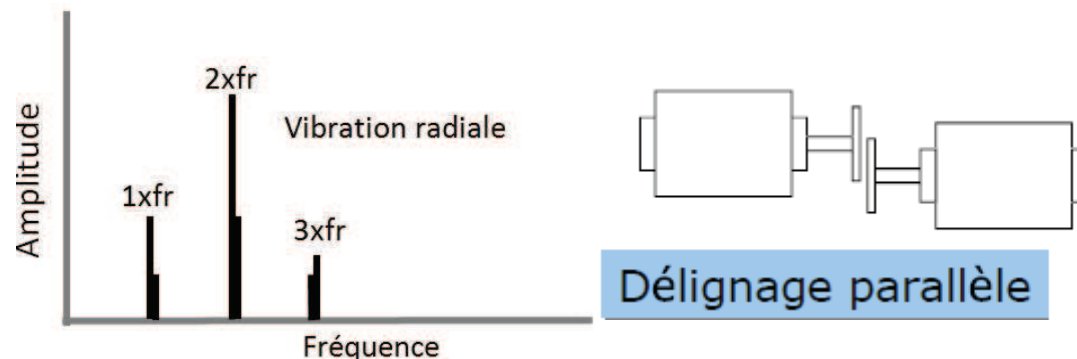


Figure N° IV-08 : image désalignement radial(formation).

### B. Analyse de déphasage

On doit observer aussi un déphasage de  $180^\circ$  entre deux mesures radiales réalisées sur les deux paliers situés de côté de l'accouplement.

#### IV.2.2.3 Image vibratoire Désalignement dû à l'arbre fléchi

##### A. Image vibratoire

L'amplitude de la vibration axiale est plus importante que celle de la vibration radiale. Sur le spectre de vibration on va observer deux pics à 1xfr et à 2xfr



- Si la composante d'ordre 1 (1xfr) est supérieure à la composante d'ordre 2 (2xfr) alors le point de déformation est au milieu de l'arbre.
- Si la composante d'ordre 2 (2xfr) est supérieure à la composante d'ordre 1 (1xfr) alors le point de déformation est sur l'une des deux extrémités de l'arbre.

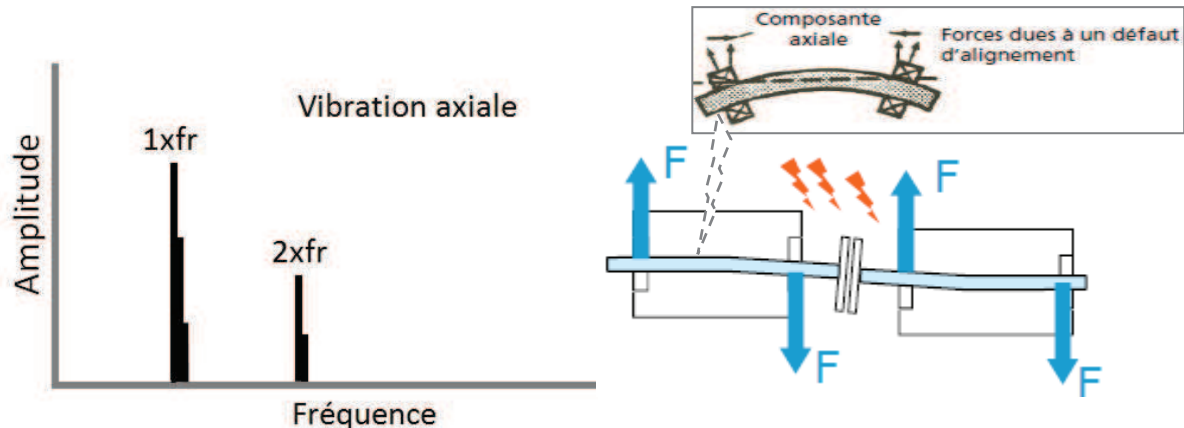


Figure N° IV-09 : image de l'arbre fléchi

#### NOTE:

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les Causes peuvent être :

- Déformation du stator
- Efforts dissymétriques sur le rotor
- Calage du rotor (machine à paliers lisses)
- Déformation de la structure porteuse
- Blocage d'accouplement

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation

### IV.2.3 Défaut de Jeu mécanique

Un tel défaut peut être causé par un jeu excessif entre le roulement et son logement, entre les éléments roulants et les bagues de roulements ou entre un impulseur et son arbre. Généralement c'est dû à un mauvais montage Qui produira plusieurs harmoniques dans le spectre de vibration

#### A. Analyse temporelle

Le signal temporel va avoir une forme tronquée. La phase de signal est instable et elle peut varier d'une mesure à une autre

#### B. Analyse spectrale

Ce défaut peut présenter plusieurs images caractéristiques. Il fait ressortir la fréquence fondamentale  $f_r$  et ses harmoniques. Contrairement au défaut d'alignement, les harmoniques peuvent ressortir sur une gamme très étendue de fréquences et pas seulement jusqu'au 4e ordre. Il peut aussi parfois faire apparaître la fréquence  $1/2 f_r$  et ses harmoniques à un niveau toutefois moindre que les harmoniques de la fréquence fondamentale.

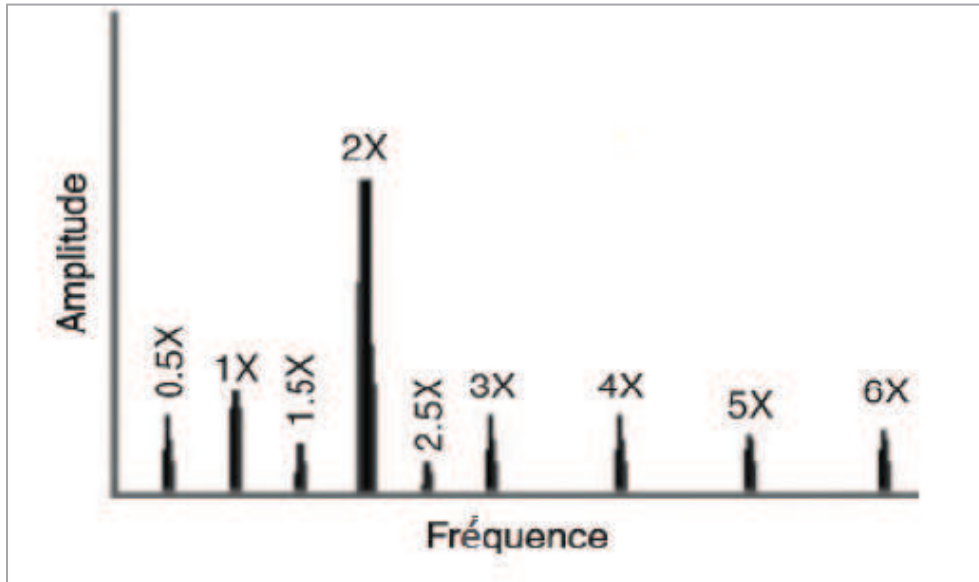
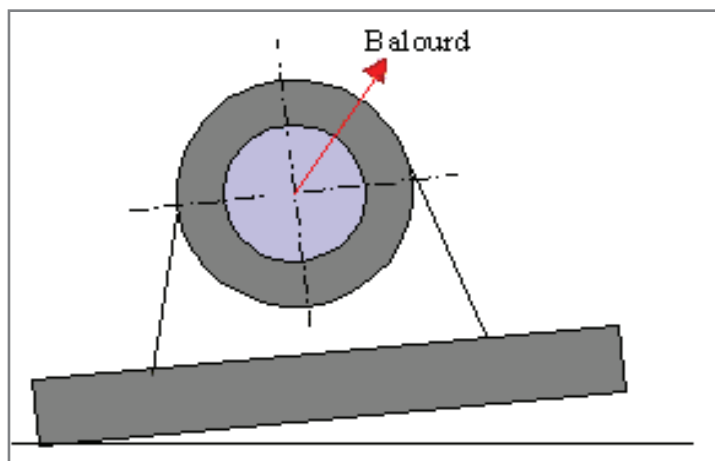


Figure No IV-10 : image d'un jeu mécanique

IV.2.4 Défaut de serrage

C'est une vibration due au desserrage des boulons d'ancrage ou de fixation des paliers sur le châssis de la machine. Cette vibration se produit sous l'effet du balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier

Figure No IV-11 : desserrage De structures



L'image vibratoire de défaut

A. Analyse spectrale

L'image vibratoire induite par un desserrage ou par une fissuration d'ancrage Ou de bâti est également caractérisée par la présence d'une composante d'amplitude prépondérante dont la fréquence peut également correspondre à l'ordre 1 de la fréquence de rotation.

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

### B. Analyse déphasage

Une analyse du déphasage permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante) d'un défaut de serrage (force directionnelle due à la contrainte).

Le déphasage relatif pour deux composantes radiales orthogonales sera voisin de zéro ou de  $180^\circ$ , selon la position des capteurs par rapport au plan de Desserrage ou de fissuration (On observera un déphasage de  $180^\circ$  entre deux mesures radiales verticales réalisées sur la pate de fixation de la machine et le châssis).

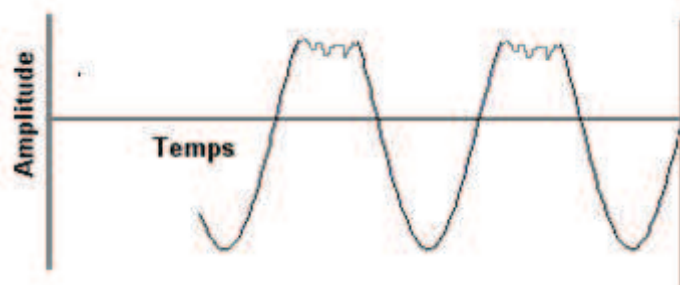
### IV.2.5 Défauts induits par un frottement entre rotor et stator

Dans le cas d'un **frottement** rotor/stator, la raideur du système rotor/palier Est modifiée lors du contact rotor/stator et devient alors une fonction périodique Du temps.

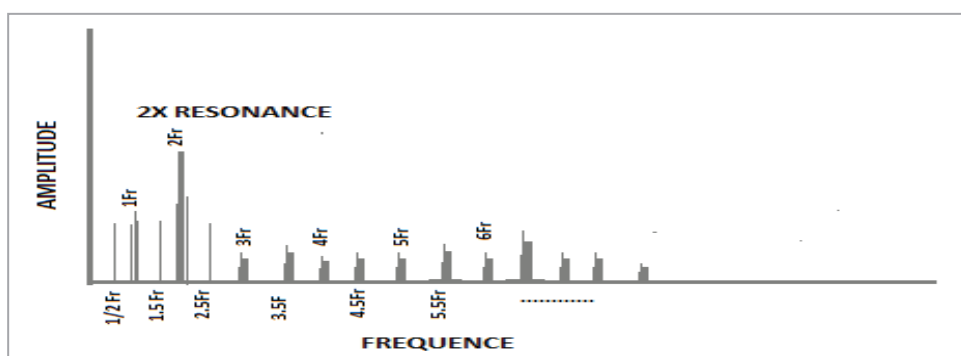
#### A. Analyse temporelle

Le signal temporel va avoir une forme tronquée :

*Figure N° IV-12 : image temporelle  
Un frottement entre rotor et stator*



#### B. Analyse spectrale



*Figure N° IV-12-b : image vibratoire d'un frottement rotor stator*

Le mouvement du rotor montre que la rotation du rotor peut induire des vibrations dont la fréquence de base correspond le plus souvent à l'ordre **1/2 de la fréquence de rotation** et parfois aux ordres 1/3, 1/4 et 1/5 (figure 5.16).

Cependant, l'image vibratoire d'un frottement rotor/stator correspond généralement à l'ordre 1/2 de la fréquence de rotation

### IV.2.6 Défauts induits par les paliers hydrodynamiques

Dans un palier lisse, l'arbre est porté par l'huile sous pression. Il prend une position d'équilibre sous l'effet de son poids, de la vitesse de rotation, et de la force liée à la pression de l'huile. Toute variation de ces forces ou tout effort supplémentaire s'exerçant sur le rotor modifie cette position d'équilibre.

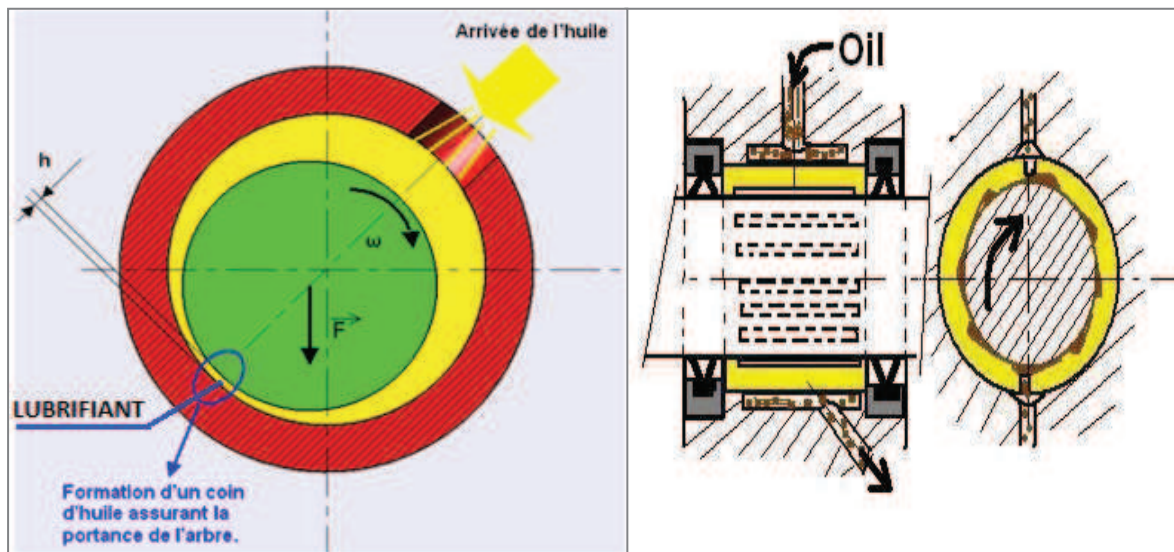


Figure N° IV-13 : Palier lisse [Wikipédia]

#### L'image vibratoire

A. Analyse spectrale :

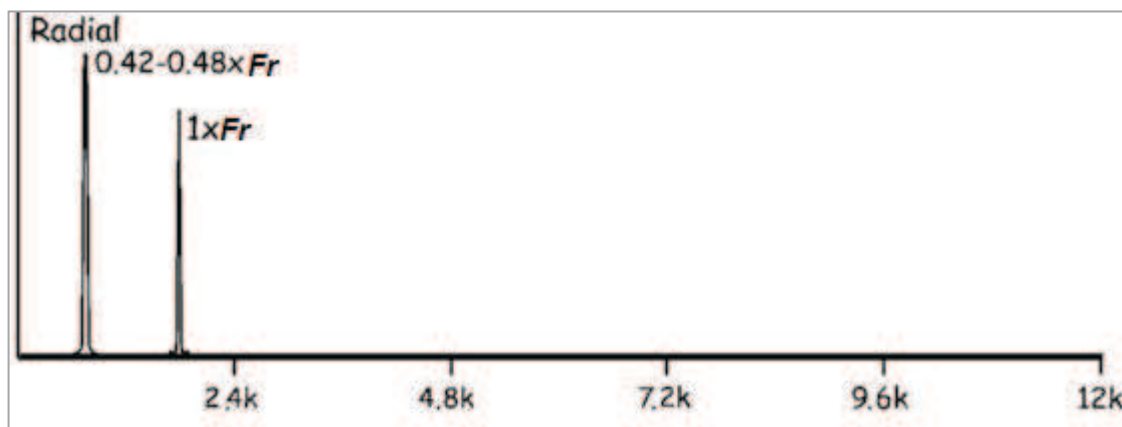


Figure N° IV-14 : Image vibratoire d'un défaut au niveau de palier lisse

Indépendamment des défauts affectant tous les types des paliers, l'analyse spectrale sur paliers fluides peut mettre en évidence un déséquilibre des forces qui maintiennent l'arbre en position stable, il s'agit des défauts de type :





- Tourbillon d'huile se produisant à une fréquence dépendante de la vitesse de l'huile dans le palier, soit 0,42 à 0,48 fois la fréquence de rotation de l'arbre ;
- Fouettement d'huile lorsque la fréquence de précession dépendante de la vitesse de l'huile (0,42 à 0,48 fois la fréquence de rotation) coïncide ou est supérieure à la fréquence critique de l'arbre. Ce dernier défaut, extrêmement grave, peut entraîner des dégradations rapides et catastrophiques pour la machine.

### IV.2.7 cavitations

Il s'agit d'un défaut d'écoulement d'un fluide qui se produit quand la pression, à l'intérieur de la pompe, s'abaisse à un niveau égal à celle de la vapeur saturante du fluide véhiculé, Il y a formation de bulles de gaz qui, en implosant, excitent un grand nombre de modes de structure. La cavitation est causée par un débit d'aspiration insuffisant et se manifeste par un bruit caractéristique identique à celui que provoquerait le passage de graviers dans le corps de la pompe. Ces phénomènes sont souvent intermittents et s'ils persistent, ils peuvent dégrader des éléments internes de la pompe et notamment éroder les aubes des impulseurs.

La cavitation induit des vibrations aléatoires à spectre étendu et dont l'énergie se concentre souvent autour de la fréquence de passage des aubes et de ses harmoniques et des fréquences des principaux modes de structure.

On pourra distinguer un phénomène de cavitation des autres phénomènes ayant des manifestations vibratoires voisines (usure de bagues de roulement, défaut de lubrification) en prenant une mesure sur le corps de pompe. Pour un défaut lié à un palier, l'énergie vibratoire sera beaucoup plus élevée sur le palier que sur la volute, alors que pour la cavitation, elle sera généralement supérieure sur la volute.

#### **A. Fréquence de passage des pales, aubes, ailettes, encoches**

La fréquence de passage des pales d'un ventilateur correspond au produit de la Fréquence de rotation par le nombre de pales de la roue, multipliée éventuellement par le nombre de ventelles fixes fractionnant la zone de déchargement.

La fréquence de passage des aubes d'une pompe, d'un compresseur ou d'une Turbine correspond au produit de la fréquence de rotation par le nombre d'aubes.

La présence dans le spectre vibratoire de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence de pales ou d'aubage ou à leurs harmoniques est liée au fonctionnement de la machine et ne constitue donc pas nécessairement une anomalie.

#### IV.2.8 Défauts de transmission par courroies

Les principaux défauts rencontrés sur ce type de transmission sont :

- Une détérioration localisée d'une courroie (partie arrachée, défaut de jointure...),
- Des courroies détendues,
- Des courroies usées,
- Un mauvais alignement des poulies,
- Une poulie excentrée,
- Un défaut de transmission courroie poulies crantées. [\[Aide-mémoire sur\]](#)

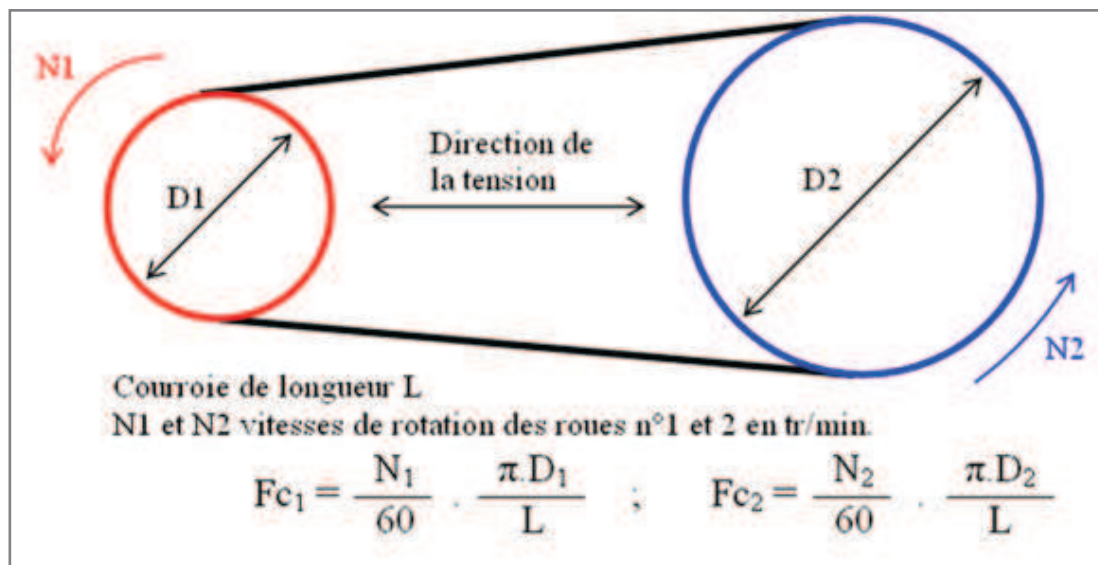


Figure N° IV-15 : Transmission poulies courroies. [\[For SKF SONA\]](#)

#### IV.2.7.1 L'image vibratoire des Courroies usées, détendues ou désaxées

##### A. Courroies trapézoïdales

La détérioration localisée d'une courroie implique généralement un effort ou un choc dont la fréquence de répétition correspond à la fréquence de passage de ce défaut. L'image vibratoire d'un défaut de courroies (figures 5.14 a et b) est constituée d'un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de passage de courroies avec prépondérance des composantes dont les fréquences sont voisines de fréquences propres de structure.

La fréquence passage de courroies se situe toujours en dessous des fréquences de rotation des arbres menant et mené. À cause des inévitables glissements

poulies/courroies, la fréquence réelle sera toujours inférieure de 2 à 3 % de sa valeur théorique calculée à partir de la relation :

$$F_c = \frac{\pi d}{L} F_{rot}$$

Avec :

- L : la longueur de la courroie,
- Frot, : la fréquence de rotation de la poulie et d le diamètre correspondant.

Lorsque les courroies sont usées ou détériorées, détendues ou désaxées, on observe dans le spectre vibratoire la présence de composantes dont les fréquences correspondent aux premiers ordres de la fréquence de passage de Courroie. Souvent, l'amplitude de la composante d'ordre 2 est prépondérante

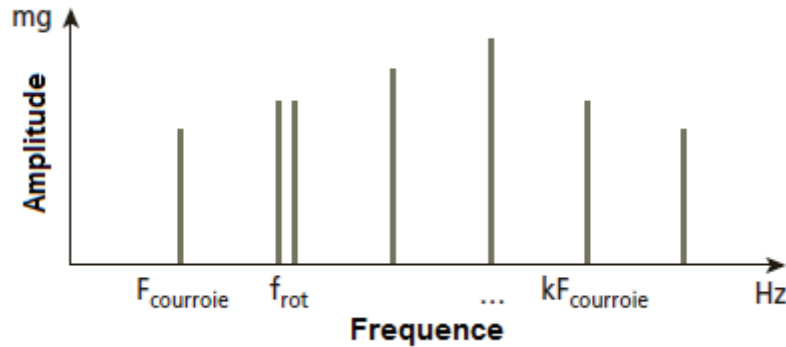


Figure No IV-16 : Image théorique d'un défaut localisé de courroie.

**B. Courroies crantées**

Dans le cas d'une courroie crantée, l'usure ou le désalignement des poulies se Manifestent par la présence d'une composante d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence de synchronisation (Produit de la fréquence De passage

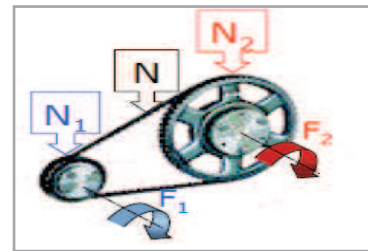


Figure No IV-17 : courroie crantée

(SKF)

De courroie par le nombre de crans ou de la fréquence de rotation des roues menante ou menée par le nombre de dents de cette dernière). Pour ce type de transmission, les fréquences rencontrées sont les mêmes que pour les engrenages avec cependant des amplitudes vibratoires moindres du fait de la nature du matériau qui a tendance à amortir les chocs, La fréquence de passage de la courroie s'écrit alors :

$$F_{courroie} = \frac{Z}{Z_c} F_{rot}$$

Avec : F courroie = fréquence de passage de la courroie

Frot = fréquence de rotation d'une poulie

Z = nombre de crans de cette même poulie

Zc = nombre de crans de la courroie

#### IV.2.8.2 Mauvais alignement des poulies

Un désalignement de poulies induit une composante d'amplitude élevée prépondérante en direction axiale à la fréquence de rotation des arbres menant et menée, très Souvent, Le diagnostic peut être confirmé par la mesure des déphasages entre composantes axiales de même fréquence.

#### IV.2.8.3 Poulie excentrée

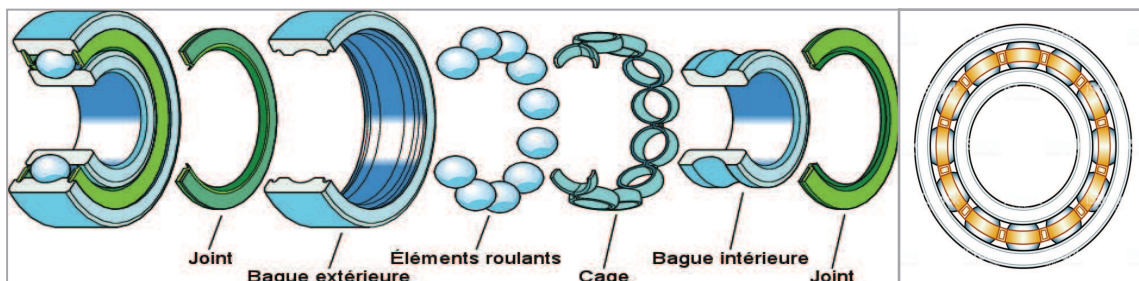
Une poulie excentrée (centre de gravité différent du centre de rotation) induit une composante vibratoire d'amplitude élevée à la fois sur les paliers des poulies menante et menée en direction radiale, dont la fréquence correspond à la fréquence de rotation de la poulie excentrée, L'excentricité d'une poulie peut être confirmée par une mesure de déphasage.

#### Remarque

La meilleure méthode de diagnostic d'un défaut de transmission poulies/courroies est à partir de l'image du couple que représente l'intensité du courant statorique d'un moteur.

#### IV.2.9 études des Défauts de roulements

**Généralités** : Un roulement est composé de bague intérieure, bague extérieure, cage et d'éléments roulants. Dans la plupart des cases



*Figure N° IV-18 : constitution d'un roulement (Wikipédia)*

Un roulement est l'organe le plus sensible dans une machine tournante. Sa durée de vie est une donnée statistique caractérisant le nombre de cycles. Le nombre de cycles est le nombre de tours qu'il peut effectuer en étant soumis à une contrainte spécifique avant de présenter des défauts, On trouve, dans les catalogues des constructeurs, des indications sur la durée de vie prévisionnelle pour des conditions de charge déterminées. Grâce à ces données, il est possible d'établir un calendrier indicatif dans lequel on prévoira le remplacement du palier après ce temps de fonctionnement.

IV.2.9.1 déterminations des fréquences caractéristiques

Dans la plupart des cas, la dégradation à un stade précoce se traduit par la présence d'un défaut localisé ponctuel (fissure, trace de micro grippage, amorce d'écaillage, empreinte...) affectant une des pistes, ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage sur le défaut ou à chaque contact du défaut avec une des deux pistes, Pour chaque type de roulement et en fonction des cotes de fabrication de chacun de ses éléments (figure ), on peut considérer quatre fréquences caractéristiques :

- La fréquence de passage des billes (ou rouleaux)  
Sur la bague externe du roulement,  $F_{be}$ :

$$f_{be} = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de passage des billes (ou rouleaux)  
Sur la bague interne du roulement,  $F_{bi}$  :

$$f_{bi} = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de passage d'un défaut de cage,  $F_c$  :

$$f_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right) \cdot f_r$$

- La fréquence de rotation des éléments  
Roulants sur eux-mêmes,  $F_e$  ou  $F_b$  :  
roulement

$$f_b = \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \cdot f_r$$

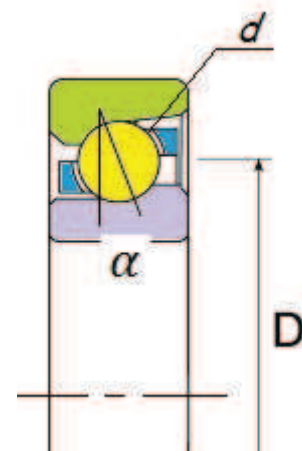


Figure № IV-19 : constitution d'un

Avec :

**Nb** : le nombre d'éléments roulants

**D** : le diamètre primitif

**d** : le diamètre des éléments roulants

**α** : l'angle de contact

**f<sub>r</sub>** : la fréquence de rotation de la bague interne (la bague externe étant supposé fixe)

IV.2.9.2 Les dégradations et les défauts de roulements

Les roulements sont, sans doute, les organes les plus sensibles d'un parc de machines, la plupart des dégradations de roulements ont pour origine des maladresses de manutention ou de montage, donc pour éviter les démontages systématiques en optant pour une stratégie de surveillance appropriée, Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- Usure normale
- Charge

- Défaut de graissage
- Défaut de montage
- Agents extérieurs, ...

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un caillage des surfaces en contact (bagues et roulements roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée.

**IV.2.9.3 Les dégradations généralisées**

L'écaillage augmente lorsque la dégradation du roulement évolue pour gagner l'ensemble des éléments en contact, Cette évolution anarchique entraîne l'apparition de nombreux chocs durs qui excitent les fréquences de résonances (hautes) du roulement. Le spectre associé présente un pic dont l'aire (représentative de l'énergie) augmente avec la dégradation.

Le processus normal de dégradation d'un roulement est l'écaillage par fatigue qui présente quatre stades de dégradation bien distincts auxquels sont associées des typologies vibratoires bien différenciées.

**Stade 1**

Le spectre de mesure vibratoire sur un roulement peut être divisé en trois zones :

- Zone A : fréquence de rotation de la machine et ces harmoniques
- Zone B : fréquences caractéristiques du roulement (80 - 500Hz)
- Zone C : fréquence propre du roulement (500 – 2000 Hz)
- Zone D : Détection à haute fréquence (HFD : High Frequency Détection) (2 – 60 KHz)

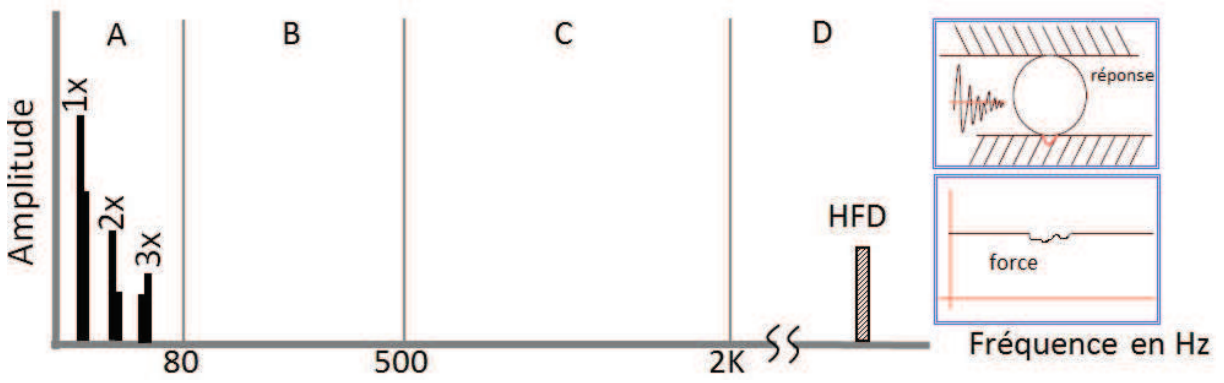


Figure N° IV-20: Image vibratoire d'un défaut de roulement au premier stade

Les premiers signes de fatigue d'un roulement se manifestent avec des gammes de fréquence ultrasoniques (20 - 60 KHz). Ces fréquences sont évaluées par La

méthode de détection à haute fréquence (HFD) : « pointes d'énergie » ou « ondes de choc »....

**Stade 2**

Durant cette phase il y'aura création de micro fissures interne par fatigue. Le passage des éléments roulants à proximité de ces fissures va engendrer des vibrations ayants des fréquences égales aux fréquences de résonance du roulement. L'image vibratoire va se caractériser par un pic et une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation dans la zone C. D'autre part l'amplitude HFD va doubler par rapport à celle obtenue au premier stade.

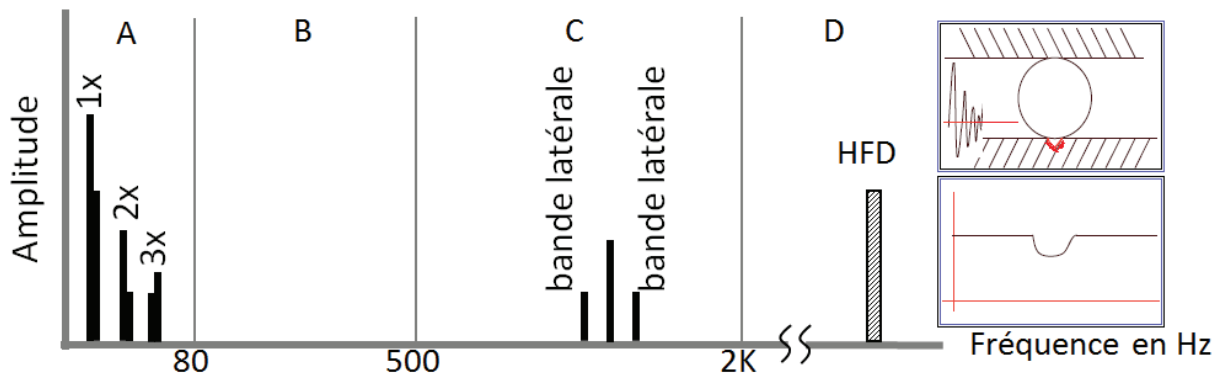


Figure N° IV-21 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au deuxième stade

**Stade 3**

Durant cette phase les micros fissures vont se propager jusqu'à la surface des pistes du roulement et leurs nombres va augmenter. L'analyse spectrale de ce phénomène montre un ou plusieurs peignes de raies dans la zone B ayant comme composantes principales la fréquence caractéristique du ou des composants endommagés et ces harmoniques. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales.

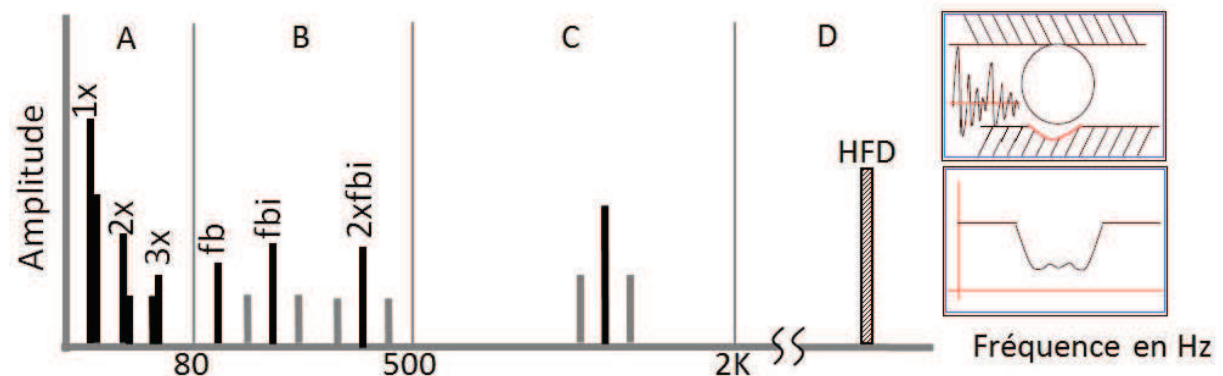


Figure N° IV-22 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au troisième stade

**Stade 4**

En phase finale de petites particules de matériau du roulement se détachent de la surface du chemin de roulement ou des éléments du roulement (Écaillage) le roulement est complètement endommagé. Sur le spectre de vibration on va voir une densité spectrale de bruit dans la zone C et qui s'étend vers la zone B aussi.

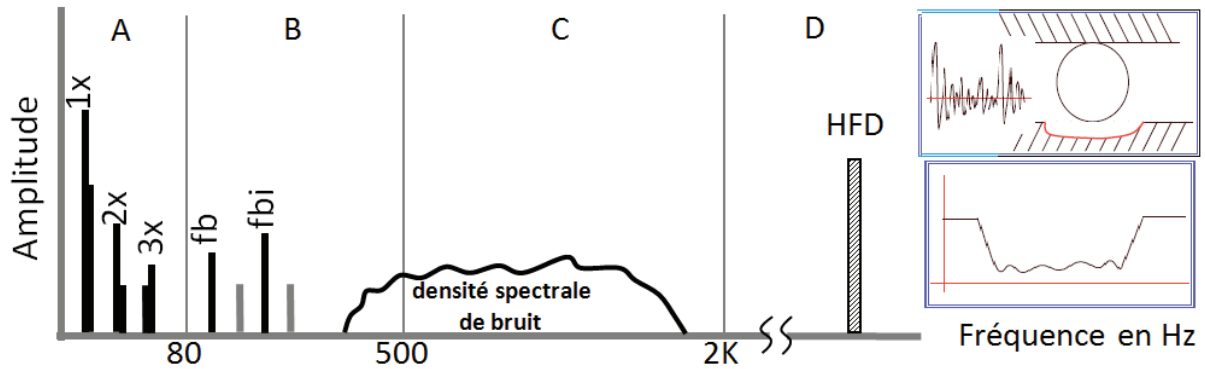


Figure N° IV-23 : Image vibratoire d'un défaut de roulement au quatrième stade

IV.2.9.4 les défauts de Dégradation localisée

Un défaut localisé sur un des éléments se manifestera par un choc dur la Fréquence de contact de la détérioration :

- Défaut sur bague extérieur choc FBE
- Défaut sur bague intérieur choc FBI
- Défaut sur élément roulant choc 2. FB

A. défauts Affectant la bague fixe ou extérieur

Si le défaut affecte la bague fixe d'un roulement, généralement la bague externe, le défaut se manifestera, dans le domaine spectral, par un peigne de raies de pas égal à la fréquence  $F_{be}$  et dont l'amplitude dépendra essentiellement à la réponse impulsionnelle du roulement et de son palier, l'amplitude des forces d'excitation étant constante exemple :

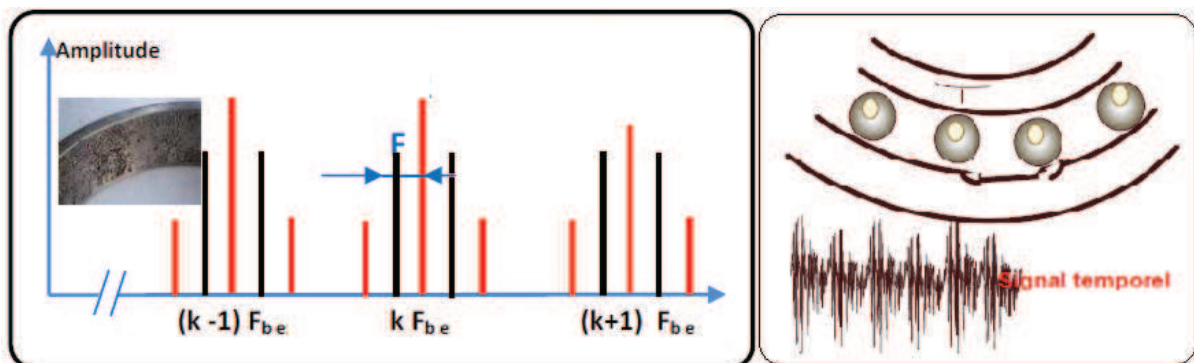


Figure N° IV-24 : Image vibratoire d'un défaut de bague extérieure

### B. Défauts Affectant la bague roulante ou intérieur

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image Vibratoire un peigne de raies. À chaque composante de ce peigne, sont associées Plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation.

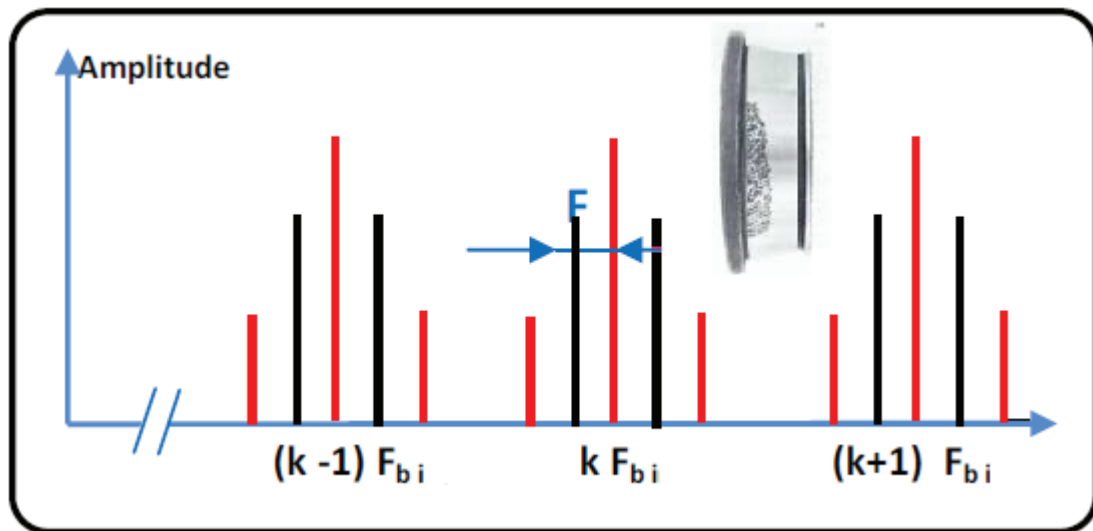


Figure N° IV-25 : Image vibratoire d'un défaut de bague intérieure

### C. Défauts Affectant l'élément roulant

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a Pour image vibratoire un peigne de raies. a chaque composante de ce peigne, sont Associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage

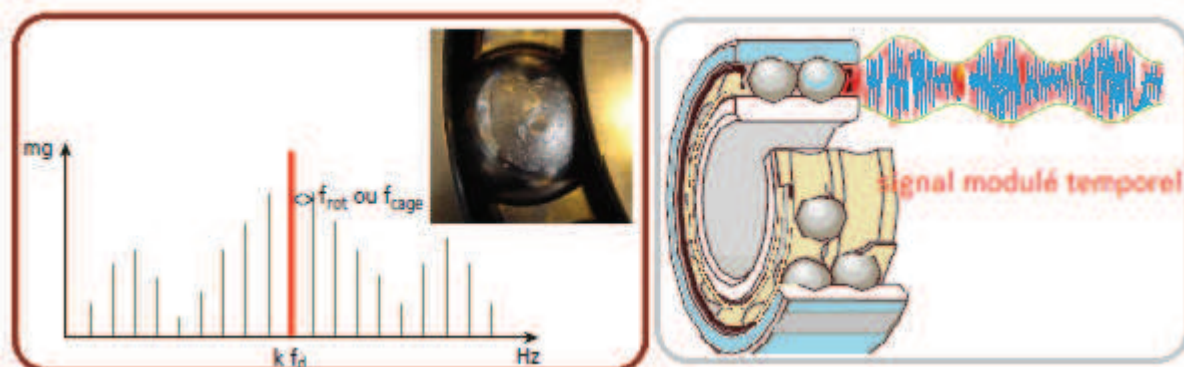


Figure N° IV-26 : Image spectrale théorique d'un défaut ponctuel affectant la bague tournante ou un élément roulant dans le cas d'une charge radiale pure. La fréquence du défaut  $f_d$  est égale à  $f_{bi}$  ou  $f_e$  et la fréquence de modulation correspond à la fréquence de rotation de l'arbre ou de la cage selon que le défaut affecte la bague tournante ou un élément roulant

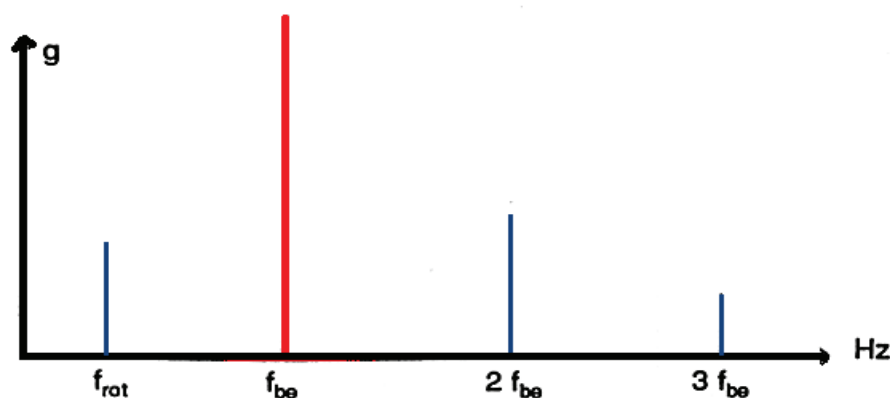
### D. Rupture de la cage

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

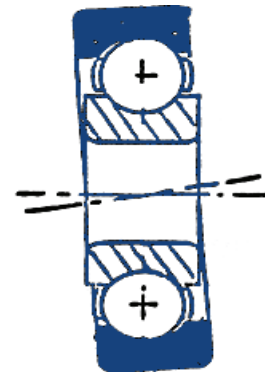
Les éléments roulants (billes ou rouleaux) n'étant plus maintenus, ils vont se regrouper et créer un fléchissement de l'arbre ou, notamment dans le cas de rouleaux, se mettre en travers, entraînant ainsi le blocage immédiat du rotor, généralement dans un spectre FFT l'image vibratoire d'un rupture de cage est égale à  $0,4 \times$  la vitesse de rotation mais.

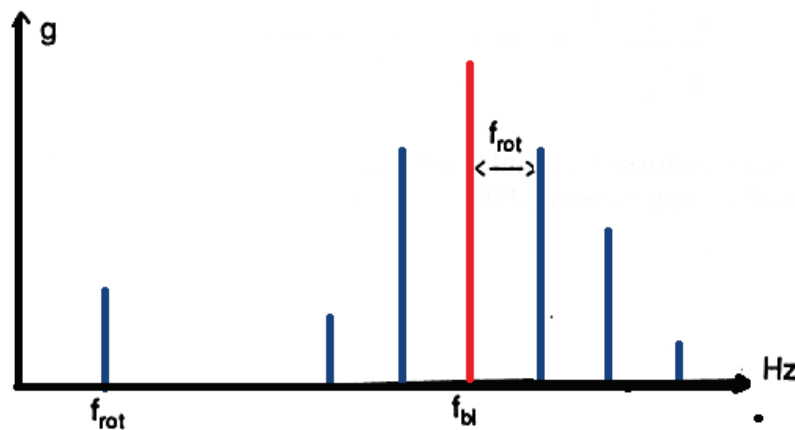
### E. Déversement de bague

Généralement le défaut de déversements des bagues des roulements est du à un défaut de désalignement d'arbre motrice qui réduisent considérablement la durée de vie d'un roulement de manière plus ou moins importante, Un déversement de bague se manifeste dans le domaine vibratoire par la présence d'une raie d'amplitude importante dont la fréquence correspond à la fréquence de défaut de la bague déversée, l'amplitude de cette composante étant largement prépondérante face à ses premiers harmoniques avant que ce défaut n'induisse, par fatigue, des écaillages. L'amplitude de cette composante dépend de l'importance du déversement, du type de roulement.

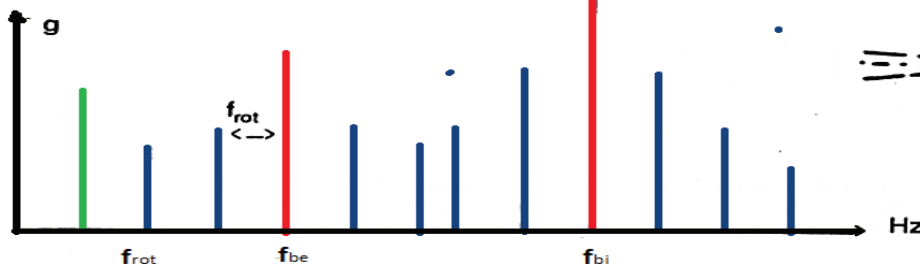
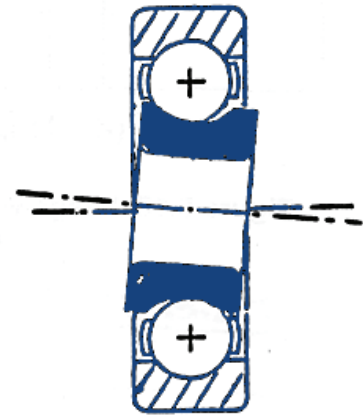


a) Déversement de bague externe.





b) Déversement de bague Interne.



c) Déversement simultané de bague interne et bague externe.

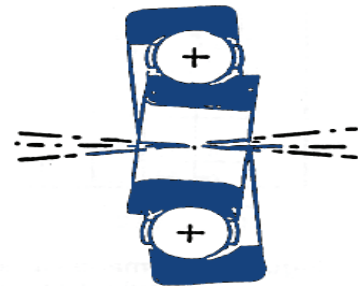


Figure N° IV-27 : Image vibratoire théorique de défauts de déversement de bagues externe et/ou interne

### F. Jeux de paliers

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

- L'excitation des résonances hautes fréquences des différents éléments constitutifs du roulement et palier par chocs. La fréquence de répétition correspond à la fréquence de rotation et à la fréquence de cage dans le cas d'un jeu interne conséquent entre éléments roulants et cage
- un peigne de raies basses et moyennes fréquences plus ou moins étendu de pas correspondant à la fréquence de rotation, dû à la troncature par la fonction de transfert de la force d'excitation sinusoïdale induite par le déséquilibre résiduel (ou non) de la ligne d'arbres
- aussi on pourra parfois observer :

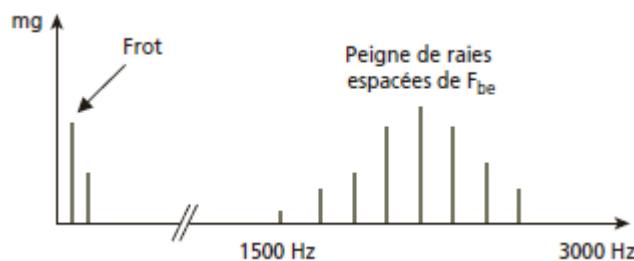


LES PRINCIPAUX DÉFAUTS

en présence d'un défaut de serrage de l'arbre dans le roulement entraînant un mouvement relatif l'arbre et la bague interne, un peigne de raies basses fréquences dont le pas correspond à un sous-harmonique de la fréquence de rotation (généralement l'ordre 1/2), dans le spectre basses fréquence

#### J. Altération due au passage de courants de fuite

L'apparition de cannelures affectant les pistes d'un roulement induite par le passage de courants de fuite se traduit par la présence d'un peigne de raies dont le pas correspond le plus souvent à la fréquence de défaut de bague externe, même si souvent les cannelures affectent à la fois les bagues externe et interne. L'amplitude du peigne de raies dans la bande fréquentielle [1 500- 5 000 Hz].



**Figure N° IV-28:** Spectre vibratoire typologique induit par une altération de bague de roulement par électroérosion

#### IV.2.9. Défaut d'Engrenages

Considérons un engrenage (figure) composé d'un pignon E1 possédant  $z_1$  dents tournant à la vitesse  $f_1$  et d'une couronne E2 possédant  $z_2$  dents et tournant à la vitesse  $f_2$ . La fréquence de rotation du pignon sera  $f_1$ , celle de la couronne sera  $f_2$ , et l'engrènement se fera au rythme d'engagement des dents selon une fréquence **feng**, appelée fréquence d'engrènement, égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre de dents. Soit :  $f_{eng} = Z_1 f_1 = Z_2 f_2$

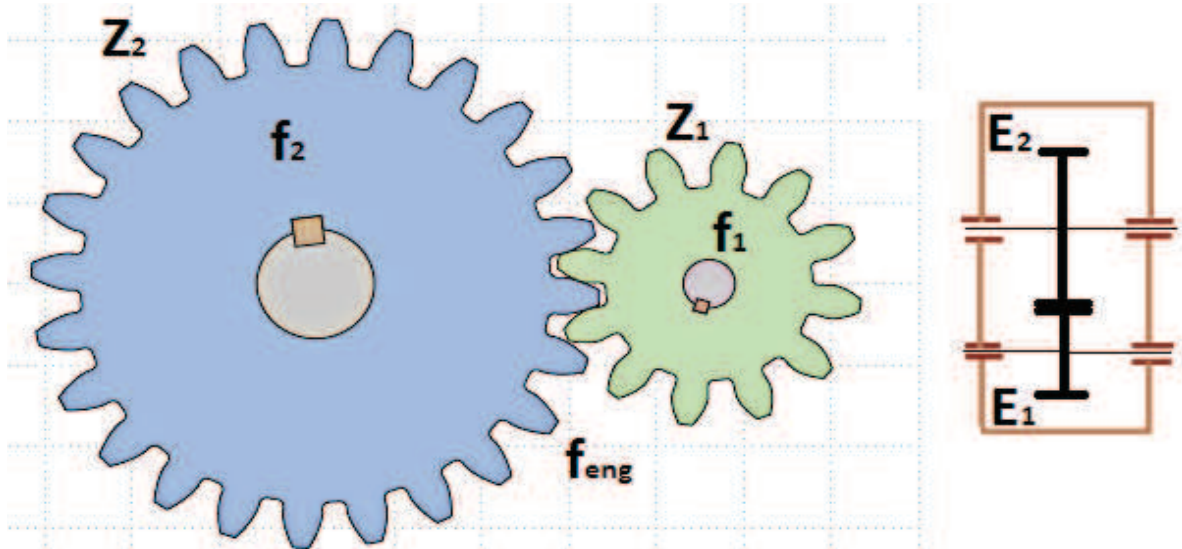


Figure N° IV-29 : Fréquence d'engrènement [Wikipédia]

L'amplitude de la vibration à la fréquence d'engrènement ne suffit pas à caractériser un Problème.

- Pour qu'un défaut soit significatif, il faut une augmentation de l'amplitude à la fréquence d'engrènement, mais aussi, la génération d'autres fréquences (harmoniques et modulation de la fréquence d'engrènement)

**Sources de vibrations des engrenages :**

- Flexion des dents due à la charge.
- Usure régulière, uniforme de la denture.
- Phénomènes locaux (dent fissurée...).

Ces vibrations affectent la fréquence d'engrènement « **Fe** » :

**Fe = Nombre de dents x Frot** et ses harmoniques

Si la denture est correcte et si aucun phénomène parasite ne vient perturber l'engrènement, le spectre vibratoire est constitué de raies dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement **f<sub>eng</sub>** et à ses harmoniques. L'amplitude de la composante fondamentale d'engrènement dépend de la portée et croit avec le couple à transmettre

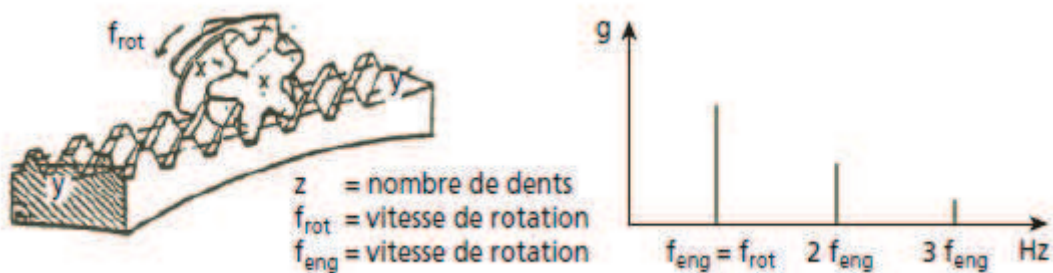


Figure N° IV-30 : typologie vibratoire d'un engrenage sain (A-M)

Les amplitudes vibratoires générées par l'engrènement d'engrenages à denture Hélicoïdale sont généralement plus faibles que celles générées par les autres Types de dentures.

**A. Signature de Détériorations d'une dent d'engrenage**

Si l'une des roues possède une dent détériorée, il se produit un choc périodique à la fréquence de rotation de la roue considérée, Le spectre montrera donc, non seulement la fréquence d'engrènement, comme précédemment, mais aussi et surtout un pic à la fréquence de rotation (par exemple  $f_1$  si le défaut est sur la roue 1) et de nombreuses harmoniques.

Les nombreuses harmoniques de la fréquence constituent ce que l'on appelle un peigne de raie, Elles sont dues au phénomène de chocs. Dès qu'un défaut se traduit par des chocs, cela se retrouve sur le spectre par un peigne de raie dont la fréquence est celle du défaut

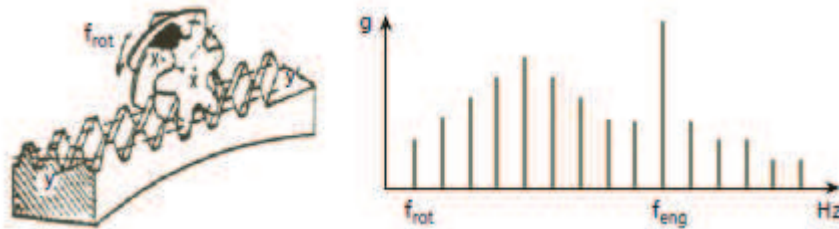


Figure N° IV-31 : typologie vibratoire d'un engrenage présentant d'une dent détériorée (A-M)

**B. Signature de Détériorations d'un ensemble des dents d'engrenage**

Lorsque l'ensemble de la denture est usé ou détérioré, les chocs se produisent à l'engrènement de chaque dent. Le spectre est constitué d'un peigne de raies de faible étendue spectrale (choc « mou ») dont le pas correspond à la fréquence d'engrènement, mais cette fois avec une amplitude beaucoup plus élevée L'évolution de l'amplitude correspondant à cette fréquence est beaucoup plus significative de la dégradation que la seule présence (normale) de cette fréquence dans le spectre.

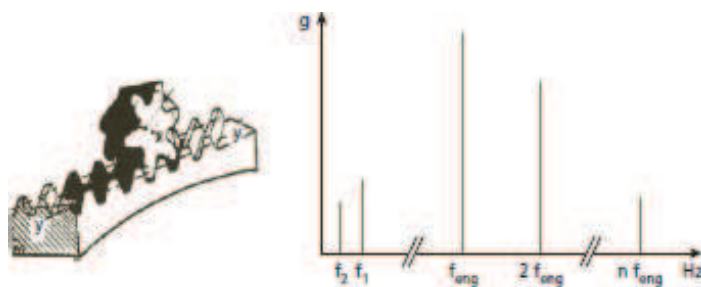
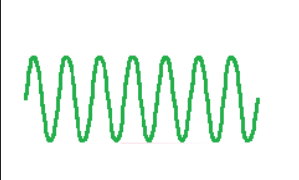
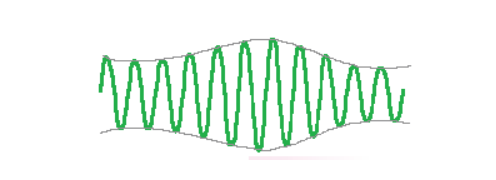
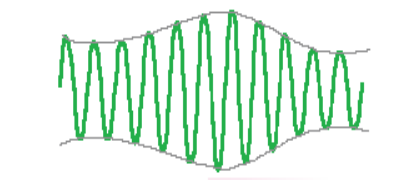


Figure N° IV-32 : typologie vibratoire d'un engrenage présentant un ensemble des dents détériorées(A-M)

**C. Signature d'un défaut d'excentricité d'engrenage**

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation due à la modulation de l'effort d'engrènement.

		
Signal d'un engrenage sain	Signal d'un engrenage traduisant une modulation en amplitude.	Augmentation de la modulation d'amplitude qui traduit une évolution du défaut d'excentricité.

L'image vibratoire théorique de ce type de défaut présente autour de la fréquence d'engrènement ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le « pas » correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut.

C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Les amplitudes des bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence d'engrènement.

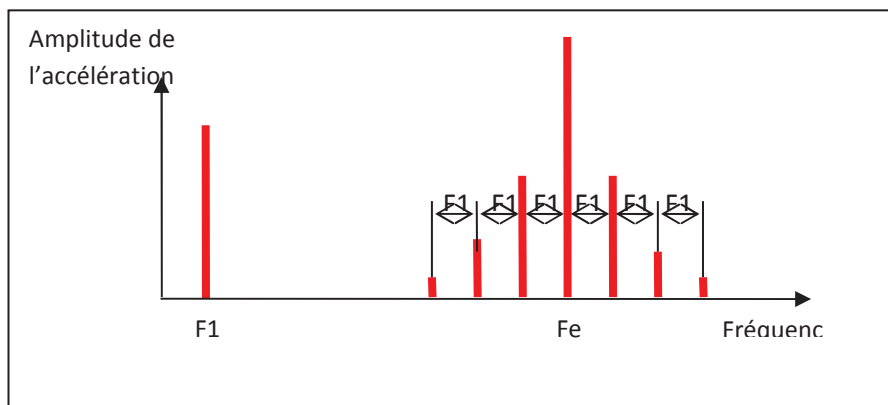


Figure No IV-33 Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut

**IV. 3. Signatures vibratoires des Défauts électriques et électromagnétiques**

Pour bien des machines électriques comme les alternateurs ou les moteurs synchrones, les fréquences significatives d'une anomalie électromagnétique, multiples de la fréquence du courant d'alimentation, sont confondues avec la fréquence de rotation de la machine ou de ses harmoniques.

Pour ces machines, le moyen le plus simple d'identifier une anomalie électromagnétique est de couper brutalement le courant d'alimentation (lorsque

Cela est possible) : si l'amplitude vibratoire chute brutalement pour les harmoniques de la fréquence du courant, c'est qu'il s'agit bien d'un défaut électromagnétique

#### IV. 3.1 Défaits électromagnétiques sur moteurs asynchrones

Dans un moteur asynchrone, la fréquence de rotation dépend :

- Du nombre de paires  $p$  des pôles,
- De la fréquence du courant d'alimentation  $f_{\text{crt}}$  ou  $f_A$ ,
- Du glissement  $g$ , lui-même fonction de la charge.
- De la fréquence de champ tournantes  $f_s$
- De la fréquence d'encoches principale  $f_{\text{enc}}$

Ce sont la recherche et l'étude de la fréquence de ce glissement qui permettent

Le diagnostic des défauts électromagnétiques affectant les moteurs asynchrones.

Ces défauts sont de deux types :

- Les défauts dus à des anomalies électromagnétiques sur stator ;
- Les défauts dus à des anomalies sur rotor

##### IV. 3.1.1 Défaits électromagnétiques sur stator (défaits stationnaires)

Ces défauts stationnaires (statoriques) ont deux origines :

- **La variation d'entrefer** (figure), elle-même provoquée par une déformation ou l'ovalisation du corps du stator...
- **La variation de courant**, elle-même provoquée par un défaut d'enroulement au niveau du stator, un déséquilibre de phase, des spires ou tôles statoriques de mauvaise qualité, en court-circuit ou desserrées, ou encore un défaut d'isolement...

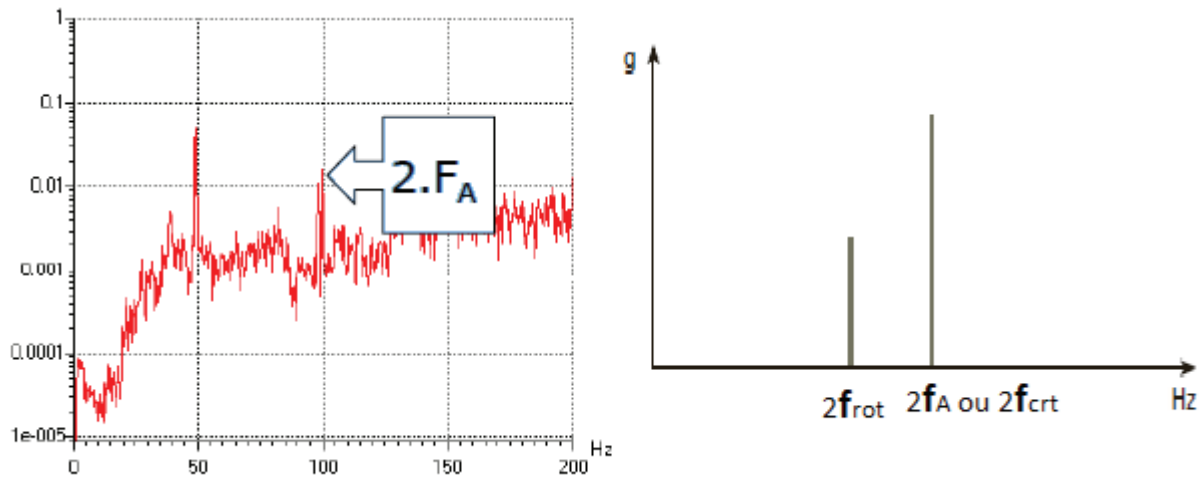
Ces défauts peuvent être observés de manières différentes :

##### A. Observation Basses fréquences :

Autour de deux fois la fréquence du courant d'alimentation, aussi Les images vibratoires théoriques des défauts de type « variation de courant » et « Variation d'entrefer » sont identiques avec la prépondérance d'une **raie dont la fréquence correspond à l'ordre 2 de la fréquence du courant d'alimentation** égale à 100 Hz pour un courant d'alimentation à 50 Hz

Cependant, dans le cas d'un défaut **d'enroulement statorique**, l'amplitude de la raie à 100 Hz est peu dépendante de la charge, alors que dans le cas **d'une**

**variation d'entrefer** due à une déformation du stator, l'amplitude de la raie dépendra fortement de cette charge, pour mieux juger en est bousions d'un analyse zoom pour certains cases.



*Figure N° IV-34 : Image vibratoire théorique d'un défaut dû à une anomalie électromagnétique affectant le stator ( $f_{crt}$  : fréquence principale du courant d'alimentation) [formation str].*

### B. Observations aux moyennes fréquences

Les phénomènes vibratoires aux moyennes fréquences revient à les étudier autour de la fréquence de passage des encoches (figure ), plus simplement appelée fréquence d'encoches et égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre d'encoches du rotor, Dans le cas d'une variation d'entrefer, à la raie dont la fréquence correspond à la fréquence d'encoches est associée une famille de bandes latérales dont le **pas correspond à deux fois la fréquence du courant d'alimentation**, mais avec des valeurs d'amplitude nettement dissymétriques de part et d'autre de la fréquence d'encoches.

Cette technique de dépistage autour de la fréquence d'encoches peut être utilisée non seulement sur les moteurs asynchrones mais aussi sur les **moteurs synchrones**, puisqu'elle ne se sert pas du glissement comme moyen d'observation



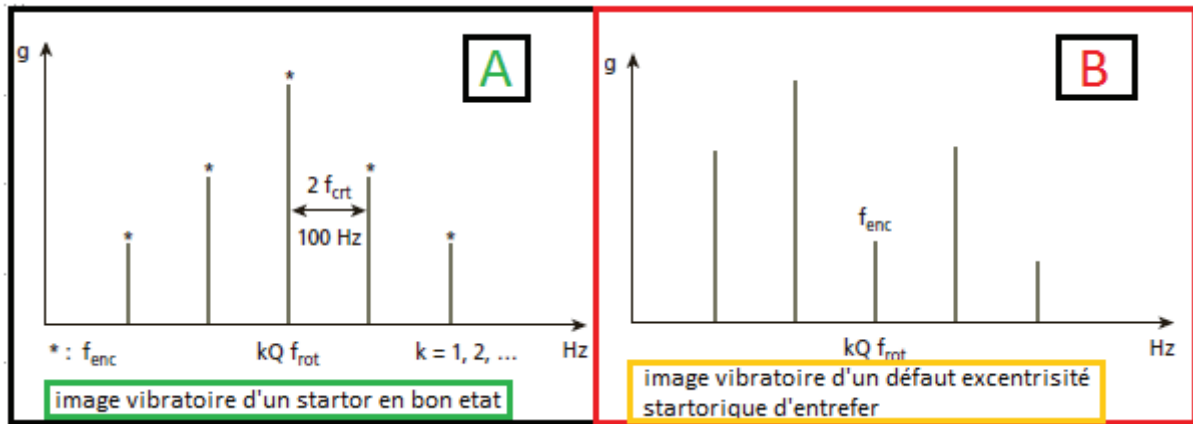


Figure N° IV-35 : Les Images vibratoires théorique qui montrent l'évolutions d'une excentricité statique d'entre-fer. La nette dissymétrie des niveaux d'amplitude des bandes latérales de modulation de pas 100 Hz réparties autour de la fréquence d'encoches, indique une anomalie électromagnétique sur le stator, ( $Q$  = nombre d'encoches).

IV. 3.1.1 Défauts électromagnétiques rotoriques (défauts tournants)

Comme pour les défauts sur stator, ils ont deux origines :

- **L'excentricité du rotor** d'entrefer, provoquée par un désalignement, Une déformation du rotor ou un jeu de paliers important
  - L'excentricité statique (Figure a) : le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.
  - L'excentricité dynamique (Figure b) : le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe (est le plus important).
  - L'excentricité mixte : associant les deux cas précédemment cités

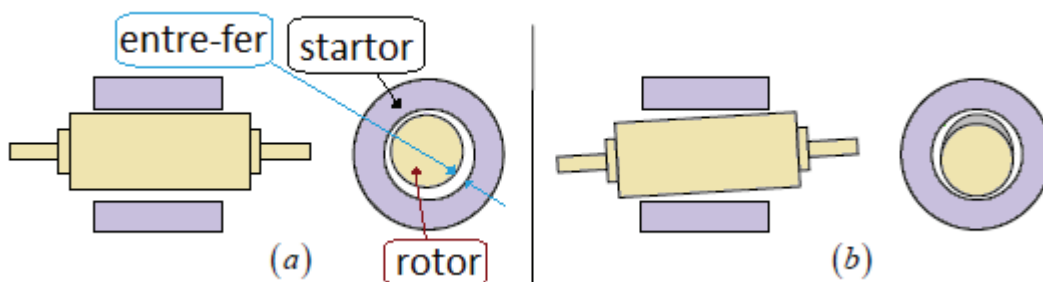


Figure N° IV-36 : Modélisation schématique de l'excentricité a) statique et b) dynamique

- **La variation de courant**, provoquée par des barres rotoriques cassées ou fissurées, par une anomalie de résistivité au niveau des liaisons barres anneau, par des tôles ou des spires rotoriques en mauvais état ou en court-circuit.

Ces défauts peuvent être décelés autour de la fréquence de rotation et, à l’instar des défauts statoriques, autour de la fréquence d’encoches ou de ses harmoniques

**A. Observations autour de la fréquence de rotation**

Le balourd résiduel du rotor (il en reste toujours un) tourne à la fréquence de rotation du rotor (frot). Toute anomalie rotorique (par exemple, barres cassées ou fissurées, mauvaise qualité de la mise en spires, défaut de liaison barres-anneaux) ou toute variation dynamique d’entrefer va induire une modulation de l’amplitude et/ou de la fréquence de rotation et de ses harmoniques. L’image vibratoire d’un tel défaut se traduit par l’apparition de bandes latérales autour des premiers harmoniques, dont le **pas correspond** à la fréquence

De glissement fg, multipliée par deux fois le nombre p de paires de pôles, soit 2 pfg, que l’on déduit de la relation suivante :  $fg = (f_{crt}/p - f_{rot})$

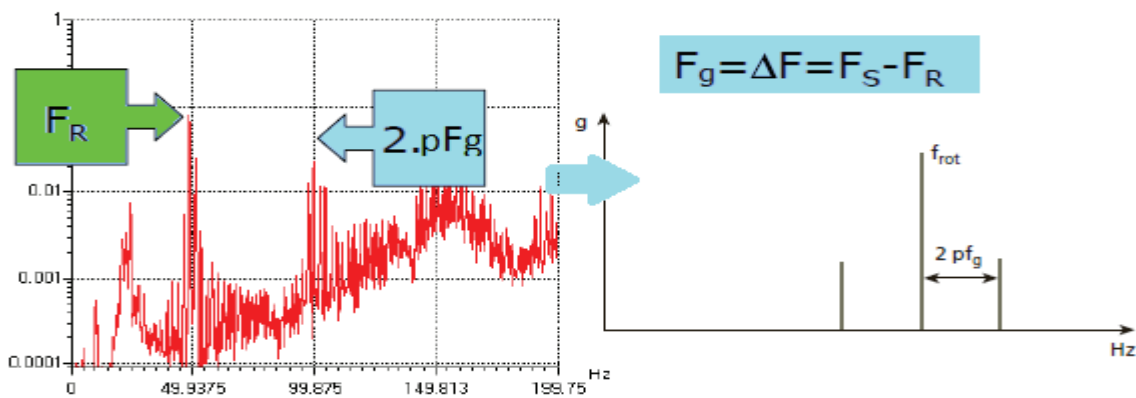


Figure N° IV-37: Image vibratoire théorique d’un défaut rotorique modulant la fréquence de rotation. (fg = fréquence de glissement) [formation str].

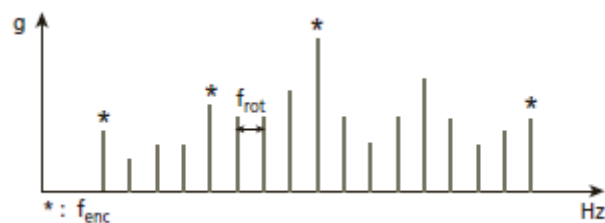
**B. Observations autour de la fréquence d’encoches**

**1 / Défaut de type excentricité dynamique d’entrefer**

L’image vibratoire est caractérisée par de nombreuses bandes latérales situées de part et d’autre de la fréquence d’encoches ou de ses harmoniques, dont le **pas correspond à la fréquence de rotation** de l’arbre

Figure N° IV-0 : Image vibratoire théorique d’une variation d’entrefer.

[A-M]



Cette technique de dépistage d’une excentricité dynamique d’entrefer autour de la fréquence d’encoches peut être utilisée non seulement sur les moteurs

asynchrones, mais aussi sur les moteurs synchrones, puisqu'elle ne se sert pas du glissement comme moyen d'observation.

## 2 / Défaut de type barres cassées ou fissurées

Ce cas, plus difficile à diagnostiquer, se caractérise par l'évolution ou l'amplitude anormale de bandes latérales autour de la fréquence d'encoches ou de ses harmoniques, dont le **pas correspond à 2 p fois la fréquence de glissement, soit 2 pfg**. Le dépistage de ce défaut nécessite souvent un zoom puissant capable de faire ressortir la fréquence de glissement, qui peut être très faible en cas de moteur peu chargé.

### IV. 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu de manière plus détaillée les symptômes vibratoires et leurs causes associés à chaque défaut susceptible affectants les systèmes électromécaniques ou les équipements industrielles qui provoquent les vibrations et leurs influences sur le comportement et le fonctionnement de la machine, aussi qui nous a permet de faire un diagnostic au stade précoce son arrêt de processus suivant la surveillance des niveau d'alarme ou de danger associée à chaque image vibratoire d'un ou plusieurs défauts qui nous facilite la planification d'interventions, préparée le stock nécessaire des pièces à changer Et maîtrisé les situations s'il demande des personnelles spécialisées dans certaine forme d'actions, et qui en doit démontrée expérimentalement dans le prochain chapitre.



# CHAPITRE V

## APPLICATION EXPÉRIMENTALE

## IV.1 Introduction

Jusqu'ici nous avons traité en détail la vibration et le diagnostic des défauts et leurs causes et leurs caractéristiques générales de façon théorique, alors que la prochaine étape sera donc une étude expérimentale pour mettre en place une stratégie de maintenance préventive conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire qui nous a permis de réaliser des diagnostics au stade précoce des installations d'un système de pompage de circulation d'huile chaude SECR « **58-MJ01-A** » installée à l'unité **GL1K\MEGA TRAIN\UNITE 58**, niveau de l'entreprise de liquéfaction de gaz naturel **GL1K SONATRACH SKIKDA**.

Ce travail a été réalisé au niveau du service planing et méthodes exactement section MAINTENANCE PRÉDICTIVE qui est chargée à la mission de planifier les interventions de maintenance suivant des applications des stratégies de maintenance et plan de courts termes aussi de long termes. Basée sur les différentes techniques de surveillance de la maintenance conditionnelle et prédictive de façon permanente en ligne pour les grandes installations ou périodiques pour les petites et moyennes installations.

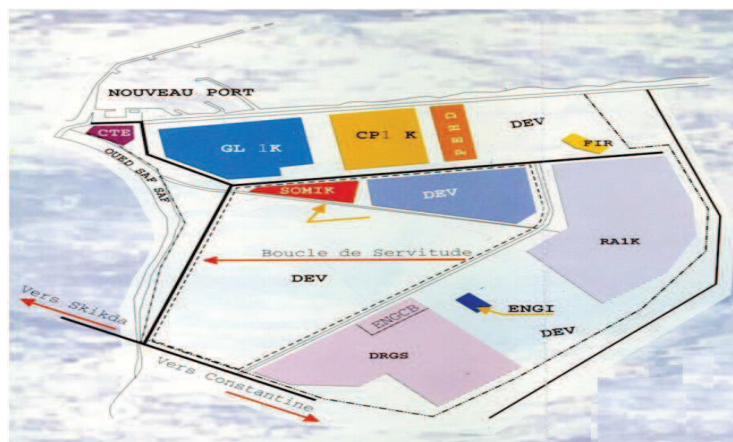
## IV.2. Présentation de l'entreprise GL1K de SKIKDA

Le complexe GNL de SKIKDA a pour un objectif stratégique de valorisation des ressources en gaz naturel. Principalement du gisement de HASSI R'MEL, cette usine et parmi des usines de GNL ont été implantées dans le nord du pays, dont le but principal est l'exportation du GNL vers l'Europe et les USA par Méthaniers.

Le Complexe **GL1/K** de Skikda a été construit par la Société mixte Algérienne du Gaz (**SOMALGAZ**), construit par 51% des parts appartenant à Sonatrach et 49% à **ERAP** (Entreprise Française du Raffinage des Pétroles), dont le chantier a débuté en mars 1969 et la production en Novembre 1972. Situé entre l'embouchure de l'oued Saf-Saf et le Village Larbi Ben M'Hidi, il s'étend sur une superficie de 92 hectares, et reçoit par des pipes du Gaz Naturel du gisement de HASSI R'MEL. Sa capacité annuelle de production est de 4.5 millions tonnes/an de GNL et une capacité de stockage de 308 600 m<sup>3</sup>. Il emploie 1200 travailleurs permanents.

### IV.2.1. Mission de l'entreprise GL K de SKIKDA

Le **GLIK** destiné pour mission, de transformer le gaz naturel de l'état gazeux à l'état liquide, « Gaz naturel liquéfié », ou GNL, Lorsque le gaz Naturel est refroidi à une température d'environ  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  à la pression atmosphérique, il se transforme en un liquide clair, transparent et inodore, il est aussi non corrosif et non toxique. Le procédé de liquéfaction exige de retirer auparavant le dioxyde de carbone, les composés sulfurés (sulfure d'hydrogène, sulfure de carbone) et l'eau contenus dans le gaz naturel, le transformant ainsi en un mélange composé principalement de méthane et contenant de petites quantités d'autres hydrocarbures ainsi que de l'hélium et de l'azote.



*Figure N° V-01 : Situation géographique du complexe GLIK de SKIKDA (GLIK DOC)*

### IV.2.2. Description du nouveau GNL2K

Le nouveau train de GNL (MEGA-TRAIN) est situé à l'intérieur de l'enceinte du Complexe, au nord-ouest du GNL1K (train de liquéfaction actuel), le nouveau train vient pour réaliser la production en GNL qui permet de satisfaire toute la demande des clients, qui ne cesse d'augmenter d'une année à une autre, notamment avec l'arrêt des unités U20, U30 et U40, Le nouveau train de GNL a été conçu pour une capacité de production de 4,5 Millions de tonnes de GNL par an. [(GL1K, 18)]

### IV.2.3. Organisation du complexe

L'organisation du complexe GL1K est représentée dans l'organigramme suivant :

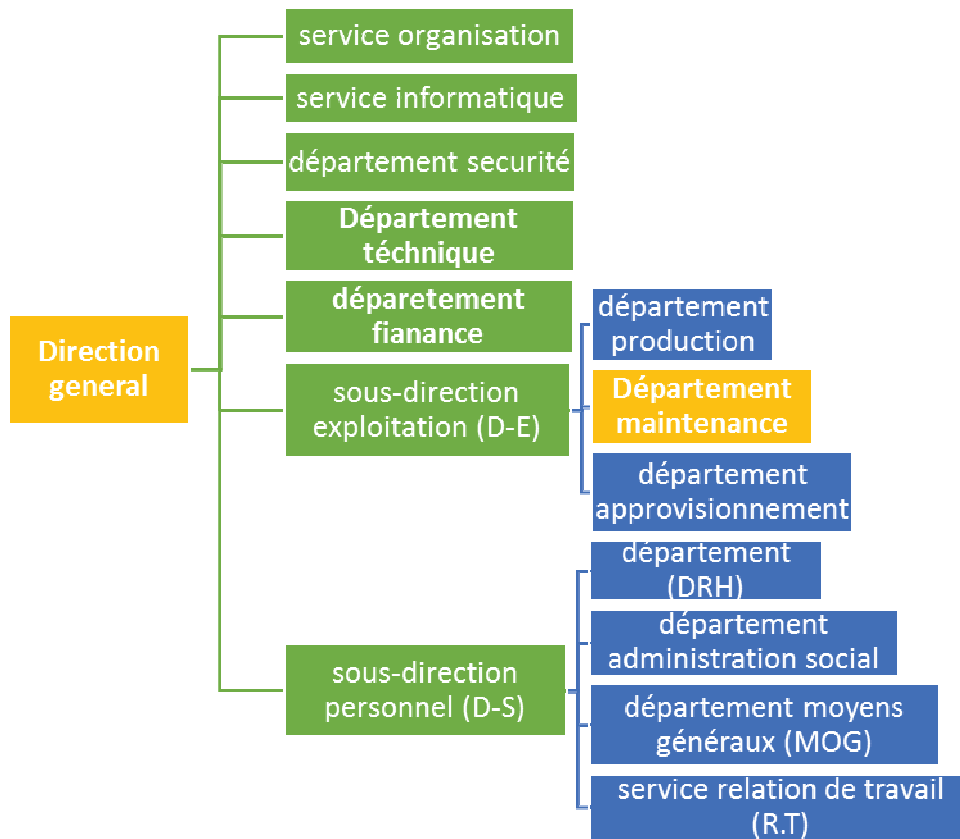


Figure N° V-02 : organisation de l'entreprise GLIK SKIKDA (GLIK DOC)

IV.2.3. Organigramme de département maintenance

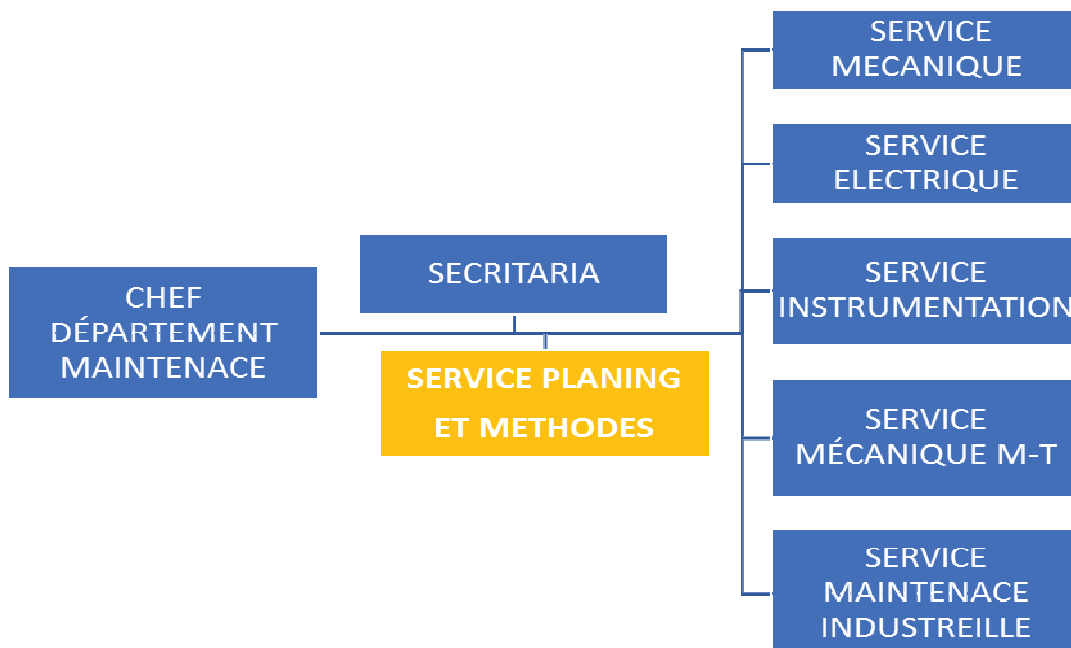
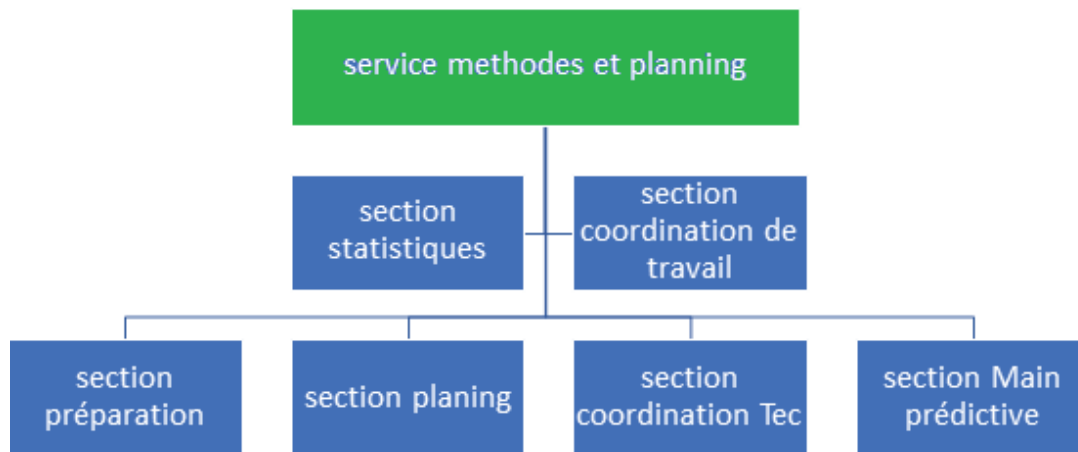


Figure N° V-03 : l'organigramme de departement maintenance (GLIK DOC)

## IV.2.4. L'organigramme de section planning et méthodes



**Figure N° V-04 :** l'organigramme de la service planning et méthodes (GLIK DOC)

Notre travail est consacré pour la mise en œuvre d'un plan de surveillance et diagnostic basée sur une stratégie de surveillance vibratoire pour l'unité MB58 exactement l'installation de pompage qui assure le Chauffage d'huile pour les échangeurs du fractionnement et pour le réchauffeur du GN, cette installation qui constituer deux installations des pompe **58M-J1** et **58M-J1A** centrifuge WIR-GABIONNITA en parallèle leur cadence de travail **24/24** redondances mois par mois. [(GL1K, 2018)]

## IV.3. Plan de de maintenance basé sur la surveillance vibratoire

## IV.3.1. Premier Partie : Mettre en place

## IV.3.1.1. Descriptions de l'installation choisie

Le system choisie est « Stockage et chauffage d'huile pour les échangeurs »

Ce système a pour but de stocker, chauffer et fournir l'huile chaude nécessaire pour le réchauffage des rebouilleurs et des réchauffeurs de l'ensemble du train.

Ce système est composé de 3 unités :

- **Unité 08** : pour le stockage d'huile et la compensation des pertes par appoint aux unités 18 et 58.
- **Unité 18** : assure le chauffage d'huile des échangeurs du traitement du gaz et pour le réchauffeur de fuel gaz.

- **Unité 58** : assure le Chauffage d'huile pour les échangeurs du fractionnement et pour le réchauffeur du GN

IV.3.1.2. L'installation visée pour l'étude de surveillance Vibratoire

La system d'huiles chaude de l'unité GL1K\MEGA TRAIN\UNITE 58 est destinée à alimenter les circuits par l'huile **SECR** chaude par l'intermédiaire d'un system de pompage constitue des pompes centrifuges **WEIR-GABBIONITA** à l'aide des moteur asynchrones de puissances 520 KW.

F

APPLICATION EXPÉRIMENTALE

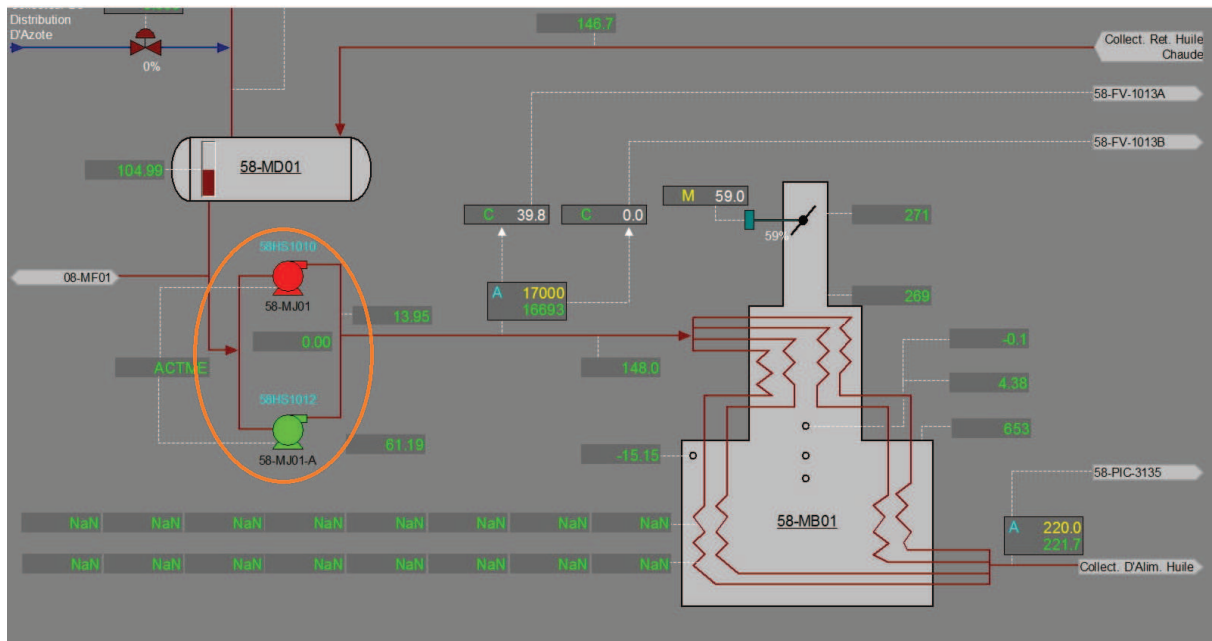
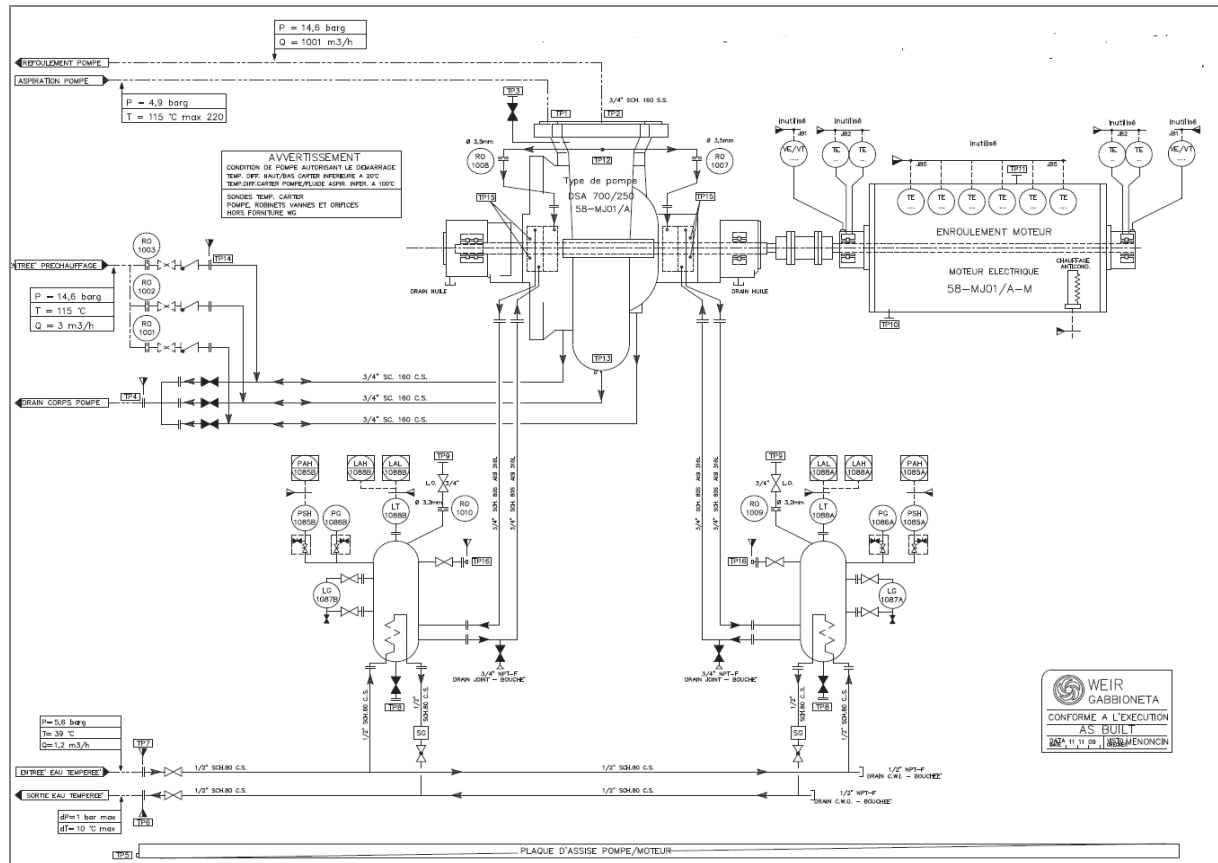


FIGURE N° V-05 ; schéma du system de pompage d'huile chaude (GL1K DOC)

IV.4. Caractéristiques techniques de l'installation 58-MJ01-A

EMPLACEMENT	SONATRACH\GL1K\MEGA TRAIN\UNITE 58\
ÉQUIPEMENT	58-MJ01-A
DATE DE MISE EN MARCHÉ	18/05/2014
HEURS DE MRCHE	21696 H AU 01/05/2019

IV.4.1. Schéma général de circuit de procédés



APPLICATION EXPERIMENTALE

Figure N° V-06 : schéma de circuit pour la pompe 58-MJ01-A [WIER-G]

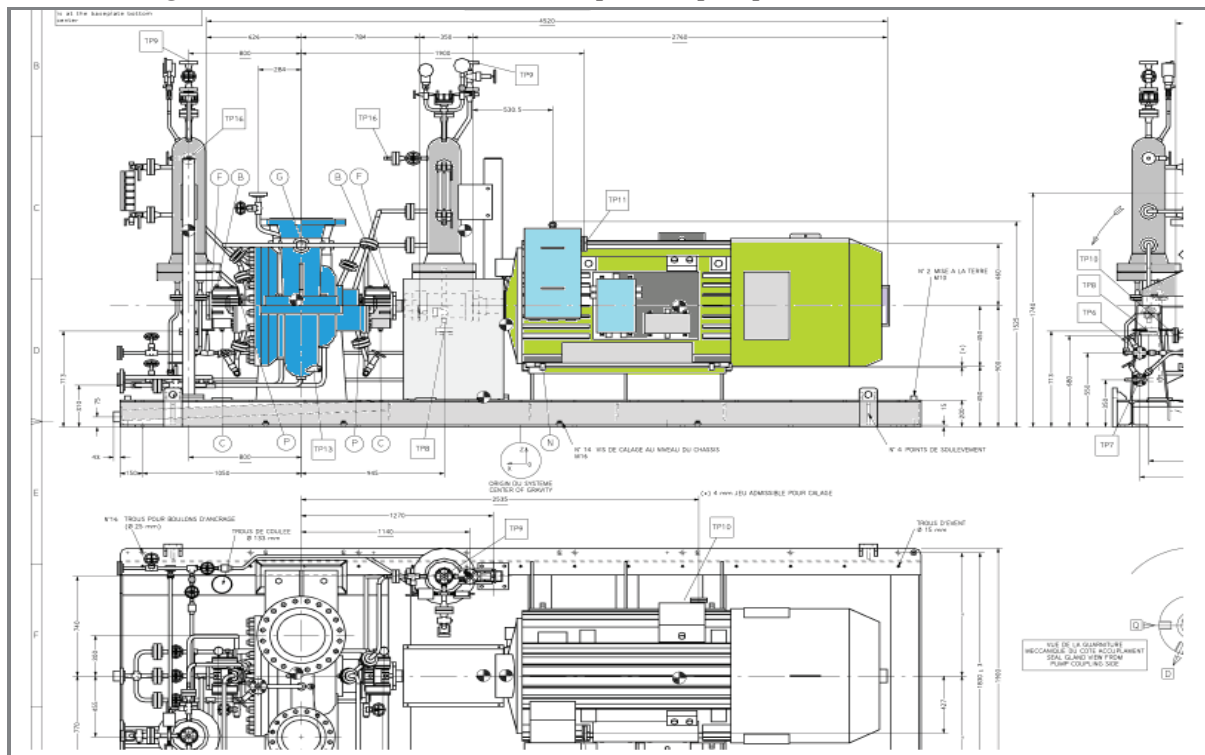


Figure N° V-07 : schéma de plan d'ensemble de la pompe 58-MJ01-A [WIER-G]

IV.4.2. Caractéristique de l'installation du pompage d'huile chaude

**POMPE CENTRIFUGE DE TYPE:** WEIR GABBIONETA DSA 700/250

**Description :** Les pompes DSA de WEIR GABBIONETA SRL sont des pompes horizontales du type à caisse à division radiale avec roue à double aspiration, réalisées pour les utilisations de faire circuler l'huiles chaude.

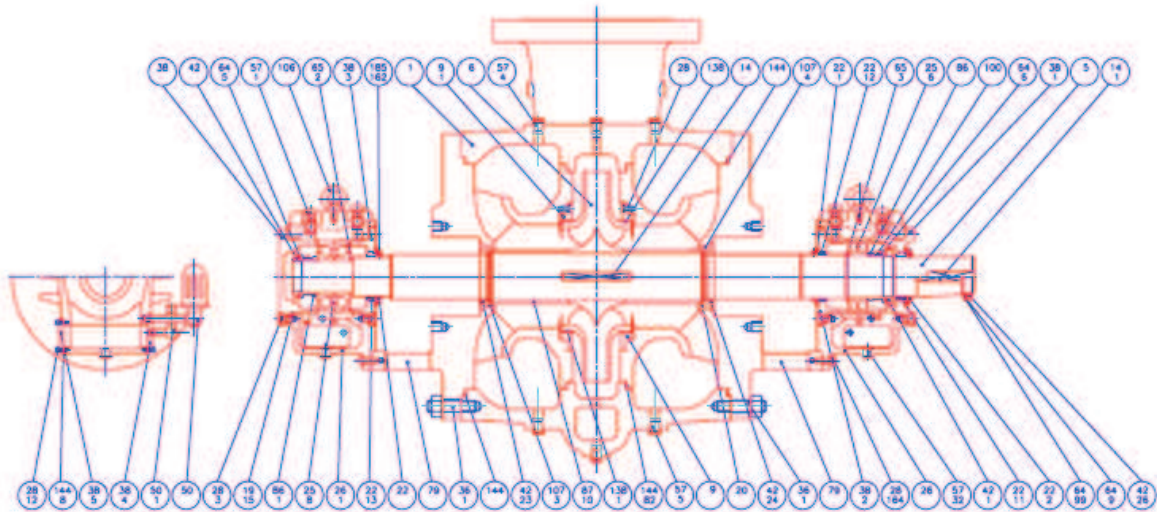


Figure N° V-08 : schéma de la pompe WEIR GABBIONETA DSA 700/250 [WIER-G]

**Corps de pompe :** Les bouches d'aspiration et de refoulement, fondues en une seule pièce Avec le corps de pompe, sont normalement tournées vers le haut (« top-top »).

**Roue :** La roue des pompes DSA est de type fermé, à double aspiration pour permettre L'équilibrage des poussées axiales.

<b>Capacité normal</b>	<b>870 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>Pression différentielle</b>	<b>9,4 bars</b>
<b>TYPE DE PALIERS</b>		<b>ROULEMENTS :</b> <b>PLAIER LIEU 03 :7314 BECB/J [SKF]</b> Fréquence <b>fb</b> ou <b>B<sub>1</sub>= 101,95</b> Fréquence <b>fc</b> ou <b>C<sub>1</sub>= 09,95</b> Fréquence <b>fbi</b> ou <b>I<sub>1</sub>= 175,83</b> Fréquence <b>fbe</b> ou <b>E<sub>1</sub>= 121,51</b>  <b>PLAIER LIEU 04 :C 2218 C3 [SKF]</b> Fréquence <b>fb</b> ou <b>B<sub>1</sub>=</b> Fréquence <b>fc</b> ou <b>C<sub>1</sub>=</b>	

APPLICATION EXPÉRIMENTALE

F



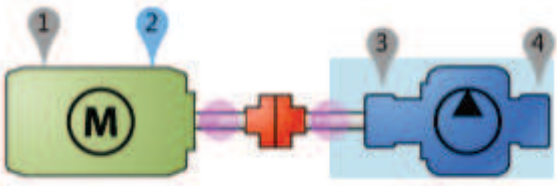
Nombre de pôle	4 pole	POIDS STATOR	2100 KG
FONDATION	RIGIDE	BRUIT	82 DBL
<b>TYPE DE PALIERS MOTEUR</b>			
PLAIER LIEU 01 ROULEMENTS : N <sub>0</sub> 224 MC <sub>3</sub> [SKF]	FRÉQUENCE CARACTÉRISTIQUE Fréquence fb ou B <sub>1</sub> = 169,63 HZ Fréquence fc ou C <sub>1</sub> = 10,66 HZ Fréquence fbi ou I <sub>1</sub> = 226,91 HZ Fréquence fbe ou E <sub>1</sub> = 169,87 HZ		
PLAIER LIEU 02 ROULEMENTS : 6224 [SKF]	FRÉQUENCE CARACTÉRISTIQUE Fréquence fb ou B <sub>1</sub> = Fréquence fc ou C <sub>1</sub> = 10,16 HZ Fréquence fbi ou I <sub>1</sub> = 131,68HZ Fréquence fbe ou E <sub>1</sub> = 91,51 HZ		
<b>ACCOUPEMENT</b>			
Type d'accouplement	TSKS 0500 Accouplement avec entretoise METASTREAM		
protege ACC ANTI-ETNIC ALUMINIUM	OUI		
DIAMÈTRE ACCOUPLEMENT POMPE CONIQUE	Ø85		
Diamètre accouplement moteur cylindrique	Ø110M6/m6		
Rainure de clavette	22x14		



APPLICATION EXPÉRIMENTALE

IV.4. 3. Vérification de de la Faisabilités technique de surveillance vibratoire

Emplacement des pointes moteur	Deux points Sur les paliers moteur		
Emplacement des points pompe	Deux points sur les paliers pompe		
Direction de mesures	Horizontal -vertical -axial		
Accès au mesures	Faussable		
Périodicité (j) de mesures	État Normale 30 (j) état sup 15~10(j)		
Vitesse de rotation	1488 rpm	Normes choisie	ISO 10816
Puissance moteur	520 KW	Groupe machine	Classe III
Fondation	Rigide	Niveau d'alarme	7,1
Fréquence f <sub>0</sub>	24,89	Niveau de danger	

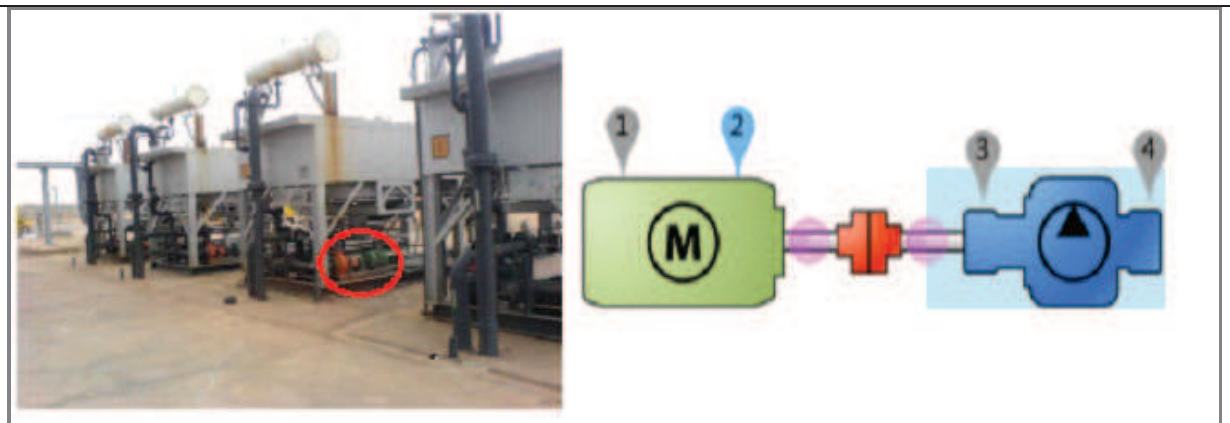
Cadence de travail	24/24 en redondance mois par mois 58-MJ01
	
<p><i>Figure N° V-10 : schéma emplacement des points de mesures [NESTSOFT]</i></p>	

#### IV.4. 4. Type de stratégie de surveillance vibratoire

Suivant des bousions critique de l'installation du 58-MJ01-A le type de surveillance choisie est :

1. La surveillance des niveau globale NG  $V_{eff}$  suivant la norme ISO 10816
2. Un diagnostic est effectué si la gravité du niveau globale atteint une des valeurs Jéjé pour avoir vérifiée la nature de défauts et planifier l'intervention corrective.

#### IV.4.5. Deuxième partie : la surveillance



*Figure N° V-11 : le system d'huile chaude SECR de l'unité 58-MJ01-A*

##### IV.4.5.1. Acquisitions des données

A. Le collecteur de données : Le collecteur de données **ONEPROD FALCON** est un analyseur portable permet à tout utilisateur d'assurer un suivi périodique de ses machines tournantes grâce à leurs signatures vibratoires. FALCON offre la

solution la plus efficace à chaque étape de la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle dans votre usine. Les défauts des machines tournantes peuvent ainsi être détectés plusieurs mois à l'avance et les opérations de maintenance planifiées, ce qui évite les arrêts imprévus et pertes de production associées, aussi il est spécifié pour plusieurs tâches et caractéristique

Sont les suivants :

- Grand écran tactile couleur avec contraste élevé
- Capteurs intégrés : pyromètre, stroboscope, appareil photo
- Collecte de données vibratoire sans fil
- Communication sans fil avec le système d'information
- Analyse modale (FRF) : déterminer si la structure a une influence sur la vibration de la machine, à l'aide d'un test d'impact.
- Déformée opérationnelle (Operating Deflection Shape ou ODS) : comprendre le comportement de la machine en fonctionnement, en visualisant sa déformation à certaines fréquences
- Analyse croisée : apporter un complément d'information utile lorsque le diagnostic est incertain après l'analyse de mesures standard.
- Stockage intégré de plus de 600 tests (sur la base de tests à 4 voies avec 800 lignes de résolution et 100 positionnements).



*Figure N° V-12 : le system d'acquisitions des données de mesures vibratoire [FALCON].*

**Caractéristique technique**

Écran Tactile      **Résolution** : 800 x 480 pixels

**Acquisition**

4 voies synchrones + top de tour      Conversion 24 bits      Dynamique > 100dB

**Fréquence d'échantillonnage :**

- 102,4 kHz pour chaque voie
- Jusqu'à 204,8 sur 2 voies

**Filtre anti-repliement :**

Acquisition sans fil avec accéléromètre triaxial FALCON WLS

**Processeurs de signal numériques**

Traitement en temps réel :

- 40 kHz sur 4 voies
- Jusqu'à 80kHz sur 2 voies

Mémoire : 3,5 Go pour le stockage des mesures

**B. Capteur de mesures**

Le capteur choisi pour mesures est l'Accéléromètre IEPE ou AC



*Figure N° V-13 : capteur accéléromètre et kit de collecte de données [FALCON].*

**Caractéristique technique d'accéléromètre**

- Paramètres mesurés : force, accélération, vitesse ou déplacement
- Unités : impériales ou métriques
- Tension de surcharge réglable
- Type de test : Impact ou ODS – analyse croisée
- Nombre maximal de positionnements par test : 200 dans 3 directions
- Filtre passe-haut : aucun, 2 Hz, 10 Hz

- Fréquence maximale : 50, 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k, 10k, 20 k, 40 kHz
- Résolution : 100, 200, 400, 800, 1 600, 3 200, 6 400 et 12 800 lignes
- Fenêtre de pondération : choc, Hanning, rectangulaire
- Déclenchement du test d'impact
- Nombre de moyennes : jusqu'à 4 096
- Chevauchement : 0, 50 ou 75 %
- Fonction de rejet pour le test d'impact

### C. Logicielle de traitements des données

NEST I4.0 est un outil puissant et productif pour gérer la maintenance prédictive. Il peut être utilisé même sans connaissance spécifique en vibrations car il comprend un module de configuration automatique basée sur la description cinématique de la machine, de plus, la méthode d'analyse ACCUREX de FALCON offre la possibilité d'avoir un diagnostic automatique, Pour le spécialiste en vibrations, c'est un moyen d'économiser beaucoup de temps car il peut se concentrer sur les machines qui doivent vraiment être regardées en détail.

#### IV.4.6. L'étude de l'installation pompage d'huile chaude 58-MJ01-A

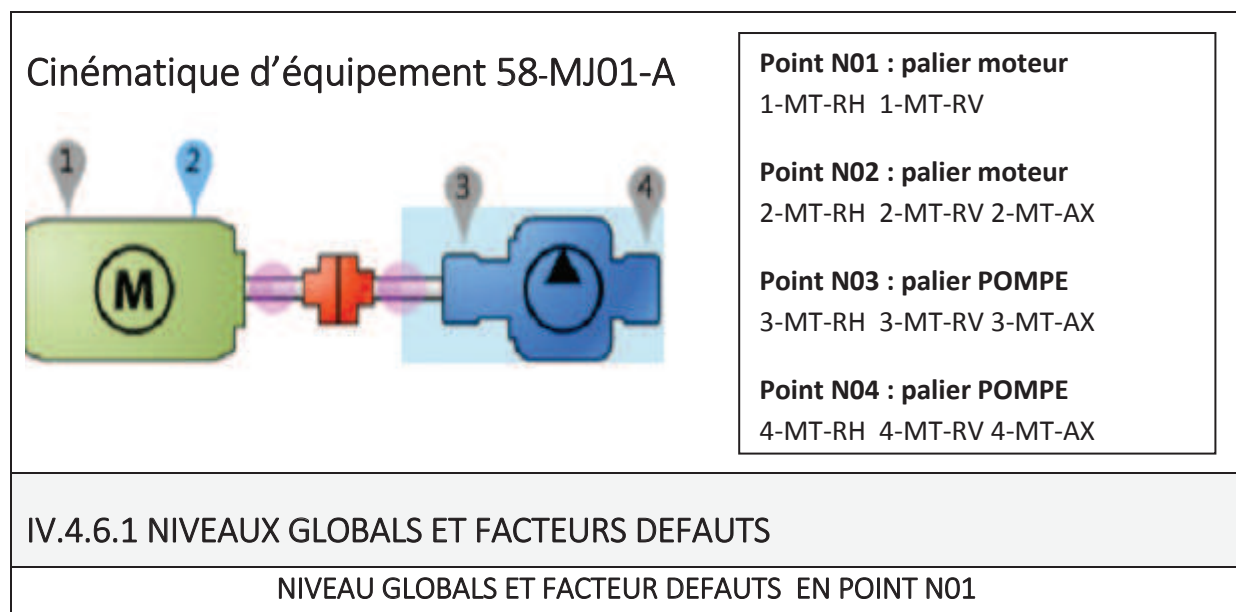
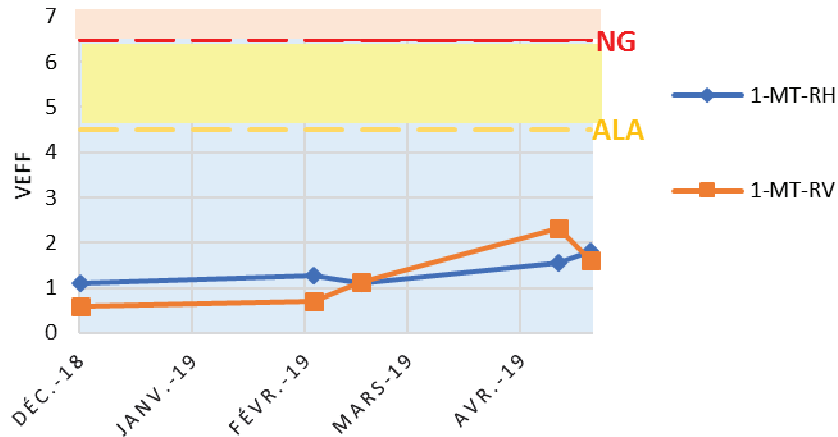
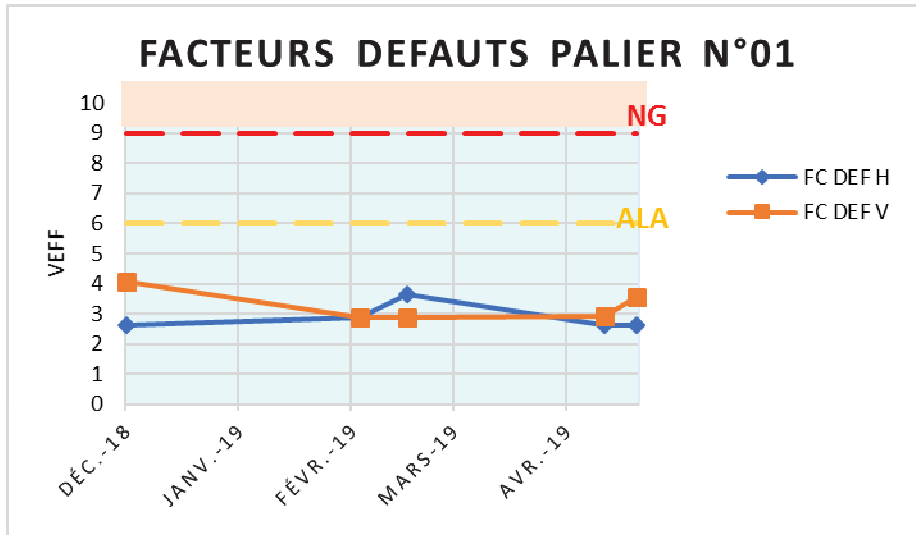


FIGURE N° 94: NIVEAU GLOBAL PALIER N°01



FACTEUR DÉFAUTS PALIERS N°01

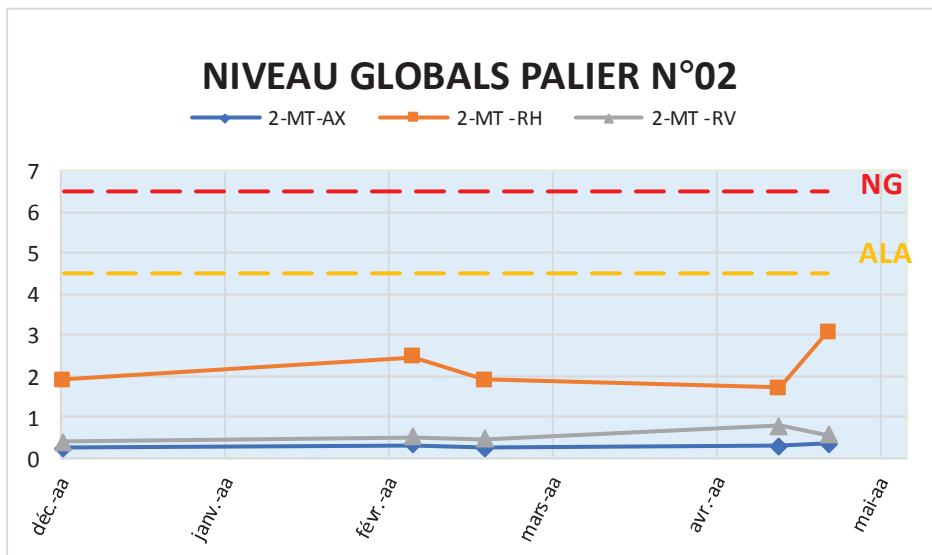


Résultat de surveillance :

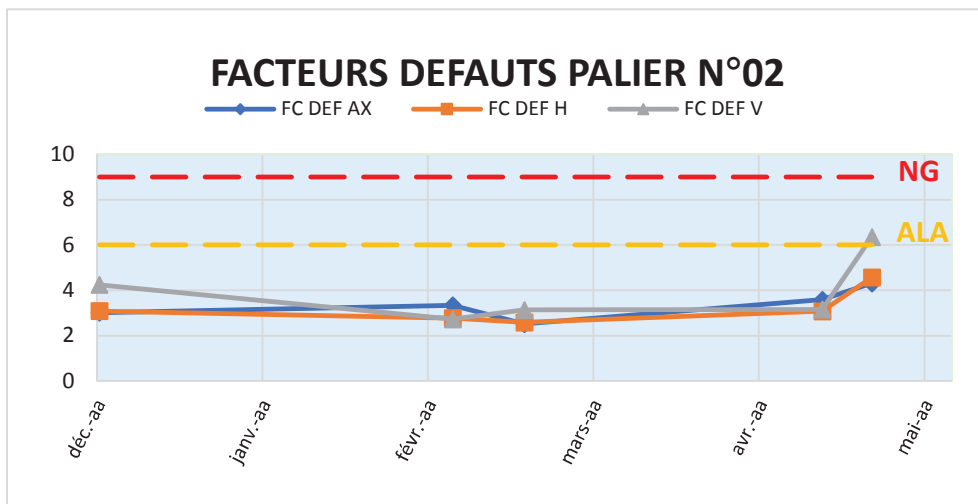
Le suivi de la courbe de tendance de la vitesse efficace selon un période de temps depuis DÉCEMBRE 2108 jus qu'a MAI 2019 sur palier moteur N°01 démontré que l'évolution du niveaux globaux ou même le courbe des facteurs défauts N'a aucune importance ce qu'explique généralement :

- L'état presque idéal du moteur.
- Le roulement est travail dans les bonnes conditions.

NIVEAU GLOBALE ET FACTEURS DEFAUTS EN POINT N02



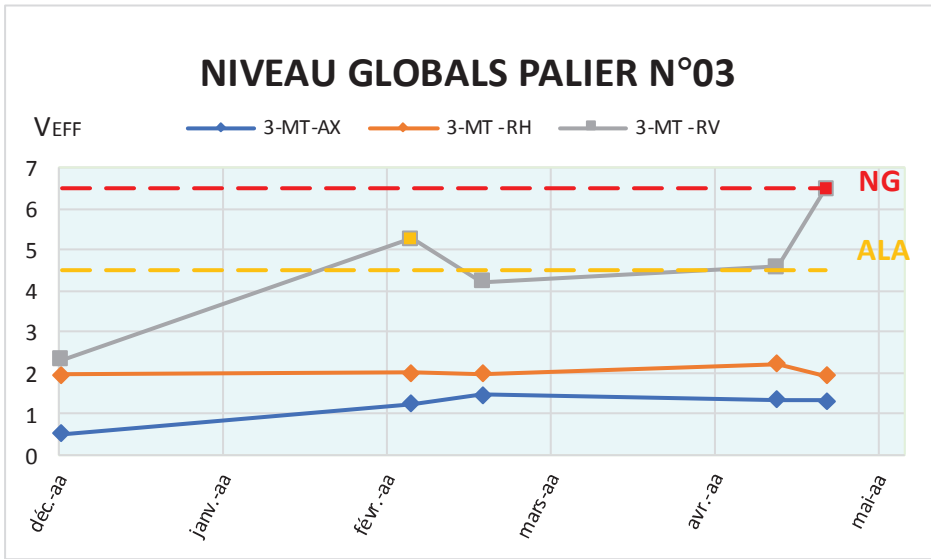
## FACTEURS DEFAUTS PALIER 02

**Résultat de surveillance :**

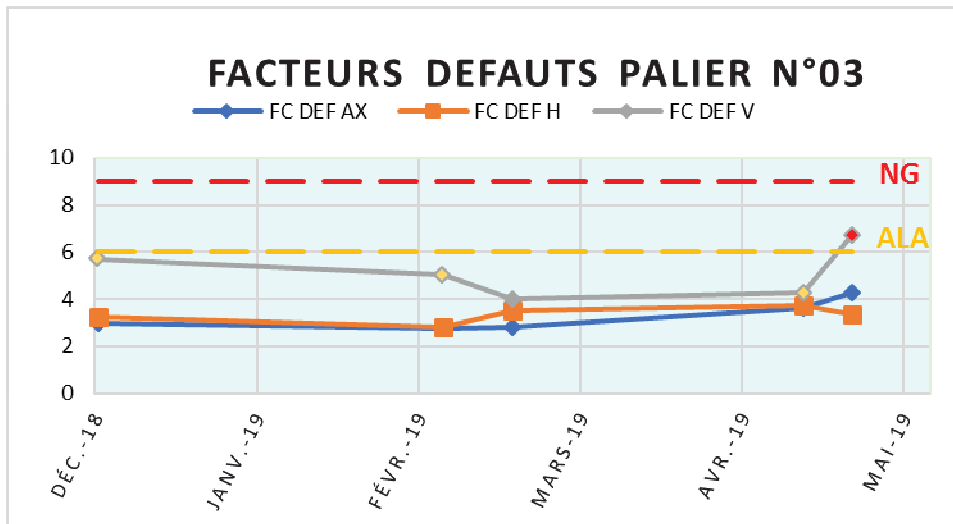
Le suivi de la courbe de tendance de la vitesse efficace selon un période de temps depuis DÉCEMBRE 2108 jus qu'a MAI 2019 sur palier moteur N°02 démontré que l'évolutions des niveaux globaux n'a aucune importance mais il y a des signes moyenne au niveau d'évolution des de courbe de facteurs défauts généralement sur la direction verticale ce que demande diagnostic approfondie par l'analyse spectral mais généralement :

- L'état presque idéal du moteur.
- Le roulement est travail dans les bonnes conditions.

NIVEAU GLOBALE ET FACTEURS DEFAUTS EN POINT N03



FACTEURS DEFAUTS PALIER N°03



Résultat de surveillance :

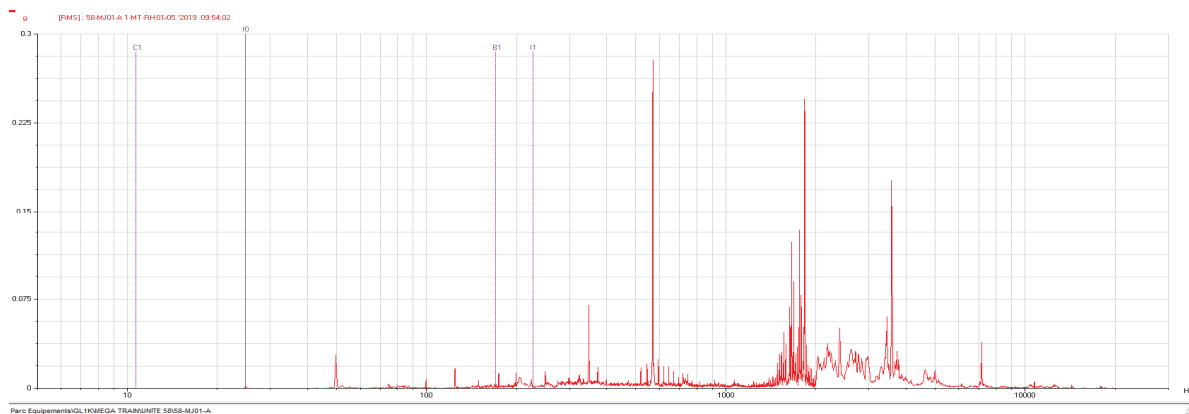
Le suivi de la courbe de tendance de la vitesse efficace selon un période de temps depuis DÉCEMBRE 2108 jus qu'a MAI 2019 sur palier pompe N°03 démontré qu'il y a une évolution des niveau globales Assy importance suivant la direction verticale aussi il y a des signes moyenne au niveau d'évolution des facteurs défauts qui dépasse le seuil d'alarme sur la direction verticale ce que demande diagnostic approfondie par l'analyse spectral pour identifie la source des

problèmes.

## IV.4.6.2 analyse spectral

### A. PALIER MOTEUR N°01

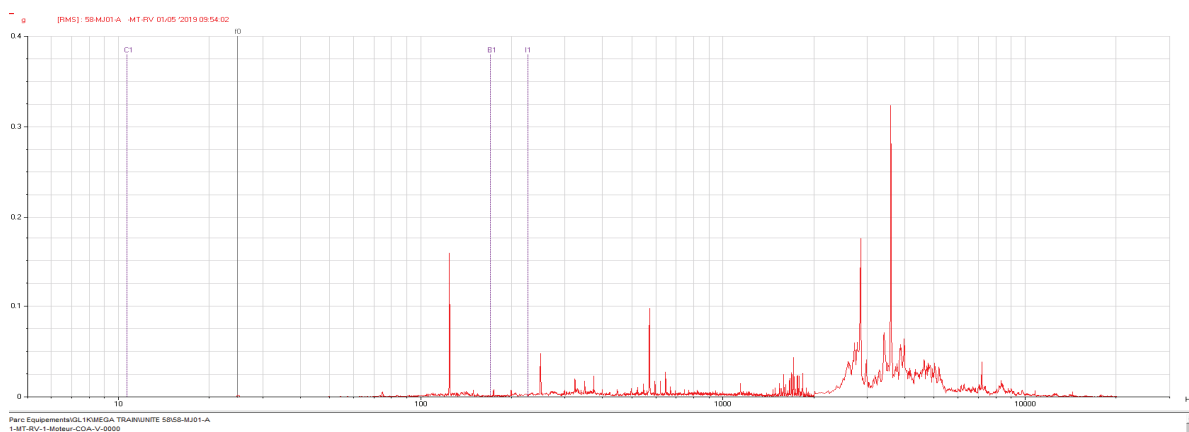
Figure № V-14 : spectre horizontal d'accélération du paliers moteur 1-MT- RH



#### RÉSULTAT D'ANALYSE SPECTRAL PLIER N01 :

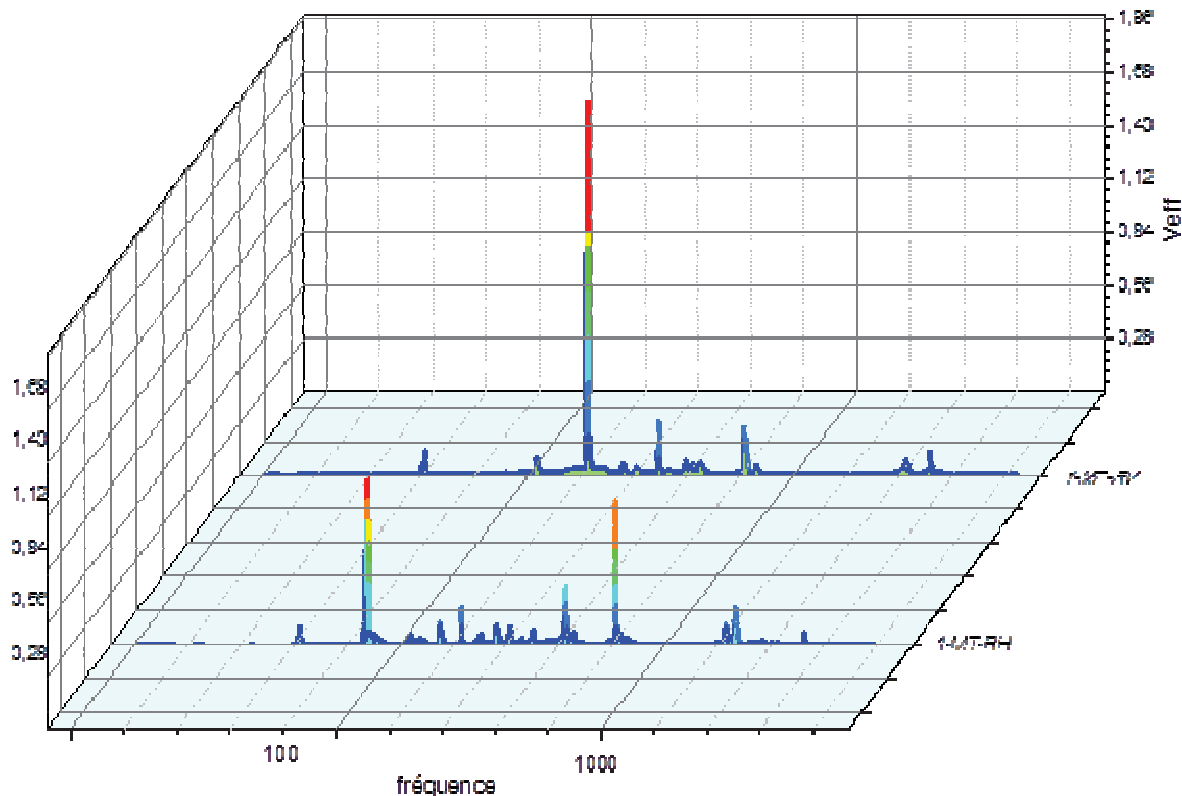
**DIRECTION HORIZONTALE :** le spectre horizontal d'accélération (g) palier 01 Représente l'absence de toute natures des défauts qui ont l'aptitude de visualisée au basse fréquence mem s'il existé des petit pics a partir la deuxième fréquence de rotation aussi des bande latéral au moyenne fréquence autour la deuxième et troisième fréquence cage interne aussi un bande d'Energie au niveau des hauts fréquences [200~10KH] ce que explique le mauvais graissage ou l'in capabilité du lubrifiant de couvre la surface de liaison du palier moteur 01

Figure № V-15 : spectre verticale d'accélération du paliers moteur 1-MT- RV



#### RÉSULTAT D'ANALYSE SPECTRAL PLIER N01 :

**DIRECTION VERTICAL** : le spectre vertical d'accélération (g) palier 01 Représente l'absence de toute nature des défauts qui ont l'aptitude de visualisée aux basses fréquences même s'il existé des petits pics à l'ordre de 0,2(g) aussi une bande d'Energie qui se manifeste au niveau des hauts fréquences [2000HZ~10KHZ] qui est très petit ce qu'explique des chocs dû aux altérations surface de liaison en mouvements du palier moteur 01.



**Figure N° V-16** : Comparaison des spectres de vitesse (1-MT- RV) et (1-MT- RH)

### L'ÉTAT GÉNÉRAL ET ACTION À PLANIFIER SUR PALIER 01

En général l'analyse spectral vienne de confirmer les résultats du courbe de tendance des niveau globales et du facteurs défauts ce qui concerne l'état du paliers moteur N°01 en état de stable le roulement travail dans les bonnes conditions seulement en dois programmée une opération de dégraissage et graissage Dans le prochain arrêt.

### B. PALIER MOTEUR N°02

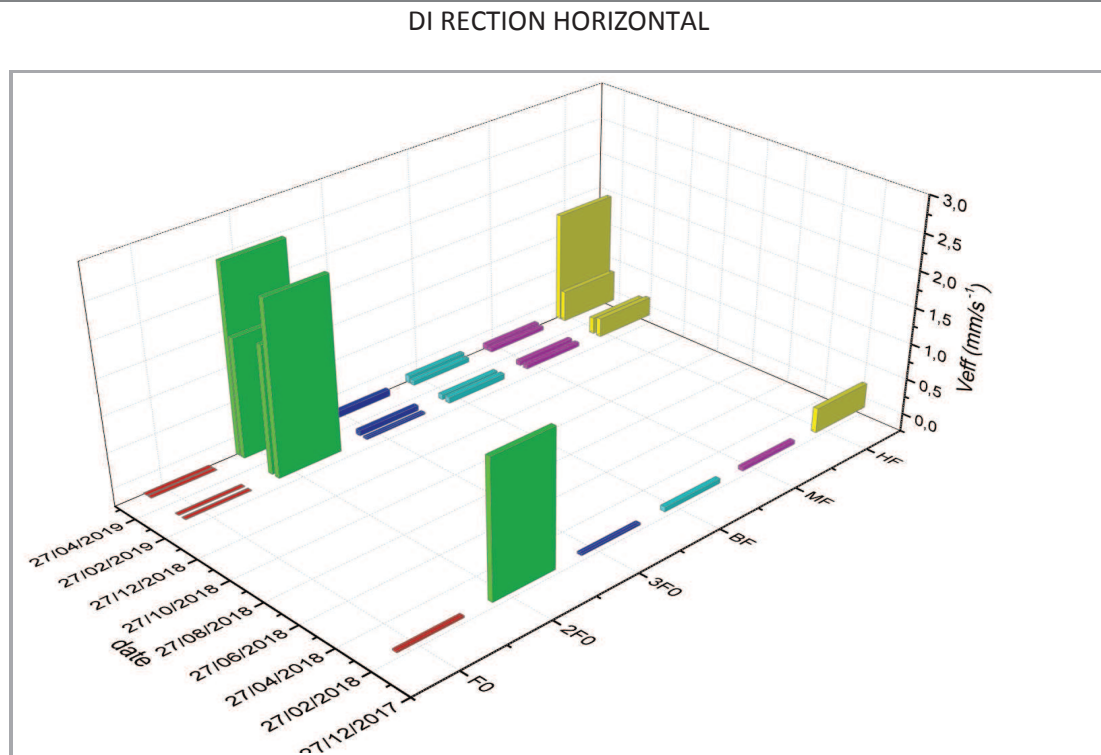


Figure N° V-17 : Analyse temps-fréquence pour palier N°02 (2-MT- RH)

#### RÉSULTAT D'ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE DU PALIER N°02 :

DIRECTION HORIZONTAL : la représentation des graphs de tendance et analyse d'évolution des fréquences majeure tel que :

Fréquence de rotation  **$f_r = 24,81$**

$$2f_r = 49,62$$

$$3f_r = 74,43$$

et même la bande d'Énergie au niveau de basse fréquence **BF**, moyenne fréquence **BM** et haute fréquence **HF** depuis **DÉCEMBRE 2107 jus qu'a MAI 2019** suivant les mesures de vitesse efficace  $V_{eff}$  ( $mm/s$ ) du palier 02 Représente l'absence de toute nature des défauts qui ont l'aptitude de visualisée aux basses fréquences même s'il existé des petits pics à l'ordre de  $2,8(mm/s)$  dans la deuxième fréquence de rotation aussi une évolution de bande d'Énergie qui se manifeste au niveau des hauts fréquences [ $1000HZ \sim 10KHz$ ] qui explique des chocs dû aux altérations surface de liaison en mouvements du roulement car il n'est pas bien lubrifiée ou suivant des contaminations du palier moteur 02.

DIRECTION VERTICALE

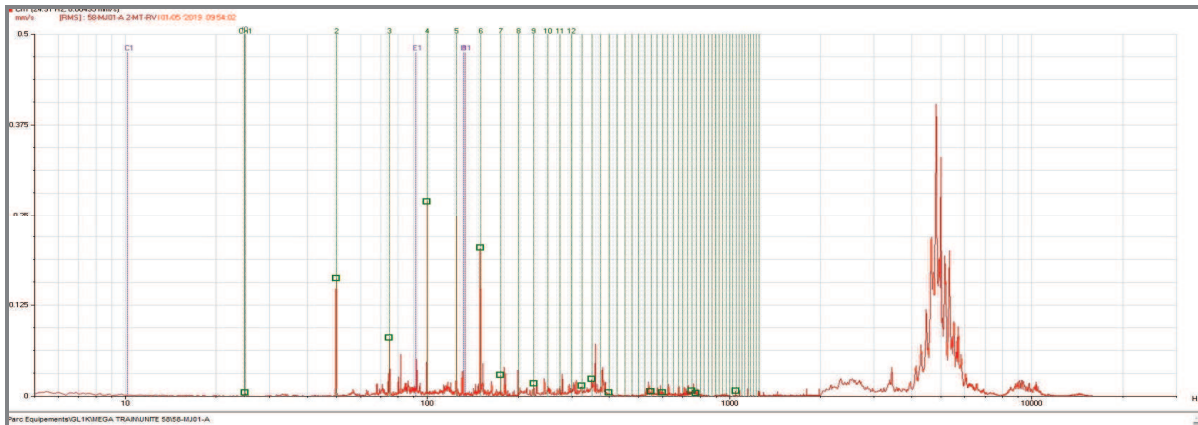


Figure N° V-18 : spectre d'accélération du paliers 02 moteur (2-MT- RV)

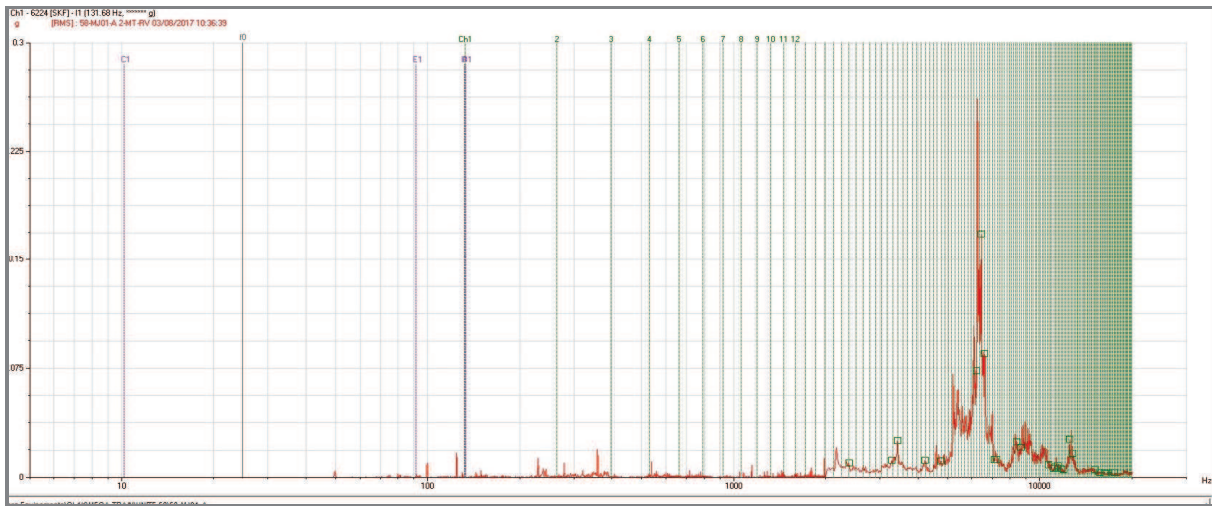


Figure N° V-19 : spectre de référence du paliers 02 moteur (2-MT- RV)

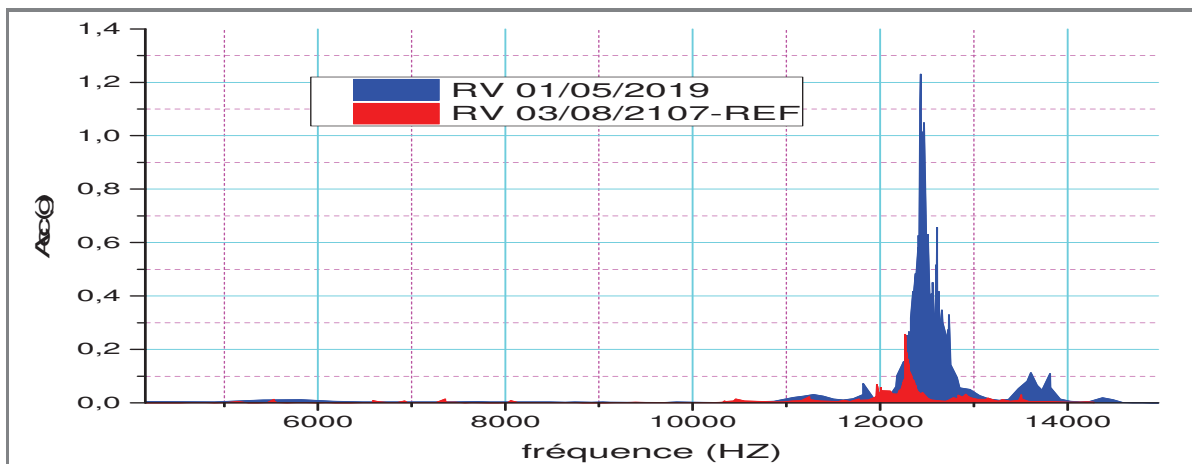


Figure N° V-20 : Comparaison avec le spectre référence

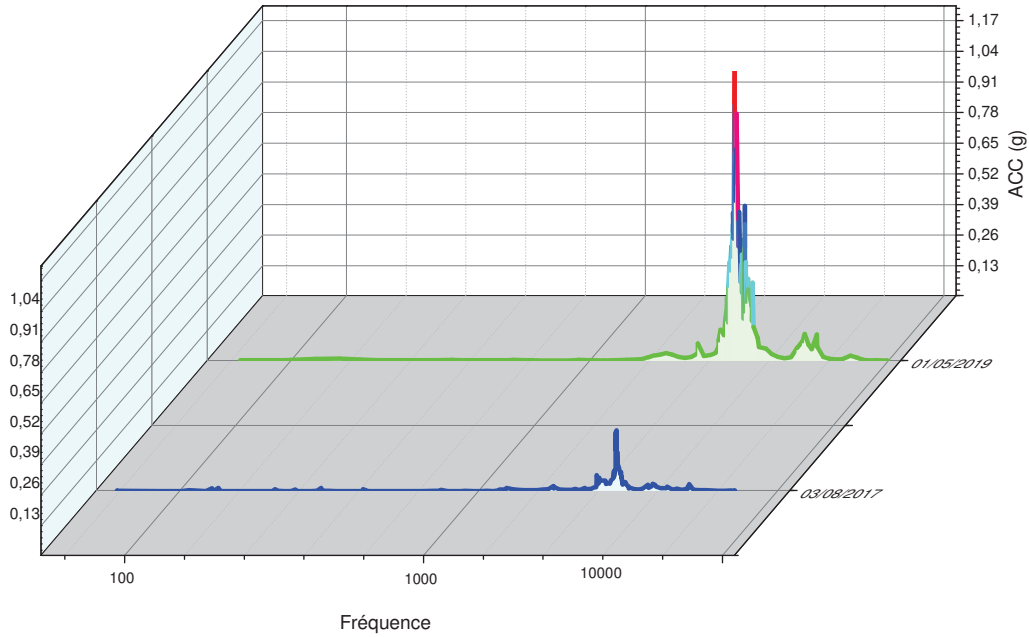


Figure N° V-21 : Simulation de Comparaison avec le spectre référence d'accélération 2-MT- RV

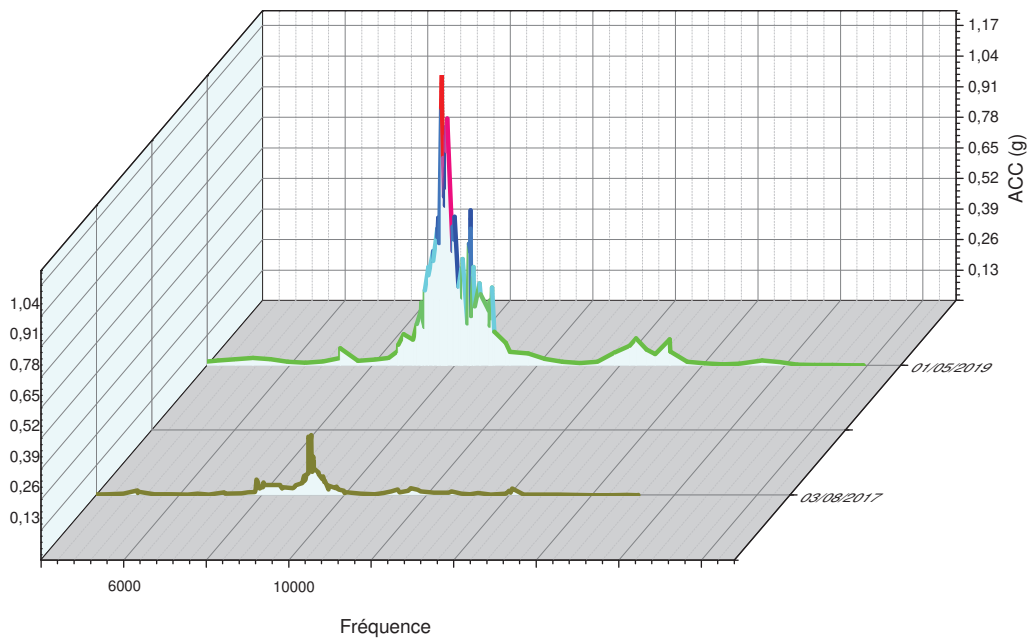


Figure N° V-22 : Comparaison FFT ZOOMÉ avec le spectre référence d'accélération (2-MT- RV)

**RÉSULTAT D'ANALYSE SPECTRAL PLIER N01 :**

**DIRECTION VERTICAL :** la comparaison entre le spectre d'accélération de référence et le dernier spectre d'accélération (g) de la date 01/05/2019 en direction vertical palier 02 Représente l'absence de toute natures des défauts qui ont l'aptitude de

visualisée aux basses fréquences et moyenne fréquence par contre il existé un évolution une bande d'Energie qui se manifeste au niveau des hauts fréquences [10KHZ~15KHz] qui explique des chocs dû aux au mauvais lubrification qui ne couvre les surface de contact du mouvement du roulement du palier moteur 02.

DIRECTION AXIALE

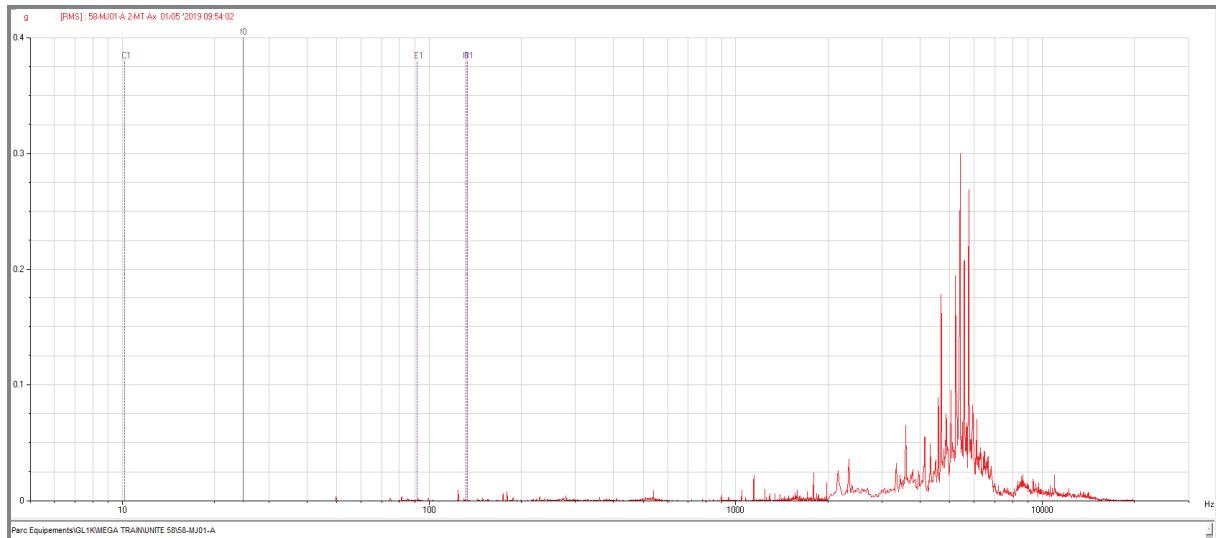


Figure N° V-23 : Spectre d'accélération du paliers moteur (2-MT- Ax)

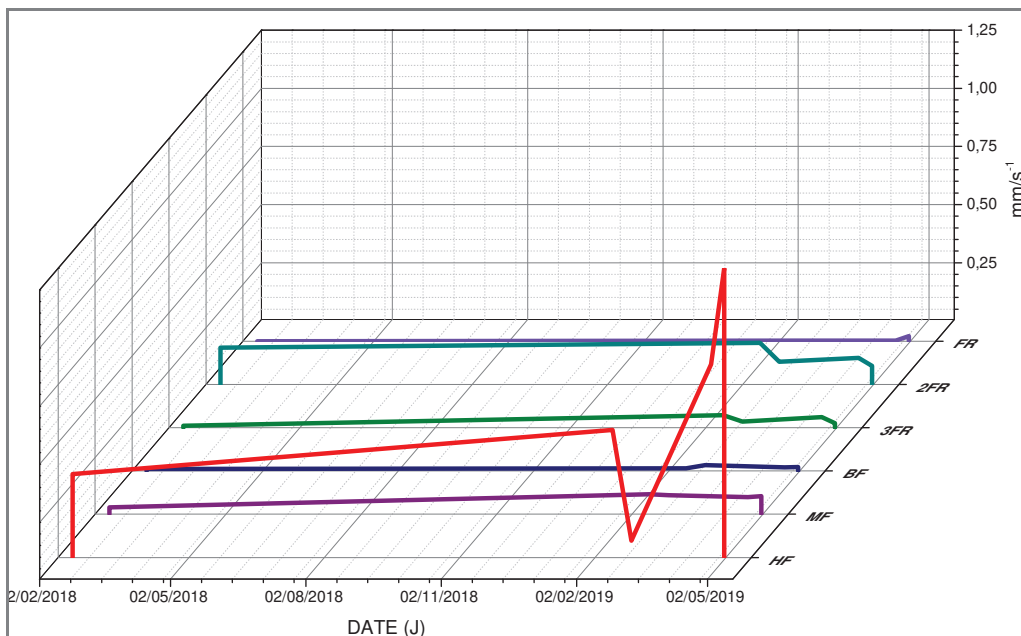
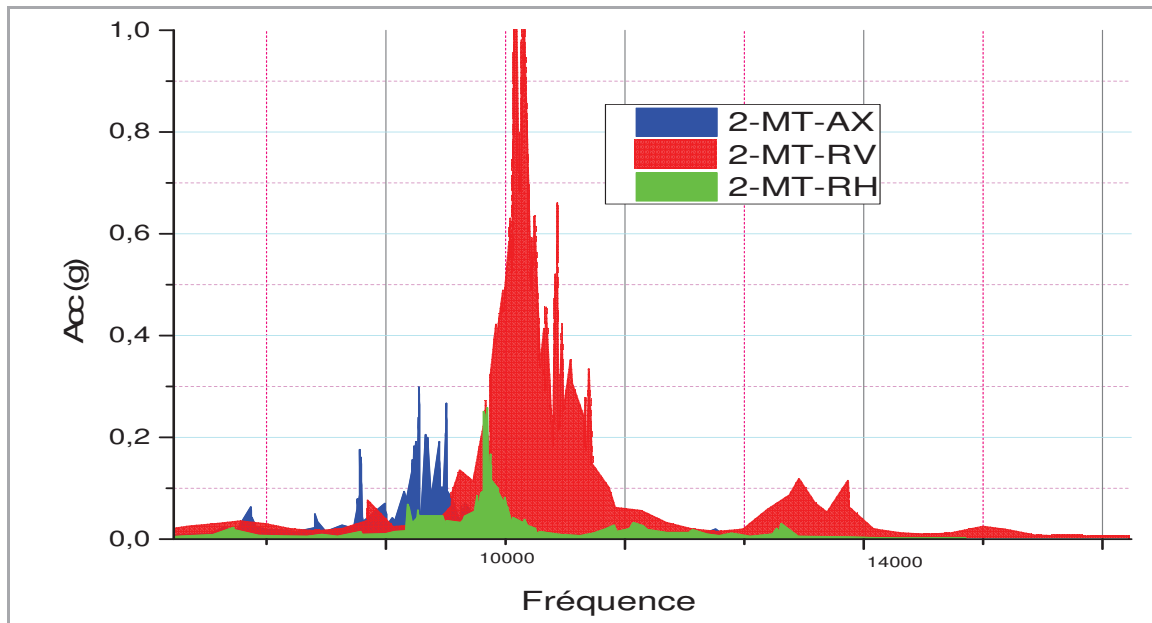


Figure N° V-24 : Analyse temps-fréquence pour palier N°02 (2-MT- Ax)

DIRECTION AXIAL : spectre axial d'accélération (g) palier 02 Représente l'absence de

toute natures des défauts qui ont l'aptitude de visualisée aux basses fréquences seulement une évolution de la bande d'Energie qui se manifeste au niveau des hauts fréquences [2000HZ~13KHz] cette dernière a été confirmée par l'analyse temps-fréquence qui est la représentation directe des chocs dû à l'altération de lubrification du palier moteur 02.

### L'ÉTAT GLOBAL DU MOTEUR



*Figure N° V-25 : Comparaison FFT ZOOMÉ avec des spectre sur les trois directions*

Suivant les différents étape d'analyse que se soit analyse des niveau global, analyse des facteurs défaut, analyse temporelle ou analyse spectral nous démontrons que l'état global pour les composants moteur électrique son acceptable excepte que des signes de mauvaise lubrification au niveau du palier N°02

#### **ACTION DE MAINTENANCE A PLANIFIÉ :**

Les actions qui ont planifié lord le prochain arrêt :

1. Lubrification à surveiller pour palier n°01
2. Dégraissage et graissage au niveau pour palier n°02
3. Nettoyage de contaminations et vérification du paliers moteur.

#### **C. PALIER N°03**

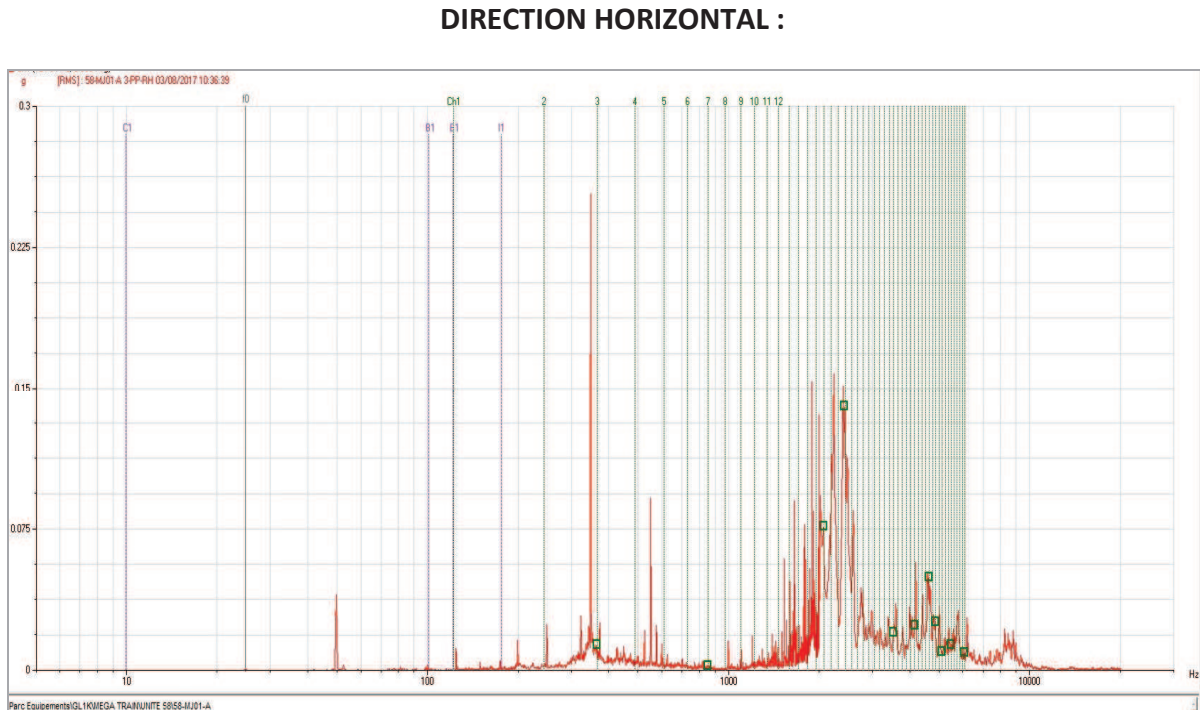


Figure N° V-26 : Spectre accélération de référence du palie pompe (3-PP- RH)

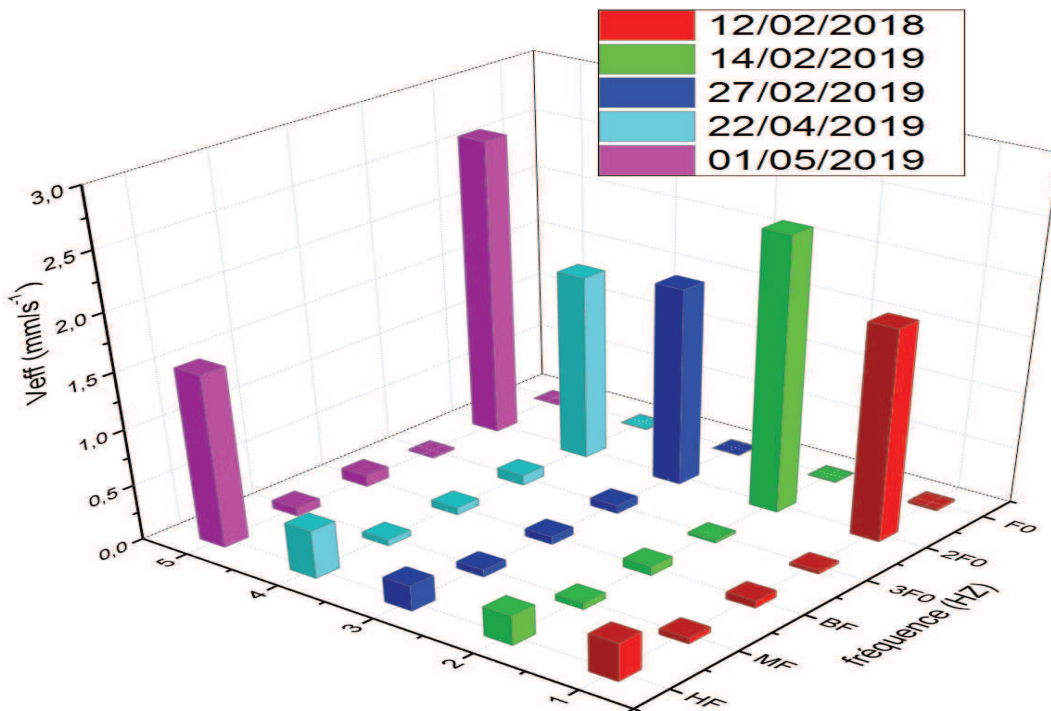
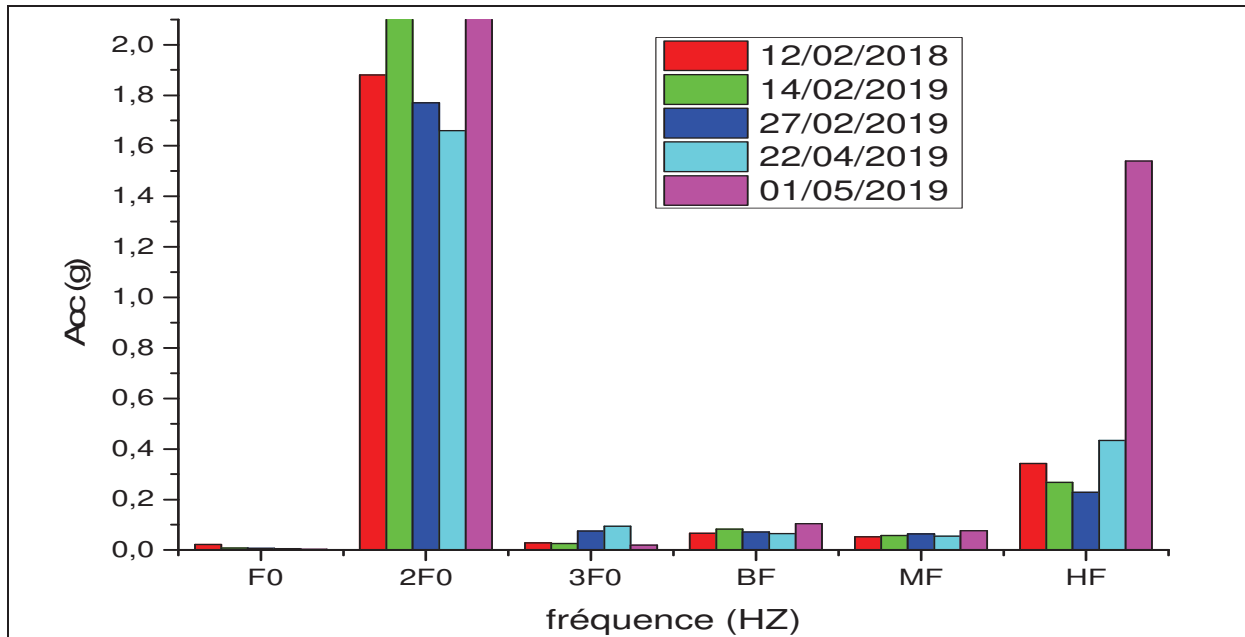


Figure N° V-27 : Représentation temp-fréquence d'évolution des mesures vitesse des fréquences major sur le palier N°03 direction (3PP-RH)



*Figure N° V-28 : Représentation d'évolution des mesures d'accélération des fréquences major (3PP-RH)*

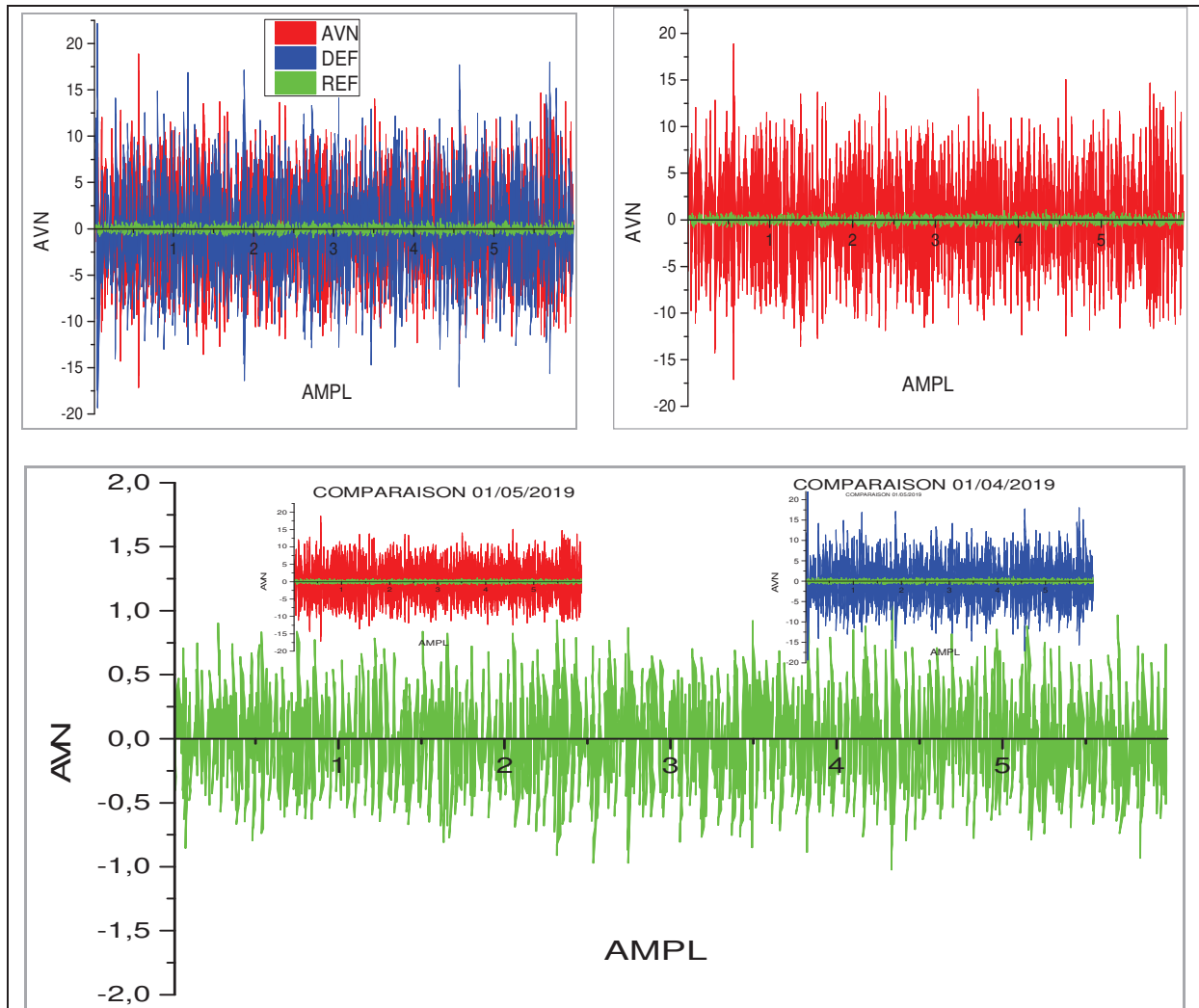
#### RÉSULTAT DES ANALYSES PLIER N03 :

##### DIRECTION HORIZONTALE :

L'analyse du graph temp- fréquence sur les fréquences :  $f_r = 24,81$ ,  $2f_r$ ,  $3f_r$  et même la bande d'Energie au niveau de basse fréquence **BF**, moyenne fréquence **BM** et haute fréquence **HF** depuis **DÉCEMBRE 2108 jus qu'a MAI 2019** suivant les mesures de vitesse Efficace  $V_{eff}$  ( $mm/s^{-1}$ ) du palier pompe 03 Représente l'évolution très important d'un pic au niveau  $2f_r$  plus une bande latérale à partir  $1f_{be}$ ,  $2f_{be}$  et les plus important c'est  $3f_{be}$  j's qua  $4f_{be}$  et une augmentation dans la zone d'Energie en haut fréquences qui démontre clairement que le roulement et sous une tension radiale sur la bague extérieure aussi le roulement est subi des dégradation significative a une stade alarment sévère cette dernière a été confirmée par les mesures d'accélérations sur la même plan et surtout l'évolution considérables dans Haute fréquence du au bruit induit par les phénomènes de cavitation dans la route du pompe centrifuge (58-MJ01-A).

##### DIRECTION VERTICALE :

##### ANALYSE TEMPORELLE :



*Figure N° V-29 : Comparaison des signaux temporelle des deux derniers mois avec le signal de la référence*

### Résultat d'analyse temporelle

Les résultats de simulations des signaux réels d'accélération et la comparaison avec le signal temporelle de référence nous démontrons que :

Il y a une évolution critique de bruit généré par le palier vertical de la pompe N°0 3 qui nous confirmé l'évolution significatif du bruit lié au phénomènes de cavitation très élevé au niveau du le rouet de la pompe, la volute le circuit de refoulement qui peut causer des dégâts importants est causée des érodions au niveau de l'impulseur, La roue et volute.

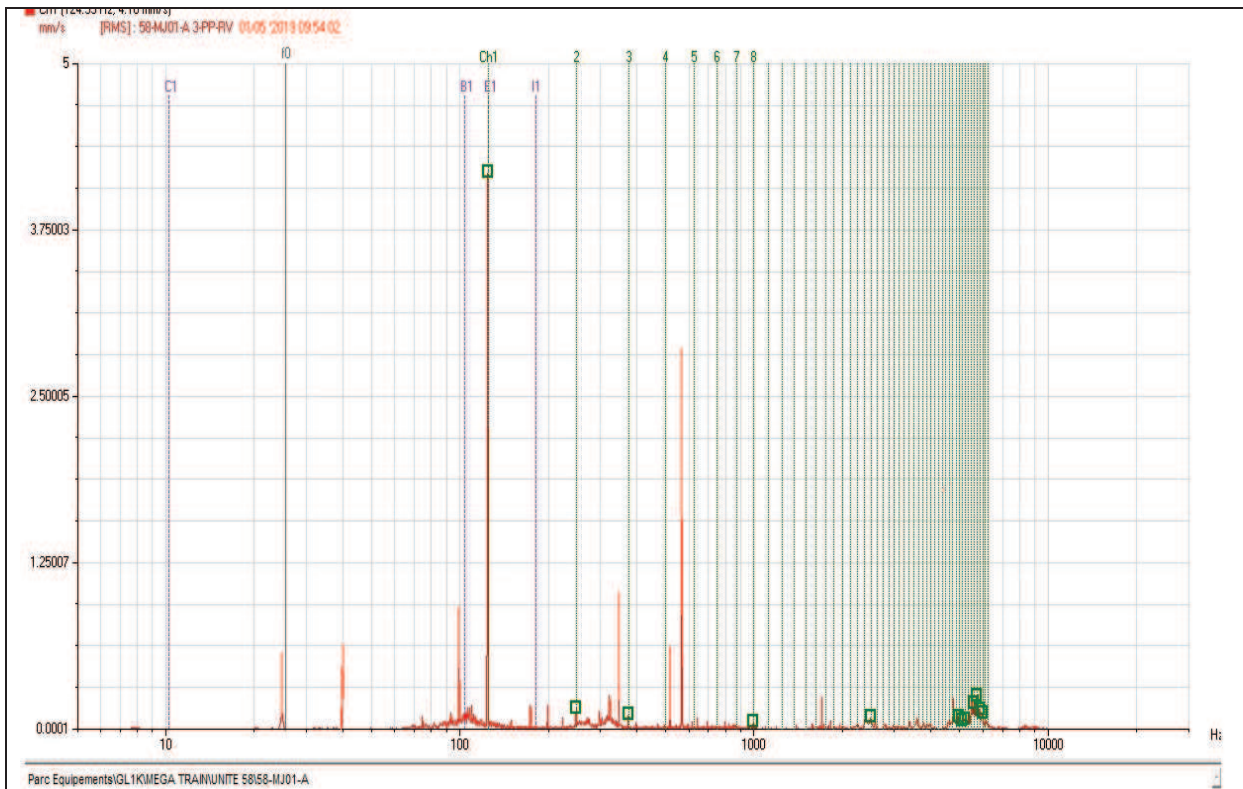


Figure N° V-30 : spectre de vitesse pour paliers pompe 03 (3-MT- RV)

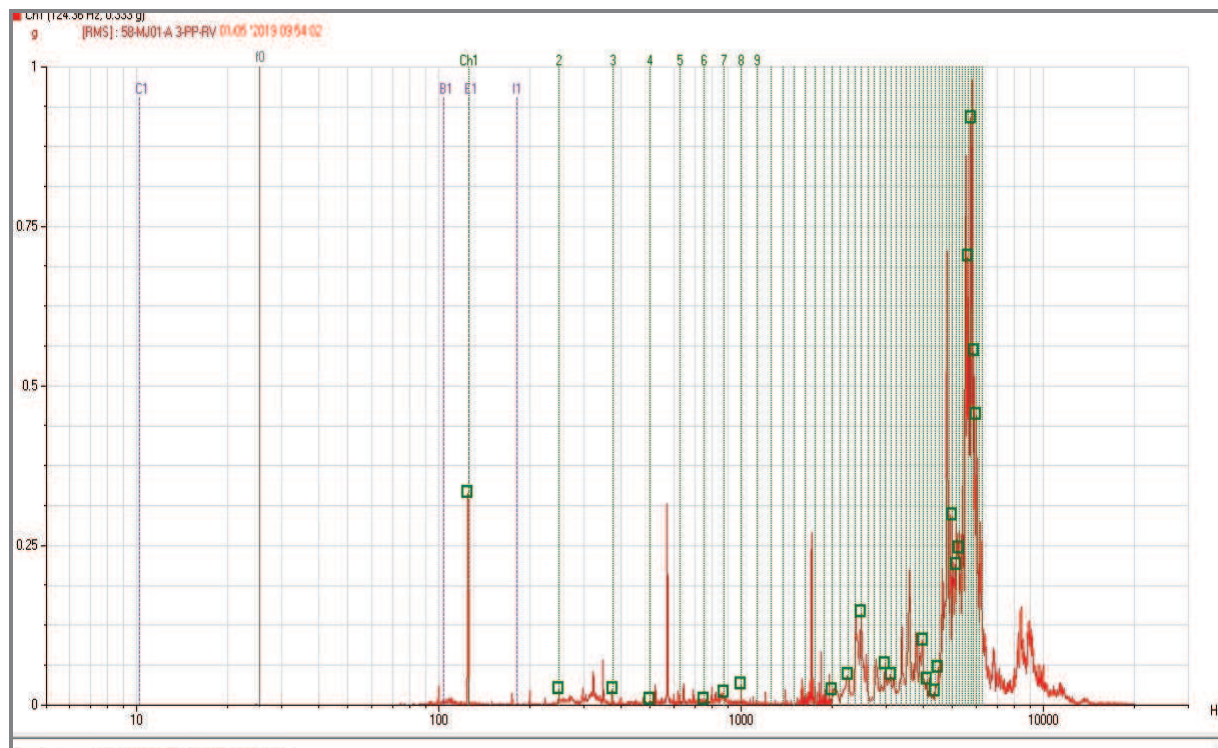


Figure N° V-31 : spectre d'accélérations pour paliers pompe 03 (3-MT- RV)

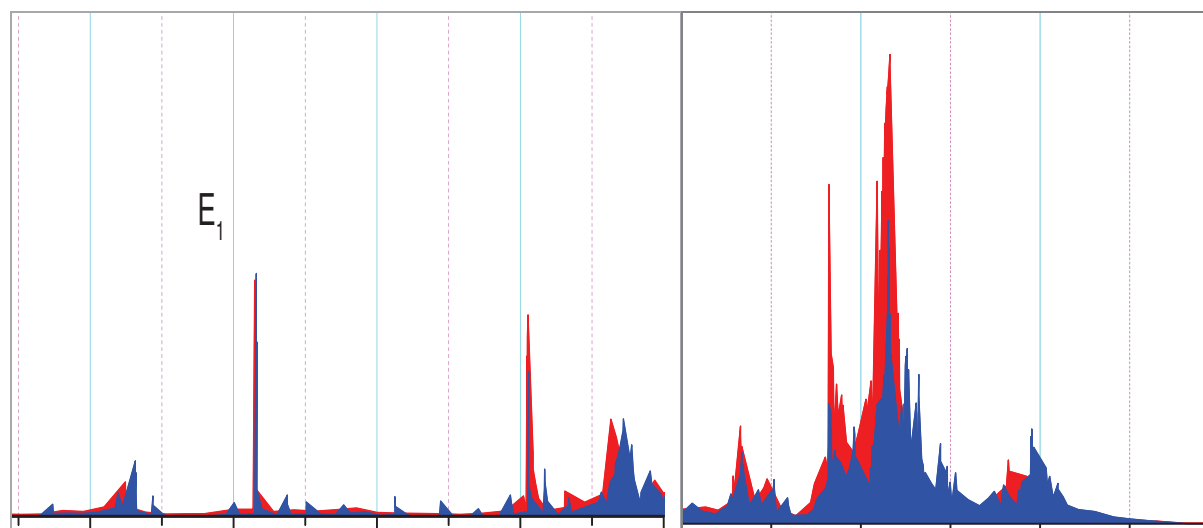
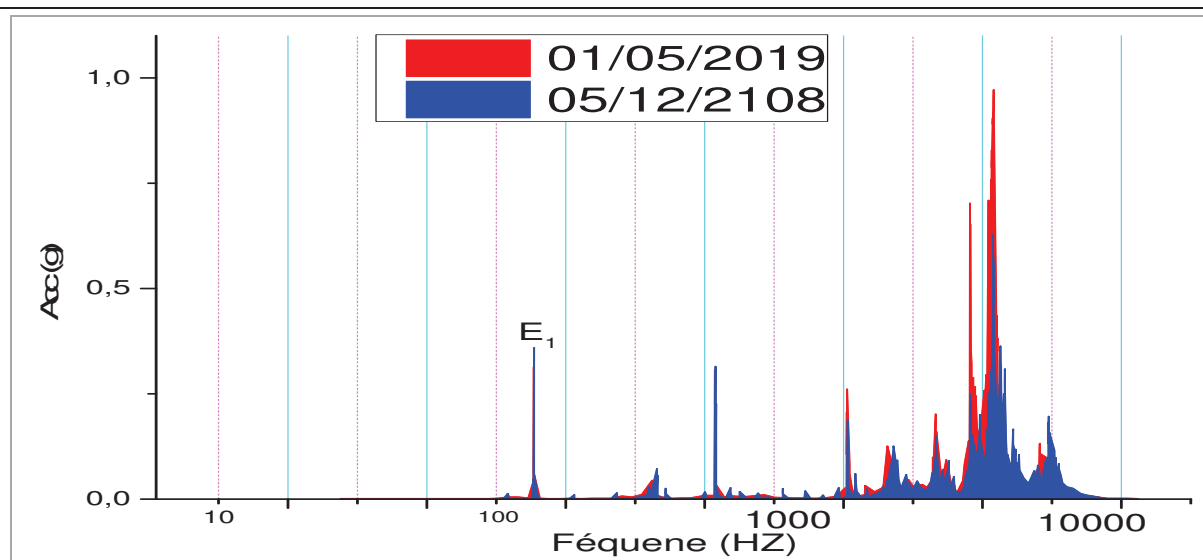


Figure N° V-32 : Comparaison des spectres ACC RV avec une analyse ZOOM MF et HF



Figure N° V-33 : Spectre haut fréquence zoomée autour de la fréquence  $F_{be}$  du roulement

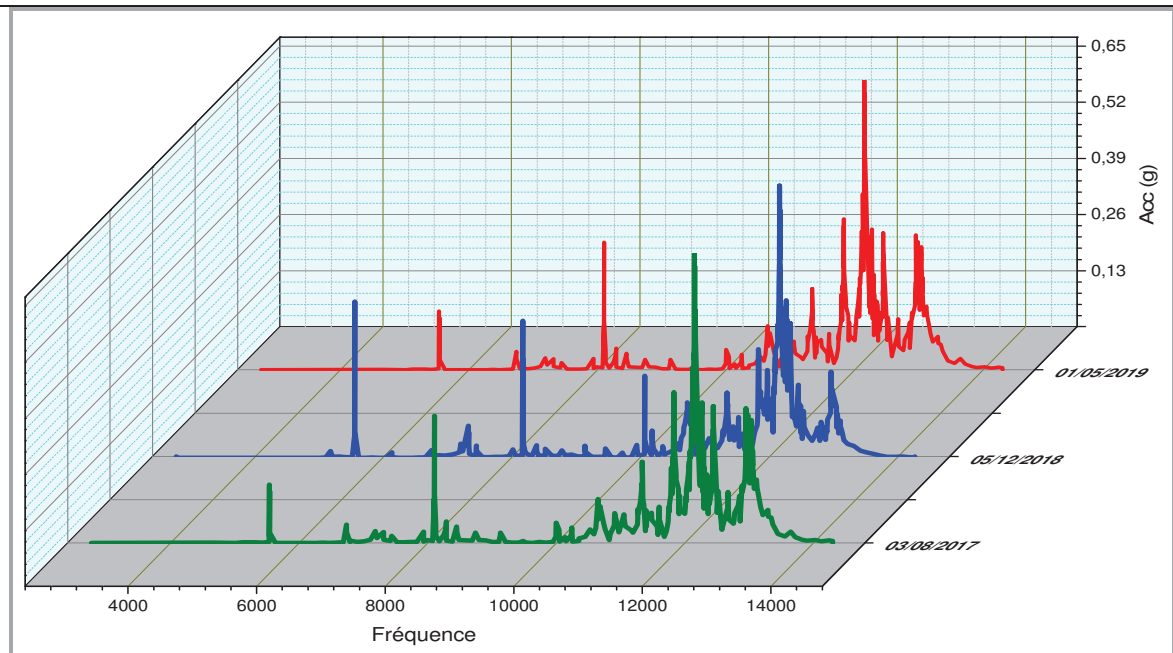


Figure N° V-34 : Comparaison des spectres avec le spectre de référence sur le plan 3D

#### RÉSULTAT DE COMPARAISON DE SPECTRES :

La comparaison entre le spectre d'accélération de référence et le dernier spectre d'accélération (g) de la date 01/05/2019 en direction vertical palier 03 Représente Une évolution progressifs sévère d'un pic de l'ordre de fréquence de  $F_{Be} = 124,44 \text{ HZ}$  et ces harmonique **3. Fbe** et **4. Fbe** il est bien claire dans le spectre de la vitesse en vois aussi des augmentations des pic **1. Fr** et **2. Fr** en baisse fréquence **qui** démontre des tensions radiales Évolutif sur la bague extérieure du roulement ainsi l'état de roulement est en stade final car l'augmentation des bandes d'Énergie des hautes fréquences [2000 HZ~8000HZ] qui rassemblé une bande latérale des pics de l'ordre [30~50  $F_{Be}$ ] est très important. il existe des chocs et bruit entre [10KHZ~20KHZ] du au phénomènes de cavitation de la roue du pompe car ces phénomènes ayant des manifestations vibratoires voisines (usure de bagues de roulement, défaut de lubrification) ces résultat Vien de confirmé les résultat des niveaux globales et facteurs défauts de roulement

Alor les défauts sont les suivants :

- Usure de la bague extérieure du roulement **7314 BECBJ (SKF)**
- Les surface interne d'impulseur de la roue est éroder

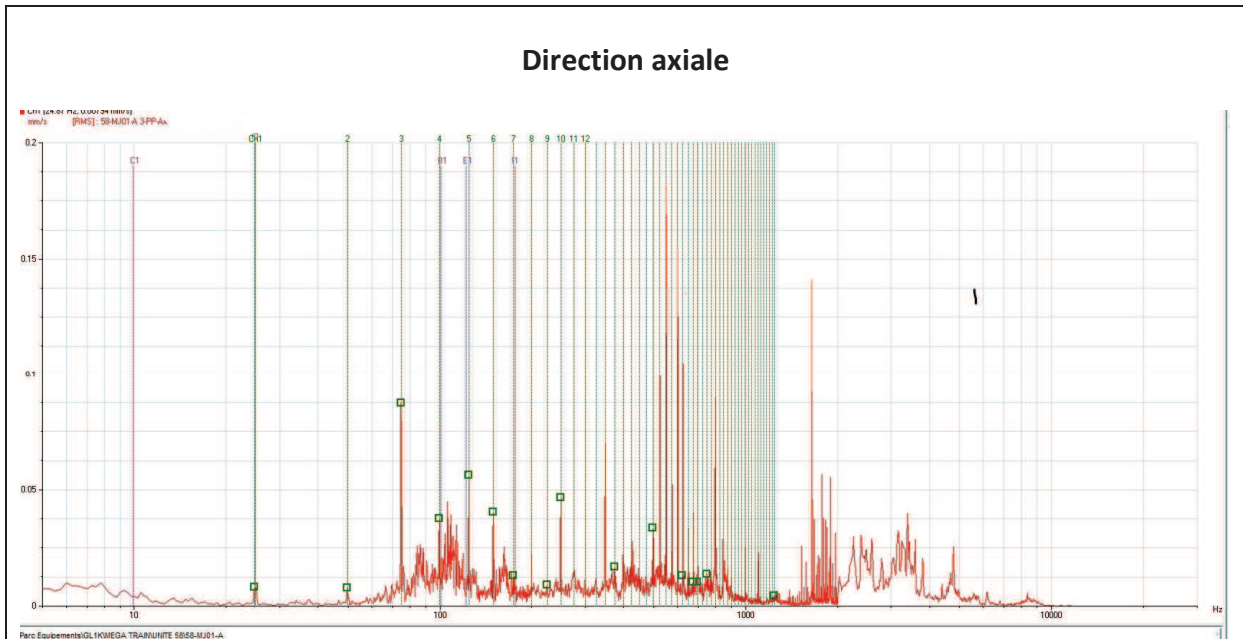


Figure N° V-35 : spectre de vitesse pour paliers pompe 03 (3-MT- AX)

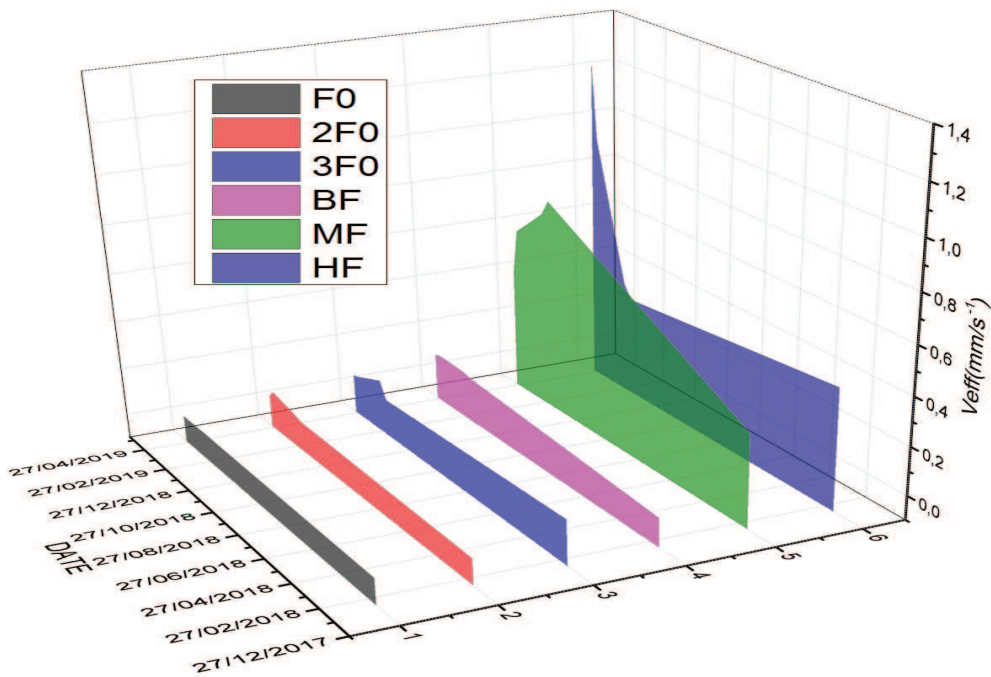


Figure N° V-36 : Analyse temps-fréquence pour palier N°03 (3-MT- Ax)

**DIRECTION AXIAL :**

L'analyse du graph temp- fréquence sur les fréquences :  $f_r = 24,81$ ,  $2f_r$ ,  $3f_r$  et même la bande d'Energie au niveau de basse fréquence **BF**, moyenne fréquence **BM** et haute fréquence **HF** depuis **DÉCEMBRE 2108** jus qu'a **MAI 2019**

suivant les mesures axial de vitesse Efficace  $V_{\text{eff}}$  (mm /s<sup>-1</sup>) du palier pompe 03 Représente un pain de rai et un bande latéral autour toujours les fréquence  $f_b$  et  $f_{be}$  et l'évolution très important au moyenne fréquence **MF** avec augmentation très important dans la bande d'Energie des haute fréquences **HF** qui Vien de confirmé l'altération du phénomènes de cavitation sur les palier 03 nous remarquont ici que la cavitation est clairement détecté car l'emplacement du capteurs en direction axial et plus proche de la volute du pompe Alor que la zone des HF est dédié complètement au bruit du au phénomènes de cavitation .

Suivant cette analyse en déduit le diagnostic suivant :

- L'état du roulement est dégradé et crée une diversement angulaire entre l'éléments roulant est bague extérieur
- L'impulseur de la roue pompe est dû à un phénomène de cavitation important qui Vien d'éroder le corps du roue et volute a cause aussi l'instabilité de température de l'huile chaude

#### ÉTAT GÉNÉRAL DU PALIER POMPE N°03

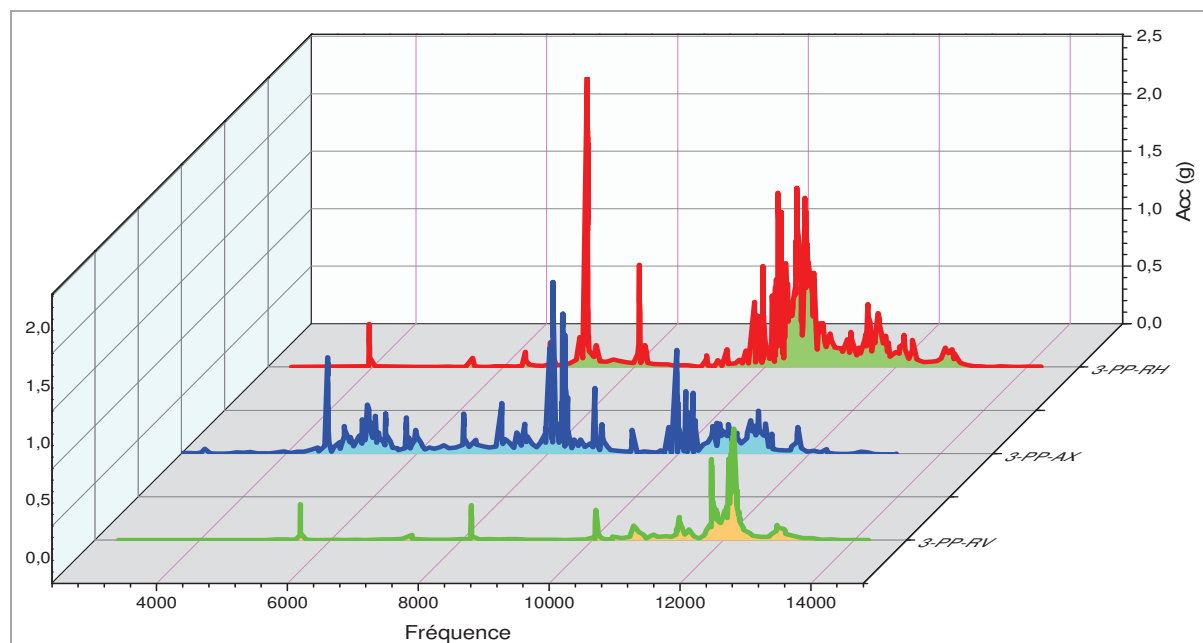


Figure N° V-37 : Comparaison des spectres lieu N°03 en trois directions

En général l'analyse spectral vienne de confirmer les résultats du courbe de tendance des niveau globales et du facteurs défauts ce qui concerne l'état du palier pompe N°03 est non acceptable

Actions de maintenance a planifié :

Les actions ont planifié pour le prochain arrêt pour les composants de la pompe :  
Sont les suivants :

- Changement le roulement **7314 BECB/J [SKF]** du palier **N°03**
- Lubrification à surveiller pour palier **N°04**
- Dégazage au niveau des circuits d'aspirations et roucoulements de l'huile chaude.
- Vérification l'état de la roue pompe

D. PALIER N°04

DIRECTION HORIZONTALE :

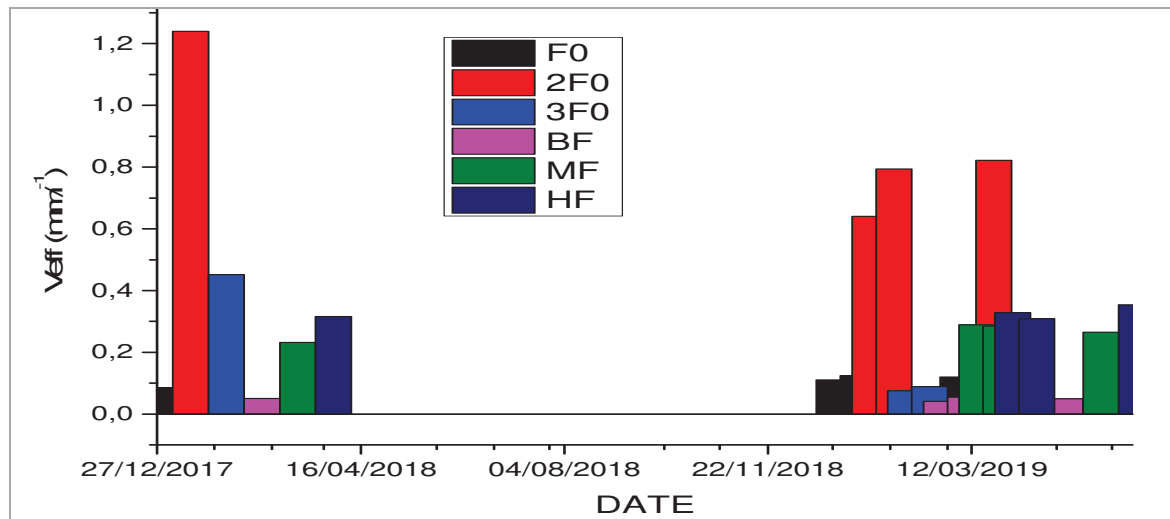


Figure N° V-8 : Analyse temps-fréquence pour palier N°04 (4-PP- RH)

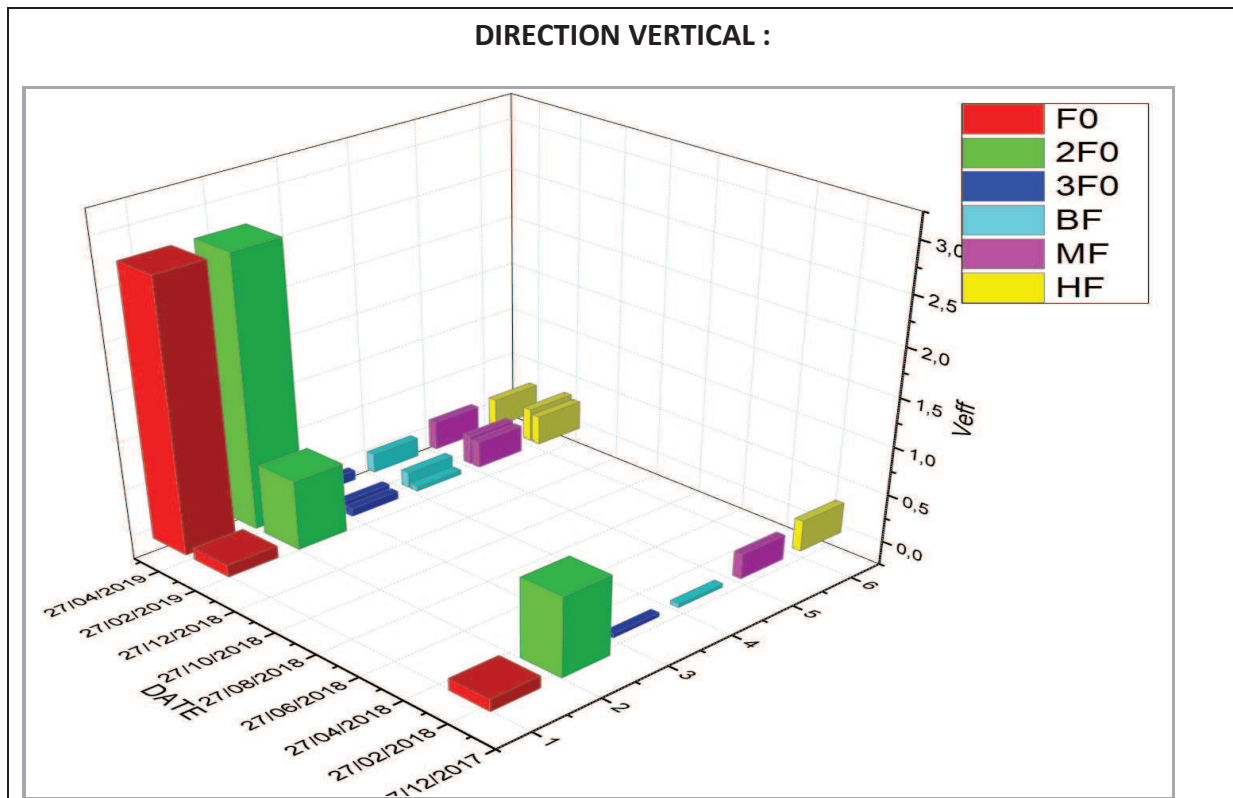


Figure N° V-39 : Analyse temps-fréquence pour palier N°04 (4-MT-RV)

### Résultat d'analyse

L'analyse du graph temp- fréquence sur les fréquences :  $f_r = 24,81$ ,  $2f_r$ ,  $3f_r$  et même la bande d'Energie au niveau de basse fréquence **BF**, moyenne fréquence **BM** et haute fréquence **HF** depuis **DÉCEMBRE 2108** jus qu'a **MAI 2019** suivant les mesures de vitesse Efficace  $V_{eff}$  ( $\text{mm/s}^{-1}$ ) du palier pompe N°04 en direction horizontal et vertical démontre la stabilité des niveau vibratoire sur la direction horizontal car il né dépasse pas les limite d'état d'alarme suivant la norme mais il existe des augmentation évolutif des pics  $f_r$ ,  $2f_r$  sur le plan vertical qui nous montre l'influence directe des tensions radial sur la palier et sur roulement aussi l'effet de cavitation progressif, Généralement le palier N°04 est en bon état.

### ÉTAT GÉNÉRAL DU L'INSTALLATION 58-MJ01-A

Suivant les déférents étape d'analyse que ce soit analyse et diagnostic des niveau global, analyse des facteurs défaut, analyse temporelle ou analyse

spectral nous démontrons que l'état global **de l'installation 58-MJ01-A** nous démontrons que :

1. État global **ACCEPTABLE** et bon pour le composant '**Moteur électrique**'.
2. État global **NON ACCEPTABLE** pour les composants '**Pompe**'.
3. État global **ACCEPTABLE** pour le composant '**Accouplement rigide**'.
4. État global **ACCEPTABLE** pour '**Garnitures** '
5. État global **TOLÉRABLE** pour '**les circuits de d'aspirations et roucoulement**'

#### DIAGNOSTIC

##### MOTEUR ÉLECTRIQUE

- Manque de lubrification N°01 et N°02.
- Contaminations du paliers moteur.

##### LA POMPE

- Usure roulement au niveau palier N°03
- Des signes de manque Lubrification pour les paliers N°03 et N°04
- Contraint radial évolutif sur les roulements des paliers N°03 et N°04 sous l'effet du l'instabilité de la température de l'huiles chaude qui influée directement sur la viscosité de ce dernier
- Cavitation Assy importante qui peut causer des dégâts au niveau dégât de la roue aussi la volute

#### RECOMMANDATIONS ET PRÉCONISATION GÉNÉRALE

D'après les résultats de surveillances et diagnostic sur l'installation du pompage d'huile chaude sur les déférents points de mesures nous recommandons durant prochaine intervention ou l'arrêt préventive les actions suivants :

##### Pour moteur électrique :

1. Nettoyage au niveau du paliers moteur.
2. Lubrification à surveiller pour palier n°01
3. Dégraissage et graissage au niveau pour palier n°02

##### Pour la pompe :

1. Changement le roulement 7314 BECB/J [SKF] du palier N°03
2. Lubrification à surveiller pour palier N°04
3. Dégazage au niveau des circuits d'aspirations et roucoulements de l'huile chaude.
4. Vérification l'état de la roue pompe

### PRÉCONISATION GÉNÉRALE

Nous conseillons :

- Minimiser le temps de surveillance périodique de l'installation
- Lubrifier le composant moteur Lieu "2-moteur" et mesurer à nouveau
- Lubrifier le composant pompe et mesurer à nouveau, Si la lubrification n'est pas en cause, le remplacement des roulements du composant Pompe est envisageable lors d'un arrêt planifié sur le Lieu "3-Pompe-CA".
- Cavitation à surveiller à partir le contrôle du procès à mener rapidement si non, l'installation d'un système de dégazage au niveau de circuit est envisageable lors d'un arrêt planifié.
- Suivre le comportement dynamique de la pompe pour prévenir une dégradation du rouet.
- La surveillance thermique du procès à partir le contrôle de température de l'huile chaude suivant l'installation du capteur température
- Généralement la surveillance online est envisageable pour se type d'installation Car en aura plus contrôle en temps réel.
- Aussi de façon général l'historique de l'installation machine nous démontré  
Que la plupart des pans sont d'Origins électriques Alor en droite subordonnées des vérifications générales sur les armoires électriques de l'installation.

#### IV.5. Conclusion

Durant cette étude pratique nous a permis de démontrer l'importance d'une stratégie de maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire qui permet l'élaboration d'un bilan complet concernant les installations ou systèmes surveillée de manière permanent ou périodique

La surveillance du pratique De l'installation Pompage d'huile chaude **SECR « 58-MJ01-A »** du **MEGA TRAIN** dans le Complexe **GL<sub>1</sub>K** nous a permis d'acquérir beaucoup d'expérience et des reconnaissances ce qui concerne les techniques de maintenance et l'organisation de l'intervention sur les machines pendant le fonctionnement, aussi offre l'opportunité de relevé les mesures vibratoires est Prendre les signatures spectrales permettent le diagnostic et localisation précoce des défauts.

La détection et La réduction des problèmes haut-dessus nécessite des bonnes maitrise traitement des résultats des signaux vibratoire et l'éclaircissement des spectres de chaque défaut ainsi des capacités d'entretien et réparation en vie de rendre l'installation en état de bon fonctionnement pour cette raison nous recommandons lord on a fait appel aux prochaines arrêt ou interventions de suit Les recommandations et les préconisations général qui est en fin étude.

**CONCLUSION GÉNÉRALE :**

L'étude précédente indique l'importance de la mise en place d'une stratégie de maintenance conditionnelle basée sur l'analyse vibratoire sur les équipements des systèmes électromécaniques au niveau de la structure de l'entreprise.

L'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un " bilan général " complet qualitative et quantitative sur le système qui en peut surveiller en temps réel ou son état à un instant donné, Le contenu de différentes analyses temporelle fréquentielle et spécifiques de la vibration sur les équipements ou systèmes permet la détection précoce des défauts à partir d'un traitement du signal vibratoire.

Les vibrations engendrées par une machine tournante sont la traduction des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. L'analyse de cette signature vibratoire permet de dresser un diagnostic de l'état de fonctionnement de la machine et détecter des défauts à un stade précoce, et caractériser leurs états suivant des matériels et instrumentation placés à des points bien définis pour accueillir les informations nécessaires, Comme pour celle-ci la surveillance l'installation Pompage d'huile chaude **SECR « 58-MJ01-A »** du **MEGA TRAIN** au niveau du pôle de liquéfaction de gaz naturel **GL1K SKIKDA**.

Durant notre étude pratique dans le Complexe **GL1K** qui nous a permis d'acquérir beaucoup d'expérience et des reconnaissances sur le terrain ce qui concerne les techniques de maintenance et l'organisation de l'intervention sur les machines pendant le fonctionnement.

Les résultats obtenus sont assez conséquents pour montrer les avantages de ce type de surveillance et diagnostic des systèmes électromécaniques et des machines tournantes qui se résume en :

- L'importance de mise en œuvre d'une stratégie de maintenance de surveillance et diagnostic basée sur l'analyse vibratoire pour la facilité de la tâche d'intervention et pour l'ordonnancement des informations.
- L'intervention ne soit que sur les installations dont l'état nécessite réellement l'intervention, car toutes les machines vibrent, l'identification est en fonction de la gravité des mesures globales appliquées sur les installations.
- Ils nous ont permis la facilité de gestion des stocks.
- L'approvisionnement des pièces de rechange soit bien planifié et uniquement les pièces nécessaires.
- Réduire le coût et la durée des arrêts préventifs et augmenter le taux de disponibilité des équipements.
- L'analyse vibratoire permet notamment le diagnostic des anomalies des défauts et même l'existence primaire d'une anomalie qui, détectée à un stade le plus précoce possible dans le but de suivre ou la dégradation à partir des inducteurs significatifs préalablement définis.

Tous ces avantages ont été sentis durant notre étude De l'installation Pompage d'huile chaude **SECR « 58-MJ01-A »** du **MEGA TRAIN** au niveau du pôle de liquéfaction de gaz naturelle **GL1K SKIKDA** par l'analyse vibratoire.

## Synthèse et Perspectives

En conclusion de notre travail expérimental, nous pouvons dire :

- Notre étude pratique permis de mettre en œuvre les méthodes de surveillance et de diagnostic des machines tournantes, et qui peut être intégrée à un programme de maintenance, on peut alors aller plus profondément dans la détermination de la signature vibratoire de la machine testée. C'est dans cette optique que sont inclus des outils tels que l'analyse d'enveloppe, le zoom FFT, l'analyse de spectre le cepstre et bien d'autres.
- Nos résultats d'analyse constitueront une banque de donnée expérimentales particulièrement utile au futur pour développer un **code de calculs** dans ce cas typique.
- Nous consultons suivant notre étude pratique l'absence de tous nature des contrôle Didier aux vibrations d'une source électrique si pour sa il est indispensable d'intégrer l'analyse du courant statorique MSCA comme solution efficace car est comme en a indiqué suivant l'historique que la majorité d'arrêts sont d'Origins électriques.
- En conséquence, les techniques de mesures vibratoires et d'analyses spectrale des signaux Recueillis sont des outils puissants et précis, permettant d'effectuer des diagnostics des défauts judicieux.

En fin de cette étude on peut croire l'existence d'une machine fonctionne sont vibration car toutes les machines vibrent quel que soit le soin apporté aux équipements ou systèmes.

# LES ANNEXES

## II.1. Introduction

Le traitement du signal est une discipline indispensable de nos jours. Il a pour objet l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations. Son but est donc de réussir à extraire un maximum d'information utile sur un **signal** perturbé par du **bruit** ou **vibration** en s'appuyant sur les ressources de l'électronique et de l'informatique pour interpréter les signaux des capteurs

## II.2 Définition Signal

Un signal est la représentation physique de l'information, qu'il convoie de sa source à son destinataire. La description mathématique des signaux est l'objectif de la théorie du signal, elle offre les moyens d'analyser, de concevoir et de caractériser des systèmes de traitement de l'information. [12]

### II.2.2 Bruit

Un bruit correspond à tout phénomène perturbateur gênant la transmission ou l'interprétation d'un signal.

### II.2.3. Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit mesure la quantité de bruit contenue dans le signal. Il s'exprime Par le rapport des puissances du signal (PS) et du bruit (PN). Il est souvent donné en décibels (dB)

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{dB} = 10 \log \frac{P_S}{P_N}$$

## II.3. Classification des signaux

On peut envisager plusieurs modes de classification pour les signaux suivant leurs propriétés.

### II.3.1. Classification phénoménologique

On considère la nature de l'évolution du signal en fonction du temps. Il apparaît deux types de signaux :

**Les signaux déterministes** : ou signaux certains, leur évolution en fonction du temps peut être parfaitement modéliser par une fonction mathématique. On retrouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudo-aléatoires, etc...

**Les signaux aléatoires** : leur comportement temporel est imprévisible. Il faut faire appel à leurs propriétés statistiques pour les décrire. Si leurs propriétés statistiques sont invariantes dans le temps, on dit qu'ils sont stationnaires

### II.3.2. Classification énergétique

On considère l'énergie des signaux. On distingue :

**Les signaux à énergie finie** : il possède une puissance moyenne nulle et une énergie finie.

**Les signaux à puissance moyenne finie** : il possède une énergie infinie et sont donc Physiquement irréalisable

L'énergie d'un signal est : 
$$W_X = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(t)|^2 dt$$

La puissance d'un signal est : 
$$P_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |X(t)|^2 dt$$

### II.3.3. Classification morphologique

On distingue les signaux à variable continue des signaux à variable discrète ainsi que ceux dont l'amplitude est discrète ou continue

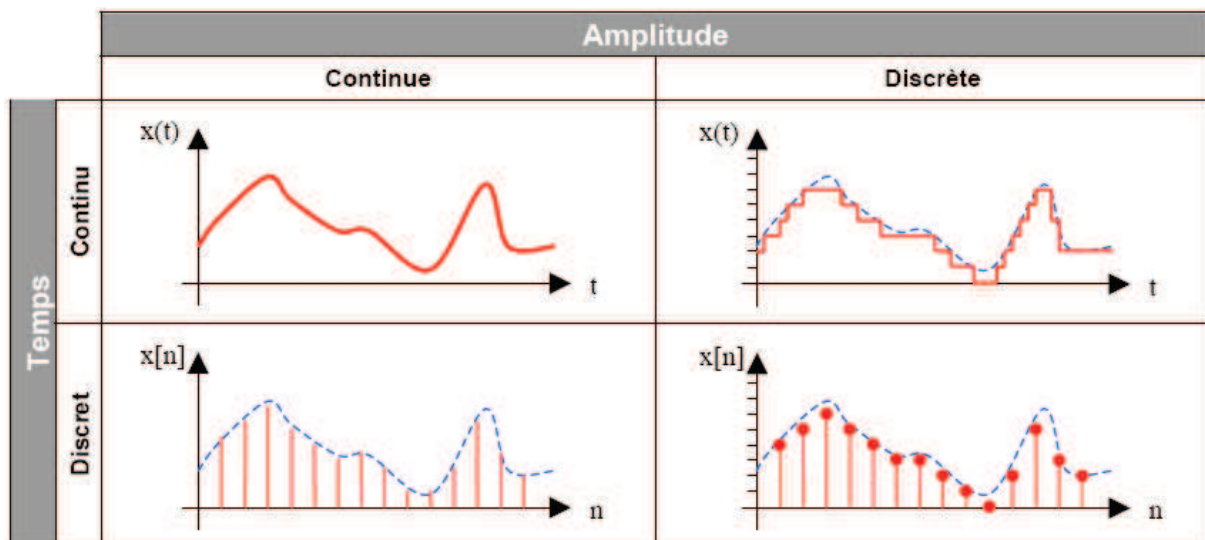


Tableau II-1- Classification morphologique des signaux [5]

On obtient donc 4 classes de signaux :

**Les signaux analogiques** : dont l'amplitude et le temps sont continus

**Les signaux quantifiés** : dont l'amplitude est discrète et le temps continu

**Les signaux échantillonnés** : dont l'amplitude est continue et le temps discret

**Les signaux numériques** : dont l'amplitude et le temps sont discrets

### II.4. Signaux particuliers

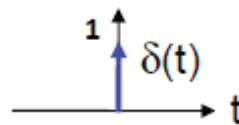
Afin de simplifier les opérations ainsi que les formules obtenues, certains signaux Fréquemment

Rencontrés en traitement du signal dispose d'une modélisation propre.

▪ **Impulsion de Dirac :**

L'impulsion de Dirac correspond à une fonction porte dont a largeur T tendrait vers 0 et dont l'aire est égale à 1 [12]

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } t = 0 \\ 0 & \text{pour } t \neq 0 \end{cases}$$



$\delta(t)$  ne peut être représenté graphiquement, On le schématise par le symbole  $\uparrow$

Le 1 marqué sur la flèche pleine représente l'aire de cette impulsion (et non la hauteur de L'impulsion), On peut encore considérer  $\delta(t)$  comme la dérivée de la fonction échelon :

$$\delta(t) = \frac{du(t)}{dt}$$

**Propriété :**

L'intégrale :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \delta(t) dt = x(0)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \delta(t - t_0) dt = x(t_0)$$

**Produit**

$$X(t) \cdot \delta(t) = X(0) \cdot \delta(t) = X(0)$$

$$X(t) \cdot \delta(t - t_0) = X(t_0) \cdot \delta(t - t_0) = X(t_0)$$

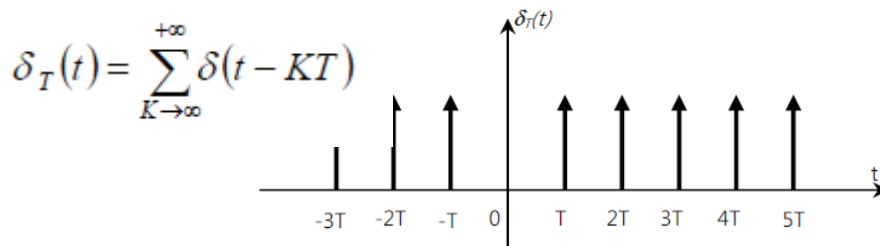
**Translation**

$$X(t) * \delta(t - t_0) = X(t - t_0)$$

$$X(t - t_1) * \delta(t - t_0) = X(t - t_1 - t_0)$$

▪ **Peigne de Dirac :**

On appelle peigne de Dirac une succession périodique d'impulsion de Dirac



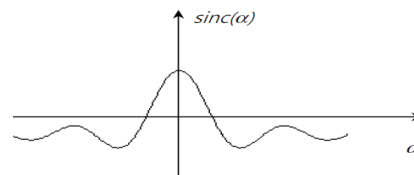
T : est la période du peigne.

Cette suite est parfois appelée train d'impulsions ou fonction d'échantillonnage.

Ce type de signal est principalement utilisé en échantillonnage.

- **Fonction sinus cardinal :** Cette fonction joue un rôle très important en traitement de signal

$$\text{sinc}(t) = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$$



Propriétés :

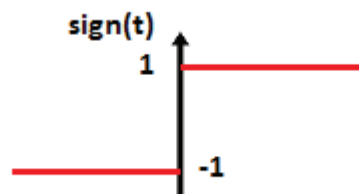
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(t) dt = 1$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{sinc}^2(t) dt = 1$$



- **Fonction signe**

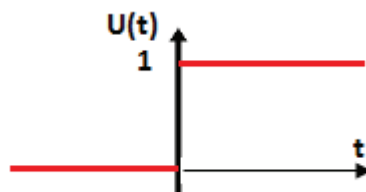
$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} -1 & \text{pour } t < 0 \\ +1 & \text{pour } t > 0 \end{cases}$$



Par convention on admet pour valeur à l'origine  $\text{sgn}(t)=0$  pour  $t=0$

- **Fonction échelon**

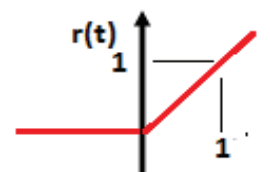
$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{pour } t < 0 \\ 1 & \text{pour } t > 0 \end{cases}$$



Par convention on admet pour valeur à l'origine  $U(t)=1/2$  pour  $t=0$ , dans certains il sera préférable de lui donner la valeur 1.

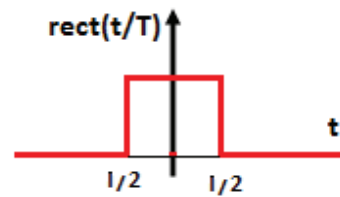
- **Fonction rampe**

$$r(t) = t \cdot u(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau$$



▪ **Fonction rectangulaire**

$$\text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) = \begin{cases} 1 & \text{pour } \left| \frac{t}{T} \right| < \frac{1}{2} \\ 0 & \text{pour } \left| \frac{t}{T} \right| > \frac{1}{2} \end{cases}$$



On l'appelle aussi fonction porte

## II. 5. Traitement du signal analogique

### II.5.1. La série de Fourier

La décomposition en **série de Fourier** permet de décomposer un signal en somme de sinusoïdes. On utilise principalement les séries de Fourier dans le cas des signaux périodiques. Elles permettent ainsi de passer facilement du domaine temporel au domaine fréquentiel. Pour pouvoir être décomposable, un signal doit être à variations bornées (Dirichlet).

Pour tout signal  $s(t)$  réel où  $s(t) = s(t+T_0)$ , on peut écrire :

$$s(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t)] \quad \left( \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \right) \quad \text{Avec}$$

$$S_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} s(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} s(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} s(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

On appelle le signal de pulsation  $\omega_0$  le fondamental.

On appelle les signaux de pulsation  $n.\omega_0$  les harmoniques de rang  $n$ .

La valeur de  $S_0$  représente la valeur moyenne de  $s(t)$  [12].

#### II.5.1.1. Autre expression :

L'écriture précédentes des séries de Fourier présente en fait peu d'intérêt physique, en effet si La fonction  $f(t)$  subit une simple translation suivante l'axe des temps alors les coefficients  $A_n$  et  $B_n$  seront modifiés. En conséquence, on cherche donc une nouvelle écriture des séries de Fourier dans laquelle la

puissance est conservée après une translation suivant l'axe des temps et où cette translation apparaîtra sous la forme d'un déphasage.

Cette nouvelle écriture s'obtient en posant

$$\begin{cases} A_n = C_n \sin \Phi_n \\ B_n = C_n \cos \Phi_n \end{cases}$$

Ainsi en remplaçant  $A_n$  et  $B_n$  dans :

$$S(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [ A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) ]$$

$$S(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n [ \sin\phi_n \cos(n\omega_0 t) + \cos\phi_n \sin(n\omega_0 t) ]$$

On obtient Alor :

$$s(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \phi_n = \arctan \frac{A_n}{B_n} \\ C_n^2 = A_n^2 + B_n^2 \end{cases}$$

### Développement des termes complexes

En introduisant la notation complexe de  $\cos(n\omega_0 t)$  et  $\sin(n\omega_0 t)$ , il est possible d'obtenir une écriture complexe de la série de Fourier.

On pose

$$\cos(n\omega_0 t) = \frac{e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}}{2} \quad \text{et} \quad \sin(n\omega_0 t) = \frac{e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}}{2j}$$

On obtient alors:

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_n e^{jn\omega_0 t} \quad \text{avec} \quad S_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} S(t) e^{-jn\omega_0 t} dt.$$

Dans les deux formes précédentes, chaque composante de fréquence était représentée par Deux coefficients. L'écriture complexe ne fait apparaître qu'un seul coefficient  $S_n$  complexe mais qui comprend bien entendu un module et une phase [12].

#### Propriétés

Si  $S(t)$  est paire  $B_n = 0$  et  $S_n = S_{-n}$

Si  $S(t)$  est impaire  $A_n = 0$  et  $S_n = -S_{-n}$

### II.5.2. Transformée de Fourier

C'est une généralisation de la décomposition de série de Fourier à tous les signaux déterministes. Elle permet d'obtenir une représentation en fréquence

(représentation spectrale) de ces signaux. Elle exprime la répartition fréquentielle de l'amplitude, de la phase et de l'énergie (ou de la puissance) des signaux considérés.

### II.5.2.1. Définition

Soit  $s(t)$  un signal déterministe. Sa transformée de Fourier est une fonction, généralement complexe, de la variable  $f$  et définie par :

$$S(f) = TF [s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Si cette transformée existe, la transformée de Fourier inverse est donnée par :

$$S(t) = TF^{-1} [s(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(f) e^{j2\pi ft} df$$

On appelle **spectre** de  $s$  le module de la transformée de Fourier de  $s$ .

### II.5.2.3. Transformée de Fourier de Dirac :

$$\begin{array}{ccc} s(t) & \xrightarrow{\text{TF}} & S(f) \\ \delta(t) & \xrightarrow{\quad} & 1 \\ \delta(t-\tau) & \xrightarrow{\quad} & e^{-2j\pi f\tau} \\ e^{-2j\pi f_0 t_0} & \xrightarrow{\quad} & \delta(f-f_0) \end{array}$$

### II.5.2.4. Égalité de Parseval :

Pour un signal d'énergie finie, l'énergie du signal est identique dans les domaines temporels et fréquentiels

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |S(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df$$

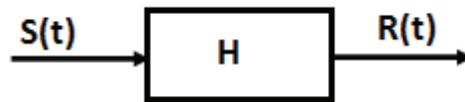
### II.5.3. Convolution

Le produit de convolution d'un signal  $s(t)$  par un autre  $h(t)$  est donné par :

$$s(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(k) h(t-k) dk$$

Le signal de sortie d'un système linéaire causal invariant dans le temps est donné par le produit de convolution du signal d'entrée et d'une fonction  $h(t)$  appelée réponse impulsionnelle.

La valeur du signal de sortie à l'instant  $t$  est ainsi obtenue par la sommation des valeurs Passées du signal d'excitation, pondérées par la réponse du système [6].



### III.9.4.7. Notion de Filtrage

Le filtrage est une forme de traitement de signal qui modifie le spectre de fréquence et/ou la phase du signal présent en entrée du filtre et donc par conséquent sa forme temporelle.

Il peut s'agir soit :

- D'éliminer ou d'affaiblir des fréquences parasites indésirables

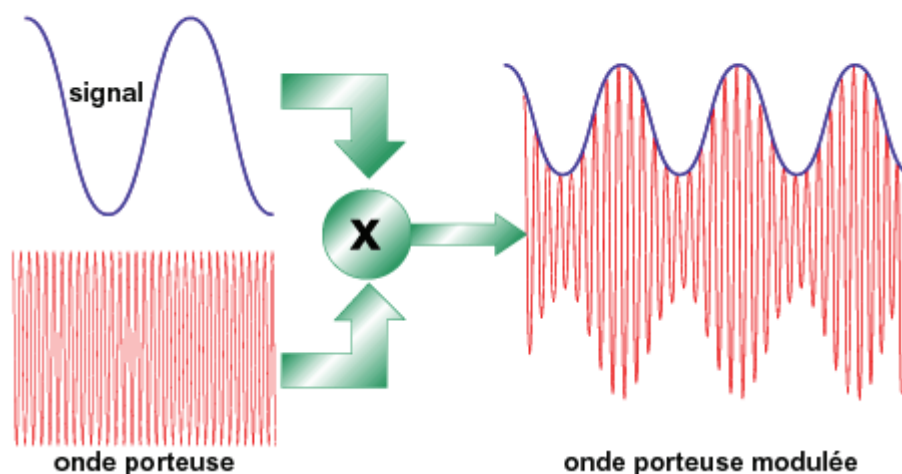
On classe les filtres en deux grandes familles :

- **Les filtres numériques** réalisés à partir de structure intégrée microprogrammable.
- **Les filtres analogiques** réalisés à partir de composants passifs (résistance, inductance, condensateur) [6]

### III.9.4.8. Notion de Modulation

Le principe de modulation d'un signal est essentiellement utilisé pour la transmission des signaux. Il permet d'adapter le message à transmettre au canal de transmission.

#### modulation d'amplitude (MA)



**FIGURE** : Modulation adaptation du signal au canal de transmission

L'objectif est de se servir d'un signal de fréquence importante pour transmettre le Message afin de réduire à des proportions raisonnables la taille des antennes. Le but de la modulation est donc de translatier le spectre d'un signal bas fréquences (BF) vers les hautes fréquences (HF).

### II.5.6. Numérisation

L'importance des systèmes numériques de traitement de l'information ne cesse de croître (radio, télévision, téléphone, instrumentation...). Ce choix est souvent justifié par des avantages techniques tels que la grande stabilité des paramètres, une excellente reproductibilité des résultats et des fonctionnalités accrues. Le monde extérieur étant par nature "analogique", une opération préliminaire de conversion analogique numérique est nécessaire. La conversion analogique numérique est la succession de trois effets sur le signal analogique de départ :

- **L'échantillonnage** a pour rendre le signal discret
- **La quantification** a pour associer à chaque échantillon une valeur
- **Le codage** a pour associer un code à chaque valeur [6].

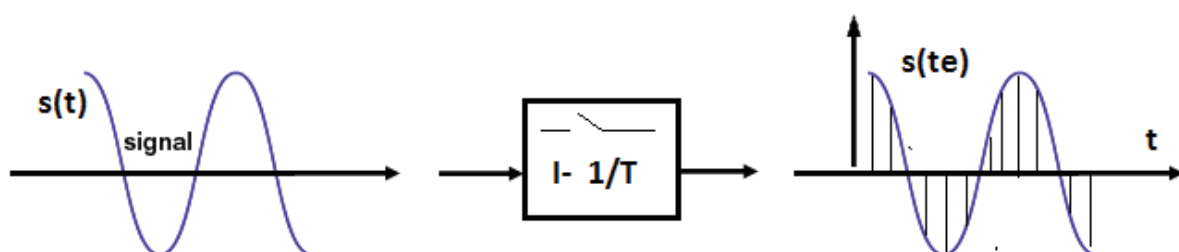
#### II.5.6.1. Échantillonnage

L'échantillonnage consiste à prélever à des instants précis, le plus souvent équidistants, les valeurs instantanées d'un signal. Le signal analogique  $s(t)$ , continu dans le temps, est alors représenté par un ensemble de valeurs discrètes :

$$S_e(t) = S(n \cdot T_e) \text{ avec } n \text{ entier}$$

$T_e$  : période d'échantillonnage.

Cette opération est réalisée par un échantillonneur souvent symbolisé par un interrupteur.



#### II.5.6.1. 2. Échantillonnage idéal

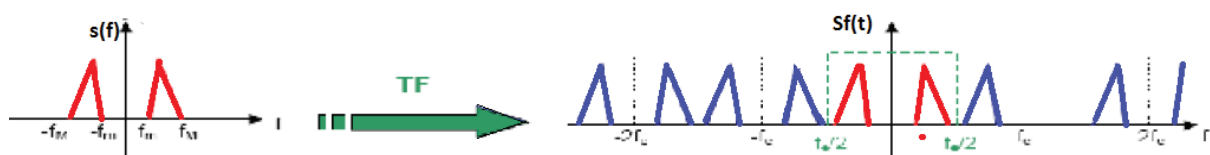
L'échantillonnage idéal est modélisé par la multiplication du signal continu  $s(t)$  et d'un peigne de Dirac de période  $T_e$

$$S_e(t) = S(t) \cdot \delta_{T_e}(t) = S(t) \sum_{n \rightarrow -\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_e) = S(nT_e) \sum_{n \rightarrow -\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_e)$$

Le spectre du signal échantillonné est donc le suivant :

$$S_e(f) = \frac{1}{T_e} \sum_{n \rightarrow -\infty}^{+\infty} S(f) * \delta(f - nf_e) \rightarrow S_e(f) = \frac{1}{T_e} \sum_{n \rightarrow -\infty}^{+\infty} S(f - nf_e)$$

On obtient donc un spectre infini qui provient de la périodisation du spectre du signal d'origine au tour des multiples de la fréquence d'échantillonnage



On voit sur le spectre du signal échantillonné qu'il est possible de restituer le signal original par un simple filtrage passe-bas, Si  $f_M$ , la fréquence maximale du spectre du signal à échantillonner, est supérieure à  $f_e/2$ , la restitution du signal original sera impossible car il va apparaître un recouvrement spectral lors de l'échantillonnage. On dit qu'on est en sous-échantillonnage



Le théorème de SHANNON montre que la reconstitution correcte d'un signal nécessite que la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  soit au moins deux fois plus grande que la plus grande des fréquences  $f_M$  du spectre du signal :  **$f_e > 2f_M$**

### II.5.6.1. 3. Échantillonnage réel

En pratique, l'échantillonnage s'effectue en commandant un interrupteur par un train d'impulsions étroites. Il est donc impossible d'obtenir des échantillons de durée quasiment nulle. La modélisation de l'échantillonnage par un peigne de Dirac est donc erronée. En fait, chaque impulsion va avoir une durée très courte  $\tau$ . L'échantillonnage peut donc être modélisé par la multiplication du signal par

une suite de fonction rectangle (ou porte) de largeur  $\tau$ , L'expression du signal d'échantillonnage devient donc :

$$y(t) = \sum_{k \rightarrow -\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t - kT_e}{\tau}\right) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{k \rightarrow -\infty}^{+\infty} \delta(t - kT_e)$$

Et par conséquent, sa transformée de Fourier est égale à :

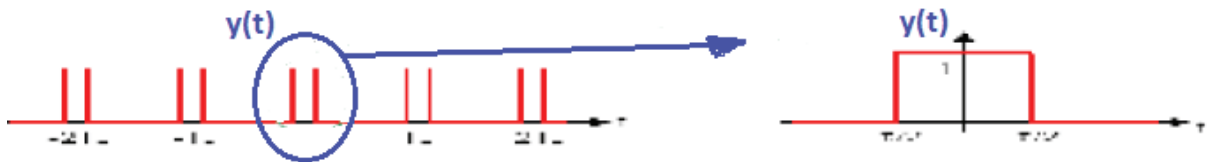
$$Y(f) = \tau \text{sinc}(\tau f) \cdot \frac{1}{T_e} \sum_{k \rightarrow -\infty}^{+\infty} \delta(f - kf_e)$$

Comme l'expression du signal échantillonné est :  $S_e(t) = S(t) \cdot y(t)$   
Sa transformée de Fourier

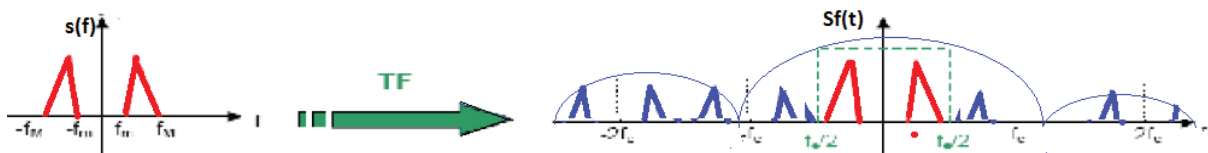
$$S_e(t) = S(t) \times y(t) = S(f) * \frac{\tau}{T_e} \sum_{k \rightarrow -\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\tau f) \cdot \delta(f - kf_e)$$

$$S_e(f) = \frac{\tau}{T_e} \text{sinc}(\tau f) \cdot \sum_{k \rightarrow -\infty}^{+\infty} S(f - kf_e)$$

On retrouve la même allure de spectre modulé en amplitude par une fonction en sinus cardinale



Pour se rapprocher d'un échantillonnage idéal et qu'ainsi le signal soit facilement Reconstructible, il faut que  $\tau$  soit le plus petit possible. Dans le cas où  $\tau$  est du même ordre de grandeur que  $f_e$ , il faudra  **$f_e \gg 2f_M$** .



### II.5.6.2. Quantification

La quantification consiste à associer à une valeur réelle  $x$  quelconque, une autre valeur  $x_q$  appartenant à un ensemble fini de valeurs et ce suivant une certaine loi : arrondi supérieur, arrondi le plus proche, etc...L'écart entre chaque valeur

**xq** est appelé pas de quantification, le fait d'arrondir la valeur de départ entraîne forcément une erreur de quantification que l'on appelle le bruit de quantification.

**II.5.6.3. Codage :**

Le codage consiste à associer à un ensemble de valeurs discrètes un code composé d'éléments binaires. Les codes les plus connus : code binaire naturel, code binaire décalé, code complément à 2, code DCB, code Gray

**II. 6. Traitement du signal numérique**

Le traitement numérique de l'information apporte de nombreux avantages techniques ainsi qu'une flexibilité accrue dans beaucoup de domaine. Le traitement du signal par transformée de Fourier pose cependant un certain nombre de problèmes. En effet un ordinateur ne peut traiter que des signaux numériques, ceux-ci sont obtenus après un échantillonnage et une Quantification. Leur étude devra tenir compte des effets induits sur le spectre par ces deux techniques. De plus, un calcul de transformée de Fourier est une somme d'une infinité d'échantillons. Le temps nécessaire ainsi que la mémoire de l'ordinateur vont forcément emmener certaines contraintes à ce niveau.

**II. 6 .1. Transformée de Fourier d'un signal discret**

Un signal discret est défini par une suite d'échantillons espacés entre eux d'une période  $T_e$ . La transformée de Fourier appliquée à un signal discret  $x[n]$  devient donc :

$$X(f) = \sum_{n \rightarrow -\infty}^{+\infty} x[n] \cdot e^{-2j\pi \frac{nf}{F_e}}$$

Si cette série converge, la transformée de Fourier

inverse est définie par :

$$X(n) = \frac{1}{F_e} \int_{-F_e/2}^{F_e/2} X(f) \cdot e^{2j\pi \frac{nf}{F_e}}$$

On vérifie bien que X(f) est une fonction

périodique de période  $F_e$  (à cause de L'échantillonnage). Si on remplace  $f$  par  $(f + k.F_e)$  :

$$e^{-2j\pi \frac{n(f+K.F_e)}{F_e}} = e^{-2j\pi \frac{nf}{F_e}} + e^{-2j\pi \frac{nK.F_e}{F_e}} = e^{-2j\pi \frac{nf}{F_e}}$$

### II. 6 .2. Fenêtrage

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la transformée de Fourier d'un signal discret. En effet il faudrait un temps et une mémoire infinis Pour ces raisons, on est toujours amené à travailler avec un nombre fini de points N. Cela revient à dire que les signaux exploités numériquement sont toujours une troncation de signaux réels. On construira donc un signal tronqué  $x_T[n]$ . N

Résulte de la multiplication des échantillons de  $x[n]$  par une fenêtre d'analyse (ou encore fenêtre de troncature) qui limitera  $x_T[n]$  à N échantillons. En pratique,

On calcule donc :

$$X_T(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_T[n] \cdot e^{-2j\pi \frac{nf}{F_e}}$$

### II. 6 .3. Échantillonnage en fréquence

En fait, lorsque l'on veut pouvoir représenter le spectre  $X_T(f)$ , il faut calculer  $X_T(f)$  pour toutes les valeurs de f (f est une variable continue), Ceci est impossible avec un ordinateur ou un **DSP** qui ne peuvent traiter que des valeurs de f discrètes. Comme  $X_T(f)$  est périodique de période  $F_e$ , on découpe donc cet intervalle en M parties égales et on ne calcule  $X_T(f)$  que pour les multiples de  $F_e/M$  : on effectue un échantillonnage fréquentiel de pas  $\Delta f = F_e/M$ . On remplace donc f par  $\Delta f$  et le calcul de la transformée de Fourier devient :

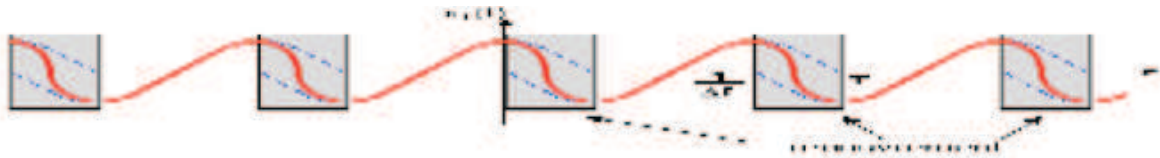
$$X_T[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x_T[n] \cdot e^{-2j\pi \frac{n.K.\Delta f}{F_e}} \quad \text{pour } K = [0, 1, 2, \dots, M-1]$$

$$X_T[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x_T[n] \cdot e^{-2j\pi \frac{n.K}{M}} \quad \text{pour } K = [0, 1, 2, \dots, M-1]$$

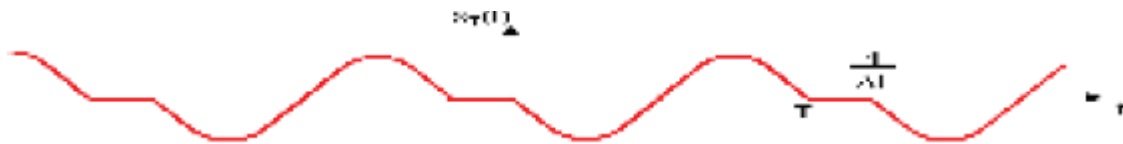
On vient ainsi d'introduire la transformée de Fourier discrète. Le problème réside dans le choix du pas d'échantillonnage en fréquence et donc du choix de M. En effet, le fait d'échantillonner en fréquence revient à périodiser dans le domaine temporel la partie du signal qui a été tronquée

$$X_T[K] = \sum_{K \rightarrow -\infty}^{+\infty} x_T(f) \cdot \delta(f - K \cdot \Delta f) \quad \xrightarrow{\text{TF}^{-1}} \quad \sum_{r \rightarrow -\infty}^{+\infty} X_T(t) \cdot \delta\left(t - \frac{r}{\Delta f}\right)$$

Ainsi, suivant le choix de  $\Delta f$ , plusieurs cas peuvent se présenter lors de la reconstitution du signal dans le domaine temporel à partir de son spectre échantillonné :  $\Delta f > 1/T$  : La résolution spectrale  $\Delta f$  est trop grande. On a un recouvrement dans le domaine temporel. C'est un peu Shannon à l'envers : si on choisit une résolution spectrale trop grande, on ne peut pas reconstituer le signal dans le domaine temporel correctement



$\Delta f < 1/T$  : Il n'y aura plus de repliement temporel, mais des intervalles durant lesquels le signal dont on calcule le spectre sera nul...



$\Delta f = 1/T$  : On a un signal périodique idéal. On périodise la fenêtre temporelle choisie avant le calcul spectral.



En pratique, on choisira donc toujours  $\Delta f$  de telle sorte à avoir  $\Delta f = 1/T$ . Comme

$$T = N \cdot T_e \quad \text{et} \quad \Delta f = \frac{F_e}{M}$$

on en déduit que 
$$\frac{F_e}{M} = \frac{1}{N \cdot T_e} \Rightarrow M = N :$$

Ainsi, la définition de la transformée de Fourier discrète devient :

$$X_T[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x_T[n] \cdot e^{-2j\pi \frac{n \cdot K}{N}} \quad \text{pour } K = [0, 1, 2, \dots, N-1]$$

**A  $F_e$  fixe**, plus la durée d'acquisition sera longue et plus la résolution en fréquence sera fine, **A  $N$  fixe**, plus  $F_e$  sera importante et plus la condition de Shannon sera respectée mais moins la résolution en fréquence sera fine et la durée d'acquisition longue.

**II. 6 .4. Notion de transformée de Fourier rapide :**

Pour obtenir une valeur particulière de  $X_T[k]$ , il faut par exemple : Pour  $n = 0$  :

$$X_T[K] = (x_T[0] \cdot \cos(0) - x_T[0] \cdot j \sin(0))$$

$$X_T[K] = (x_T[0] \cdot \cos(0) - x_T[0] \cdot j \sin(0)) + \left[ x_T[1] \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - x_T[1] \cdot j \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \right]$$

2 produits complexes et 1 somme complexes Pour  $n=1$

4 produits complexes et 3 sommes complexes : Pour  $n = N-1$  :

$2N$  produits complexes et  $2(N-1)$  sommes complexes. Ainsi, pour obtenir les  $N$  valeurs de  $X_T[k]$  il faut donc  $2N^2$  multiplications et  $2(N-1) N$  additions.

Par exemple, un signal où  $N=1024$  échantillons (soit 1ko en mémoire si chaque échantillon est code sur 8 bits), le nombre de multiplications est de *2 097 152* et celui des additions de *2095 104* On arrive très vite à des temps de calcul très longs. Si ces durées ne sont pas gênantes pour des traitements en temps différé, il n'en est pas de même en temps réel. En effet, plus le temps de calcul sera important et plus la fréquence maximale du signal à analyser sera réduite (Shannon).

Pour pouvoir utiliser la transformée de Fourier discrète en temps réel, on dispose D'algorithmes de calcul permettant d'obtenir les résultats beaucoup plus rapides sous certaines conditions, Ces algorithmes sont connus sous le nom de Transformée de Fourier Rapide (**TFR**) ou Fast Fourier Transform (**FFT**). L'algorithme le plus connu est celui de Cooley-Tuckey.

**II. 6 .4.1. Présentation à l'algorithme de Cooley-Tuckey :**

On pose : 
$$X[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{nk} \quad \text{avec} \quad W_N = e^{\frac{-2j\pi}{N}}$$

**Propriétés de  $W_N$  :** 
$$W_N^{2nk} = e^{\frac{-2j\pi nk}{N/2}} = W_{N/2}^{nk}$$

$$W_N^{nk+N/2} = e^{\frac{-2j\pi(nk+N/2)}{N}} = -W_N^{nk}$$

La condition d'utilisation est d'avoir un nombre d'échantillons puissance de 2 :  $N=2^m$  Si on effectue un dédoublement temporel en séparant les indices paires et impaires :

$$\begin{cases} X_1[n] = X[2n] \\ X_2[n] = X[2n+1] \end{cases}$$

En exploitant les propriétés de WN, on trouve alors :

$$\text{Pour } 0 \leq k \leq \frac{N}{2} - 1 \begin{cases} X[k] = X_1[k] + W_N^k \cdot X_2[k] \\ X\left[k + \frac{N}{2}\right] = X_1[k] - W_N^k \cdot X_2[k] \end{cases}$$

Le coût de calcul passe de l'ordre de  $N^2$  à  $N \log_2(N)$ .

Tableau 0-1 : Usage général selon la puissance et la suspension ISO 2372

$V_{eff}$ [mm/s]	Types de Machines							
	$15 \leq P \leq 300kW$ (1) $160 < H < 315mm$ (2)		$0.3 \leq P \leq 50MW$ (1) $H > 315mm$ (2)		Pompes $P > 15kW$		Motopompes $P > 15kW$	
	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple
0.0 à 1.4	A	A	A	A	A	A	A	A
1.4 à 2.3	B	A	A	A	A	A	B	A
2.3 à 2.8	B	B	B	A	B	A	B	B
2.8 à 3.5	C	B	B	A	B	A	C	B
3.5 à 4.5	C	B	B	B	B	B	C	B
4.5 à 7.1	D	C	C	D	C	B	D	C
7.1 à 11.0	D	D	D	C	D	C	D	D
11.0 à ...	D	D	D	D	D	D	D	D

(1) P Puissance des machines industrielles autres que les pompes ou motopompes  
 (2) H Hauteur d'arbre des moteurs électriques

- A : Bon
- B : Acceptable
- C : A peine tolérable pour fonctionnement de courte durée
- D : Vibration suffisamment importantes pour endommager la machine à court terme.

Tableau 0-2 : Usage général selon la puissance et la suspension ISO 2372

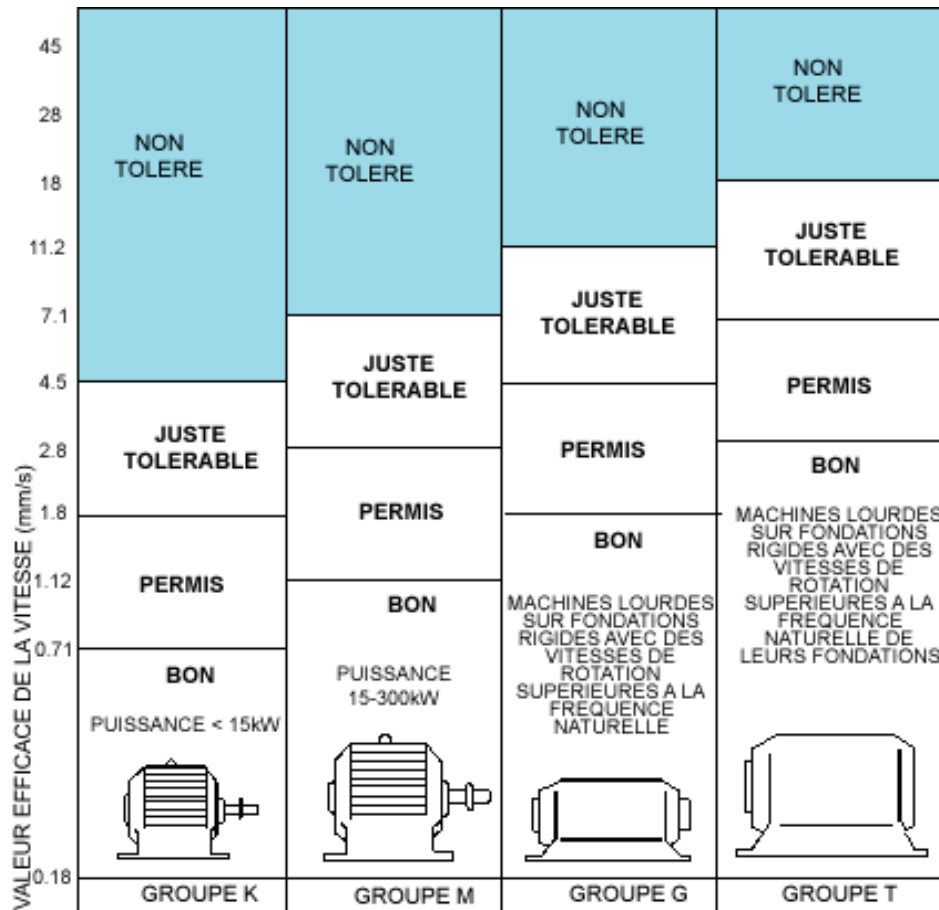


Tableau 0-3 Schéma d'appréciation de la sévérité

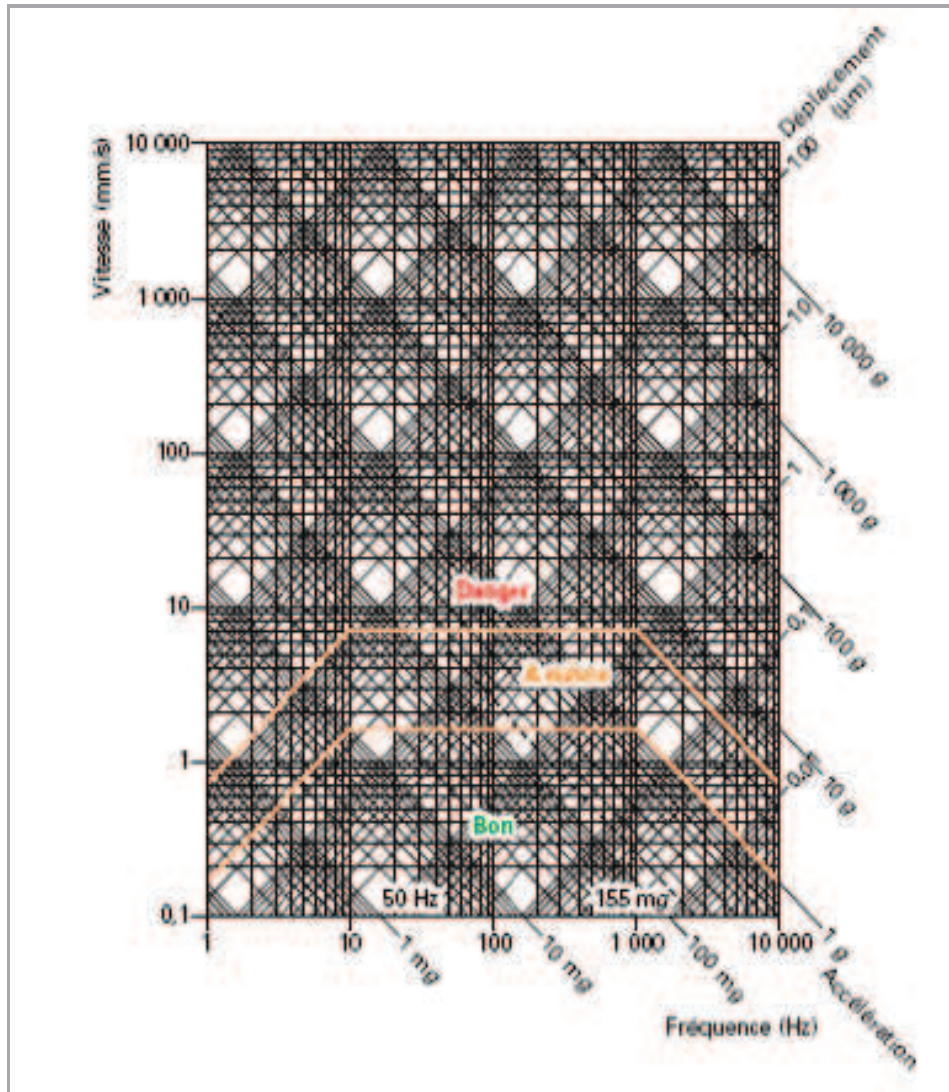


Tableau 0-4 Schéma d'appréciation de la sévérité des facteurs défauts

Accélération efficace (g)	Sévérité
<0.3	Excellent
0.3 à 1	Bon
1 à 3	Correct
3 à 6	Pré-alarme
6 à 10	Alarme d'urgence
>10	Arrêt d'urgence

## BIBLIOGRAPHIE

**[(smith/R.keith, 2003)]** R. Smith/R. Keith, Industrial Machinery Repair: Best Maintenance Practices Pocket Guide, BUT (J-P, 2010)TERWORTH–HEINEMANN, 2003

**[(J-P, 2010)]** F. Monchy J-P. Vernier, maintenance Méthodes et organisations 3<sup>e</sup>édition, DUNOD, ISBN 978-2-10-055061-6, 2010.

**[(CF)],** infra, dictionary

**[(OXFORD)]** *The Oxford Talking Dictionary*

**[(MERZOUG, 2005)]** Mr. MERZOUG, cours-les outilles de la maintenance, université de SOUK-AHRASS 2005

**[(IMAM, Z. (2015)]** Thèse de Ziad Imam, université de Lille

**[(Y, T. B. (2007)]** B.TABET/Y.MOUHAMED, mémoire analyse FMD d'compresseur à piston

**[(Bou.98\_a),** Diagnostic vibratoire en maintenance, préventive, Dunod, 1998.

**[(Bou.98\_b)]** A. Boulenger et C. PACHAUD, Surveillance des machines par analyse des Vibrations, Du dépistage au diagnostic, AFNOR, DUNOD 1998.

**[(A. Bou/C. pa.009\_1)]** aide-mémoire surveillance des machines par analyse des vibrations, DUNOD,2009.

**[(R. BIG /J.L. f)]** R. BIGRET /J.L. FERON, diagnostic-maintenance-disponibilité des machines tournante, MASSON ,2007.

**[(Y.FERGANI/A.MESSGUEM.06)]** mémoire fin d'études diagnostic vibratoire d'un installation motopompe, UNIV SOUK-AHRAS,2006.

**[(B. MER. 06)]** Mr : B. MERZOUG, Cours Analyse vibratoire en maintenance UNIV SOUK-AHRAS, 2006.

**[(A. SAMIEH.15)]** the utilisation of information available in a sensor less control system of an ac SAMIEH A, UNIV HUDDERSFIELD REPOSITORY, 2015.

**[(Torsional Vibration Effects on Induction)]**

[M. HACHEMI,] Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration Mr. HACHEMI Mohammed, UNIV TLEMCEM.

[J. AUVRAY.01] : Traitement du signal (cours), Université Pierre et Marie Curie IST SETI, 2001 Guide de la maintenance, DANIEL BOITEL et CLAUDE HAZARD, Edition Nathan 1990.

[F. COULON.] : Théorie et traitement des signaux (Traité d'électricité VOL VI), Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL

[PIRANDA J.03] : "Analyse modale expérimentale", Les techniques de l'ingénieur ", R 6 180, (2003)

## TRAVAUX CITÉS

A, S. (2015). THE UTILISATION OF INFORMATION AVIALABLE IN A SENSORLESS CONTROL SYSTEM OF AN AC.

F.YACINE, M. (2006). *Daignostic vibratoir d'une installation motopompes*. UNIVERSITE DE SOUK-AHRAS.

fethi, k. (2009). *l'analyse vibratoire*. UNIVERSITE DE SKIKDA.

GL1K. (2018). RAPORT GENERAL DE L'ANNEE 21018 DU POLE GL1K. SKIKDA, FORMATION.

IMAM, Z. (2015). L'INTEGRATION DE LA MAINTENANCE DANS LA CONCEPESION DES SYSTEMES AUTOMATISEE. UNIVER DE LILLE.

JEAN-PIERRE, F. M. (2010). *MAINTENANCE METHODES ET ORGANISATIONS*. 3e DUNOD.

MERZOUG, B. (2005). COURS LES OUTILES DE LA MAINTENANCE. UNIVERSITE DE SOUK-AHRAS.

mouhamed, h. (2012). *Application de l'ODS à l'analyse des problèmes de vibration*. univer de tlemcen.

R.BIGRET, J.-L. (1994). *Diagnostic-maintenance-disponibilité des machines tournantes*. MASSON.

www.larousse.fr. (s.d.). *www.larousse.fr*. Récupéré sur *larousse.edu.fr*.

Y, T. B. (2007). ANALYSE FMD D'UN COMRESSEUR . UNIVERSITE DE SOUK-AHRAS.

GL1K. (2018). RAPORT GENERAL DE L'ANNEE 21018 DU POLE GL1K. SKIKDA, FORMATION.

[YCI 01] Mesure et analyse des vibrations des machines électriques tournantes

[Kos-13] Détection des défaillances par analyse vibratoire sur un groupe électro pompe

## ملخص:

هذه الدراسة متعلقة بوضع إستراتيجية تعتمد الصيانة الصناعية الوقائية الشرطية عن طريق التحليل الاهتزازي للألات أو الأنظمة الكهروميكانيكية، هذه التقنية تحتل مكانه مهمه في مجال الصيانة الوقائية الشرطية والتي أصبحت تحتل يوما بعد يوم مكانة كبيرة من أجل تطوير وزيادة قدرات الآلات الإنتاجية حيث يمكن اتباع منهجية تجريبية للمراقبة تساعد على إيجاد وتشخيص أعطاب الماكينات الدوارة، أو الأنظمة الكهروميكانيكية ومن ثم إيجاد سبب الأعطاب واستخلاصها بشكل استباقي قبل أن تتطور وتسبب توقف كلي للألات.

في هذا العمل نطرح منهجية استباقية تطبيقية للتحليل الاهتزازي في مجال الصيانة التنبؤية وفق عدة أساليب تعتمد أساسا على تحليل نتائج إشارة الحساسات المخصصة لالتقاط كمية الاهتزاز وفق مجال موجات محددة تخص كل واحدة جزء او عطل محدد من الالة تسمح بمعرفة مدي انتشار وتطور وقوة وتأثير كل جزء او عطل على حدي مما يسمح بتشخيص مبكر حيث كان لنا شرف تطبيقه على وحدة تسخين الزيت بمركب تكرير الغاز الطبيعي سكيكدة غ م 1 ك.

في هذه الرسالة اقترحنا عدة طرق لمتابعة وتشخيص أعطاب مضخات الزيت وكذا توابعها عبر متابعة منحنيات الاتجاه الزمني للاهتزاز وكذلك التحليل الطيفي لنتائج وعدة تحاليل وتقنيات خاصة يمكنها تحديد وبدقة مكان العطل ومدي تأثيره على المنحى العام للعملية وذلك بالاعتماد على التجارب المطبقة على مستوى شركة غ م 1 ك وباستعمال وسائل جد متطورة لكشف الاعطاب بالإضافة إلى لاقطات الاهتزازات الموضوعه على مستوى مساند المضخات مكننا من كشف الحالة العامة للوحه.

وبالنسبة للنتائج التي تحصلنا عليها قد كانت توضيح للحالة الصحية الكاملة لوحدة ضخ الزيت الساخن هذا ما يجعلها فعالة في حال احترمت الجهة الوصية بتنفيذ ما توصلنا اليه وفق معايير الجودة المطلوبة مما يجعل تدخلاتنا فعالة من أجل إعادة الوحدة إلى حالة جيدة وتساعد في المستقبل على تطوير الكفاءات المهنية، وكسب الوقت وجعل الوحدة أكثر إنتاجية ومردودية وكفاءة.

## ABSTRACT:

This study is related to the development of a strategy for the industrial preventive maintenance through the analysis of vibration of the machines or electromechanical systems, this technology occupies an important place in the field of preventive maintenance conditionality, which has become day after day a great place to develop and increase the capabilities of production machinery where the experimental methodology of observation make Helps to find and diagnostic of rotary machine defects, or electromechanical systems, and then find the cause of the defects and draw them proactively before they develop and can cause a stop of the system machine.

in this work we propose an active approach to vibrational analysis in the field of predicted maintenance according to several methods based mainly on the analysis of the results sensor signal allocated in spatial places to capture the amount of vibration according to the frequency field belonging to each part or specific malfunction of the machine that allows to put an early diagnosis where we had apply it to the oil heating unit of the natural gas refining complex **Skikda GL1K**. we have suggested several ways to follow up and diagnosis oil pump faults and their related accessories by Following time signal vibration, and spectrum analysis or special analyses and techniques that can determine the accuracy of the location of the fault, depending on condition of vibrations.

for the results we have obtained, it has been possible to clarify the complete health status of the hot oil pump unit. This will make it effective if the implementation of what we have achieved according to the required quality standards respected the implementation of what we have achieved according to the required quality standards, in order to restore the unit to a good state.