



UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB - BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Détection des défauts sur une machine tournante

Par analyse vibratoire

Promoteur :

Mr. MEGHATRIA M'hamed

Réaliser par :

HADJ MEHDI Nour el islam

SAF Rabah

Promotion: 2022/2023

Remerciement

En tout premier lieu, nous remercions **Allah**, le tout puissant, d'avoir nous donner la force, la volonté, la patience, ainsi que le courage pour dépasser toutes les difficultés rencontrer en terme de notre travail.

Nous tenons à remercier Mr.MEGHATRIA M'HAMED pour avoir accepté de nous encadrer dans cette étude, pour leur soutien, leurs conseils judicieux et leur grande bien vaillance durant l'élaboration de ce travail.

Toutes les ingénieurs de la cimenterie de Meftah (SCMI) qui ont contribué au succès de notre stage et qui m'en aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous remercions Spécialement notre Familles qui a toujours été là pour nous, pour leur soutien constant, inconditionnel et leur encouragement ont été d'une grand aide.

Enfin Nous tenons à adresser nos profonds remerciements à tous les personnes qui ont participé de loin ou de près au succès de notre travail.

Résumé :

L'objectif de cette étude est de diagnostiquer une machine tournante «ventilateur de fumée VF » en utilisant l'analyse vibratoire afin de détecter et ensuite éliminer les défauts associés que peut présenter cette machine après un certain temps de fonctionnement. Les mesures enregistrées et analysées ont indiqué que la machine présente un défaut de balourd, associé à un désalignement.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو تشخيص آلة دوارة «مروحة السحب» باستخدام طريقة تحليل الاهتزازي من أجل الكشف عن الأعطال المرتبطة بهذه الآلة والقضاء عليها ، القياسات المسجلة وتحليلها ابلاغتنا بتلواجد الاعطاب التالية:

اللاتوازن ، اختلال في المحاذاة ورد الفعل العكسي.

Abstract:

The objective of this study is to diagnose a "VF smoke fan" rotating machine using vibration analysis in order to detect and then eliminate the associated faults that this machine may present after a certain operating time. The measurements recorded and analyzed indicated that the machine has an unbalance fault, associated with misalignment.

Liste des symboles

HZ: hertz

F : fréquence

T : période

A(t) : amplitude

Ac : amplitude crête

Ac-c : amplitude crête- crête

Aeff : amplitude efficace

X(t) : déplacement

V(t) : vitesse

γ (t) : accélération

mm/s : unité de vitesse (millimètre par seconde).

m/s²: unité d'accélération (mètre par seconde au care).

g : unité d'accélération

mV/g : sensibilité de capteur (millivolts par g)

pc/g : sensibilité de capteur (pico-coulomb par g)

tr/min : tour par minute

Kw: kilowatt

C°: degree Celsius

FFT: fast Fourier transform

Fc : facteur de crête

K: valeur de kurtosis

RMS: Root Mean Square.

CAN : convertisseur analogique/numérique

CCF : capteur inductif à courants de Foucault

NG : Niveau global

NGX : Niveau global Déplacement

NGV : Niveau global Vitesse

NGA : Niveau global Accélération

BF : base fréquence

MF : moyen fréquence

HF : haute fréquence

ICP: integrated circuit –peizoelectric.

IR: infrarouge

mAh: milliampère-heure

KHz: kilo-hertz

IrDA: infrared data association

Ip: ingress protection

Vf1: ventilateur de fumée 1

La norme : ISO10816.

La norme : ISO2954.

La norme : CE

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Exemple de surveillance à mettre en œuvre.....	5
Tableau 1.2 : Comparaison entre les différentes techniques de surveillance.....	15
Tableau 2.1 : Avantages, inconvénients des accéléromètres.....	29
Tableau 3.1 : Caractéristiques générale de SKF (CMAS100-SL).....	39
Tableau 3.2 : Caractéristiques et avantages de (movipack 01dB-s'tell).....	41
Tableau 3.3 : Niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération.....	46
Tableau 3.4 : Niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération.....	57

Liste des figures

Figure 1.1 : Composants d'une machine tournante	3
Figure 1.2 : Différents organes d'une machine tournante	5
Figure 1.3 : Défaut de balourd dans un rotor	6
Figure 1.4 : Modélisation d'un balourd	7
Figure 1.6 : Balourd statique	8
Figure 1.7 : Balourd dynamique	8
Figure 1.8 : Spectre caractéristique de balourd	9
Figure 1.9 : Types de délignage	9
Figure 1.10 : Spectre caractéristique de délignage	10
Figure 1.11 : Spectre caractéristique de défaut de roulement	11
Figure 1.12 : Spectre caractéristique de défaut d'engrenage	12
Figure 2.1 : Système masse-ressort	17
Figure 2.2.a : Signal sinusoïdal	19
Figure 2.2.b : Signal sinusoïdal modulé en	19
Figure 2.3.a : Signal impulsionnel périodique représentant la réponse du mode fondamental de bague de roulement de fréquence 3000 Hz	20
Figure 2.3.b : Signal impulsionnel périodique représentant la réponse du mode fondamental de bague de roulement de fréquence 9000 Hz	20
Figure 2.4.a : Signal impulsionnel aléatoire	20
Figure 2.4.b : Signal impulsionnel mixte	20
Figure 2.5 : Signal temporel « brut » délivré par un accéléromètre fixé sur un des paliers MV d'un réducteur	21
Figure 2.6 : Décomposition d'un signal temporel en ses deux Composantes harmoniques	22
Figure 2.7 : Représentation temporelle des différentes composantes D'un signal Complexe	22
Figure 2.8 : Représentation spectrale des différents composants Du signal Donné en figure 2.7	23
Figure 2.9 : Exemples de conversion temps/fréquences d'un signal temporel.....	23

Figure 2.11 : Principe du capteur inductif à courants de Foucault	27
Figure 2.12 : Schéma de principe d'un vélocimètre	28
Figure 2.13 : Principe de fonctionnement d'un accéléromètre	28
Figure 3.1 Représentation de palier de ventilateur	35
Figure 3.2 Représentation d'arbre de ventilateur	36
Figure 3.3 Représentation d'accouplement de ventilateur	36
Figure 3.4 Représentation de roulement de ventilateur	37
Figure 3.5 Représentation turbine de ventilateur	37
Figure 3.6 Représentation de ventilateur fumée	38
Figure 3.7 SKF vibropen (CMAS100-SL)	38
Figure 3.8 Accéléromètre piézoélectrique	40
Figure 3.9 Câble connecteur d'accéléromètre	40
Figure 3.10 Collecteur analyseur (movipack 01dB-s'tell)	41
Figure 3.11 System 1	42
Figure 3.12 Schéma Cinématique et Points de Mesures de la Machine	43
Figure 3.13 Palier N°4	43
Figure 3.14 Palier N°3	43
Figure 3.15 Les positions de mesure sur le palier N°3	44
Figure 3.16 Enregistrement des mesures sur le palier N°3	44
Figure 3.17 La norme ISO 10816-3	45
Figure 3.18 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A)	47
Figure 3.19 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction horizontale, illustre un balourd important sur lui	47
Figure 3.20 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction verticale, illustre un désalignement sur lui	48
Figure 3.21 Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A)	49

Figure 3.22 Spectrale logarithmique (moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3, met en évidence un défaut de jeu sur les portées de roulement sur l'arbre ou sur le palier.....	49
Figure 3.23 Spectrale temporaires prise sur le palier N°3, de la turbine en trois directions (H, V, A)	50
Figure 3.24 Spectrale temporaires prise sur le palier N°3 dans la direction horizontale, illustre impact de défaut de balourd lui	50
Figure 3.25 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V)	51
Figure 3.26 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en direction horizontale, démontre l'intensité du balourd	51
Figure 3.27 Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V)	52
Figure 3.28 Spectrale logarithmique ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°4	52
Figure 3.29 Colmatage de la matière sur la turbine	54
Figure 3.30 Sableuse	55
Figure 3.31 Tamis	55
Figure 3.32 Compresseur.....	55
Figure 3.33 Turbine décolmater	56
Figure 3.34 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°03 dans la direction horizontale, démontre la diminution de l'intensité du balourd sur la bande basse fréquence	58
Figure 3.35 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°03 dans la direction verticale, changement du comportement sur la bande basse fréquence	58
Figure 3.36 Image spectrale temporaire superposé prise sur le palier N°03 dans la direction horizontale, démontre la disparition du choc	59
Figure 3.37 Spectrale linéaire en cascade (base fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en directions horizontale	59
Figure 3.38 Spectrale linéaire en cascade (moyen fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A)	60
Figure 3.39 Courbe de tendance sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en accélération «g »	60

Figure 3.40 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°04 dans la direction horizontale, démontre la diminution de l'intensité du balourd sur la bande moyenne	61
Figure 3.41 Spectrale linéaire en cascade (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en directions horizontale	61
Figure 3.42 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V), Illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en vitesse « mm/s ».....	62
Figure 3.43 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en accélération «g »	62

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralité sur les machines tournantes	
1.1 Machines tournantes	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Description des machines tournantes	3
1.1.3 Classement « VIS » des machines tournantes	5
1.2 Principaux défauts des machines tournantes	6
1.2.1 Défaut de balourd (déséquilibre)	6
1.2.1.1 Les causes du balourd	7
1.2.1.2 Les différents types de balourd	8
1.2.1.2.1 Balourd statique	8
1.2.1.2.2 Balourd dynamique	8
1.2.2 Le défaut d'alignement	9
1.2.2.1 Les causes de délignage	9
1.2.3 Défaut de roulement	10
1.2.3.1 Les causes de dégradation de roulements	11
1.2.4 Défaut d'engrenage	11
1.2.4.1 les causes de défaut d'engrenage	12
1.3 Les techniques de surveillance	13
1.3.1 L'analyse vibratoire	13
1.3.1.1 Les différents défauts détectés par l'analyse vibratoire	14
1.3.2 La thermographie infrarouge	14
1.3.3 L'analyse des huiles	14
1.3.4 L'analyse par ultrasons	15
1.3.5 Comparaison des techniques de surveillance	15
Chapitre 02 : L'analyse vibratoire	
2.1 CARACTÉRISATION D'UNE VIBRATION	17
2.1.1 La fréquence	17
2.1.1.1 Relation entre fréquence et période	18

2.1.2 L'amplitude	18
2.1.2.1 Les trois grandeurs représentatives de l'amplitude	18
2.1.2.2 Relations entre déplacement, vitesse et accélération	19
2.1.3 Quelques formes de signaux vibratoires typiques	19
2.2 REPRÉSENTATION ET TRAITEMENT D'UN SIGNAL	21
2.2.1 Représentation temporelle	21
2.2.2 Représentation en fonction de la fréquence (représentation spectrale)...	22
2.3 LA CHAÎNE DE MESURE	25
2.3.1 Les capteurs	25
2.3.1.1 Les capteurs relatifs	26
2.3.1.2 Les capteurs absolus	27
2.4 DIFFÉRENTS STRATEGIES DE SURVEILLANCE	29
2.4.1 La surveillance par suivi d'indicateurs sélectionnés	30
2.4.1.1 Notions de seuil et d'indicateur	30
2.4.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « Larges bandes » dite en « niveau global »	31
2.4.3 Suivi d'évolution d'images spectrales	32
2.4.4 Le diagnostic	33
2.4.4.1 Définition	33
2.4.4.2 Les outils.....	33
 Chapitre 03: Etude expérimentale	
3.1 Définition d'un ventilateur	35
3.2 Les organes du ventilateur de fumées	35
3.3 Matériels utilisés.....	39
3.3.1 SKF vibropen	39
3.3.2 Accéléromètre	40
3.3.3 Collecteur analyseur	40
3.3.4 Logiciel (system 1)	42
3.4 Choix des points de mesures	43
3.5 La norme suivie (ISO10816-3).....	45
3.6 Mesure avant l'intervention (avant l'arrêt programmé)	46
3.6.1 Analyse de Niveau globale	46

3.6.2 Analyse de spectrale	47
3.6.3 Résultats d'analyse	53
3.7 Nettoyage de la matière sur la turbine	53
3.7.1 Le Sablage	54
3.8 Mesure Après la maintenance (Après l'intervention)	56
3.8.1 Analyse de Niveau globale	56
3.8.2 Analyse spectrale	57
3.8.3 Conclusion	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	65

Introduction générale

Les machines tournantes occupent actuellement une place prépondérante dans la vie quotidien, elles sont présent presque dans toutes les domaines sans exception, dans les secteurs des transports (réacteurs d'avion, pâles d'hélicoptère, etc.), de l'énergie (turbines, turboalternateurs, éoliennes, pompes, etc.) Et dans certains équipements (disque dur, dvd, gyroscopes, centrifugeuses, machines-outils, machines à laver, etc.), notamment dans l'industrie, où la machine est considérée comme l'élément principal sur lequel repose la chaîne de production.

Grâce à l'évolution remarquable de la mécanique et de l'électronique, les machines ont considérablement développé et sont devenues plus complexes en raison de leur taille réduite et de l'intégration des cartes électroniques. En conséquence, la disponibilité des machines est devenue le principal objectif des gestionnaires des parcs de machines tournantes, afin d'assurer la continuité de la production et d'éviter les arrêts imprévus, qui entraînent souvent des pertes financières importantes.

L'analyse vibratoire est l'une des techniques la plus couramment utilisée pour la maintenance des machines, à cause de son efficacité à contrôler l'état des organes tournants des machines sans avoir à les démonter. Cette technique a connu une évolution remarquable grâce au progrès important des technologies d'informatique, d'électronique et des techniques de traitement du signal. L'analyse vibratoire consiste à traiter les signaux vibratoires issus des machines en fonctionnement à l'aide des techniques de surveillance permettant à détecter la présence des problèmes de vibration et d'autre part, à identifier leurs sources (les organes défectueux) par l'utilisation des outils de diagnostic, qui sont basées sur des techniques avancées de traitement du signal, à savoir l'analyse d'enveloppe, le spectre et l'analyse temps-fréquence.

Les vibrations sont un phénomène courant dans les machines tournantes, qui peuvent transporter des informations importantes sur l'état des machines tournantes. Toutes les défaillances spécifiques de machines tournantes produit des vibrations ont leurs propres caractéristiques des vibrations. Mesures et analyse du comportement vibratoire du système et les changements de vibration conduisent à la détection de problèmes et de défauts. Presque toutes les vibrations de la machine sont dues à une ou plusieurs raisons comme le déséquilibre, l'excentricité, le désalignement, le desserrement, l'entraînement par courroie problèmes, défauts d'engrenage, défauts de roulement, défauts électriques, résonance.

Le défaut de déséquilibre a été classé comme l'une des causes les plus courantes de vibration dans les systèmes de machines tournantes. Les vibrations des machines dues à un défaut de déséquilibre sont généralement caractérisées par un pic dominant à la fréquence de rotation fondamentale, qui change généralement proportionnellement au carré de la vitesse de rotation et dans la direction radiale. L'élimination totale du défaut de balourd sur les machines tournantes est presque

impraticable, en raison des difficultés associées à l'atteinte de la perfection dans la fabrication des composants ainsi que leur installation. Partant de ce postulat, un nombre important des recherches se sont concentrées sur l'estimation du balourd et sa correction.

La relation défaut-vibration fait de la maintenance par analyse des vibrations un outil indispensable pour une maintenance moderne qui permet un diagnostic durant le fonctionnement.

L'essentiel de ce travail consiste principalement en la détection des défauts présents d'une machine tournante d'une entreprise, cette machine tournante c'est un ventilateur de fumée qui présente des vibrations en mode opératoire.

Cette détection des défauts s'est faite sur site par analyse vibratoire à l'aide d'appareils de mesures, d'outils et de moyens de calculs. Pour explicite cette tâche on a réparé les étapes de ce travail trois chapitres qui composent ce mémoire

Le premier chapitre contient la vue en générale sur les machines tournantes et les différents défauts (balourd, délignage, défauts de roulements, défauts d'engrenage, etc...) qui apparaissent sur eux, les types de ces défauts et leur causes, ainsi que les différents stratégies, technique de surveillance utilisé pour détecter ces défauts sur les machines tournantes.

Le deuxième chapitre ,concentre sur la technique de surveillance la plus utilisé maintenant pour le diagnostic des défauts , l'analyse vibratoire , on a montré ca importance par définir les différents types , formes, représentations des signales que on peut traiter par l'analyse vibratoire, ainsi que la chaine de mesure avec les différents types des capteurs utiliser pour collecter les signales a traité , on parle aussi des différents stratégies de surveillance par analyse vibratoire.

Le troisième chapitre, est consacré à l'étude expérimentale ou on a présenté la machine qu'on avait traitée, les matériels utilisé, et spécifiquement l'interprétation des spectres et des résultats obtenue.

1.1 Machines tournantes

1.1.1 Définition:

Les machines tournantes, moyens incontournable de la transmission de l'énergie, sont des systèmes mécaniques complexes. Elles se composent généralement d'un ensemble d'organes dont une partie fixe (stator) et l'autre mobile (rotor). Les organes fixes servent comme moyen de support aux organes mobiles ou tournants et les organes en mouvement (rotor) transmettent l'énergie ou la puissance et sont guidés en rotation.

La rotation est facilitée par des guidages en rotation sous forme de coussinets ou de roulements) [1].

Par exemple un moteur électrique absorbe de l'énergie électrique qu'il transforme en énergie mécanique. Suite à une transformation de la rotation en translation, elle pourrait entrainer en translation par exemple un ascenseur, une scie, un tapis etc. Autre exemple de machine tournante : l'alternateur qui au contraire transforme l'énergie mécanique, thermique, éolienne, nucléaire ou hydraulique en énergie électrique [2].

(Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs...). Toutes ces machines, que l'on dit "tournantes" sont un moyen indispensable à la transformation d'énergie elles sont devenues indispensables dans la vie moderne [1].

1.1.2 Description des machines tournantes :

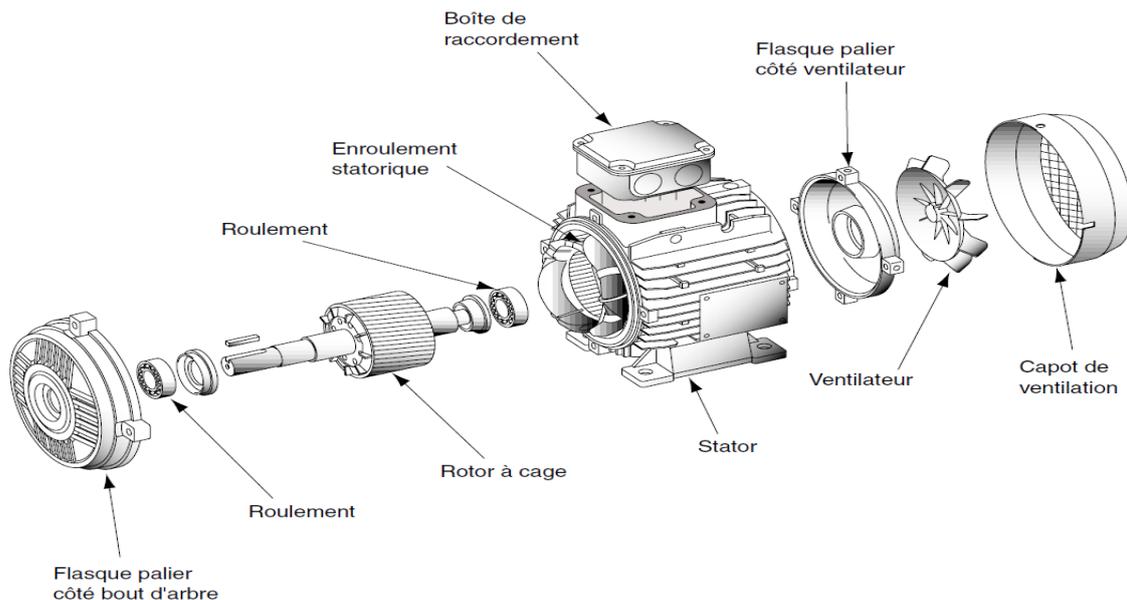


Figure 1.1 Composants d'une machine tournante

Les machines tournantes sont des systèmes où on peut distinguer :

- Un rotor.
- Un stator (structure).
- Des Liaisons.

Le rotor : Le rotor est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation, en général gauche c'est-à-dire distincte d'un axe (ligne droite). Le rotor qui peut être fait de différents matériaux (acier, cuivre, bois, plastique...), réalise une fonction bien définie : manipulation de fluides, de solides, parcours dans un champ électromagnétique. [3]

Le stator : Le stator, comme son nom l'indique, est la partie statique du système. Il se compose principalement [3] :

- **Les coussinets** de faibles dimensions au droit des tourillons du rotor. Des bagues peuvent être substituées aux coussinets : roulements.
- **Les paliers** qui relient les coussinets (bague) au stator.
- **Le stator** ou enveloppe de la machine ; il contient des éléments essentiels : circuit magnétique dans les machines électriques, ailette pour les turbomachines...etc.
- **Le massif** des systèmes embraqués peut prendre des formes beaucoup plus variées que celles des systèmes terrestres dont les massifs sont liés aux radies. Une interface adapte le stator au massif. Cette adaptation exige de résoudre un problème qui relève de la suspension des machines dont peut dépendre la tranquillité vibratoire, spécialement celle de l'envenimement.
- **Le radier** est un élément spécifique aux systèmes terrestres. Il assure la liaison entre le massif et sols et a pour mission de diminuer les pressions exercées au sol dans des limites acceptables. C'est par lui que les séismes perturbent les machines tournantes ; il peut être responsable de certains délignages entre les paliers.

Les liaisons : Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage du rotor. Les liaisons sont classées selon trois catégories:

- Les liaisons à fluide (grosses machines avec besoin d'évacuation thermique).
- Les liaisons à roulements (les plus courantes).
- Les liaisons magnétiques (applications spécifiques).

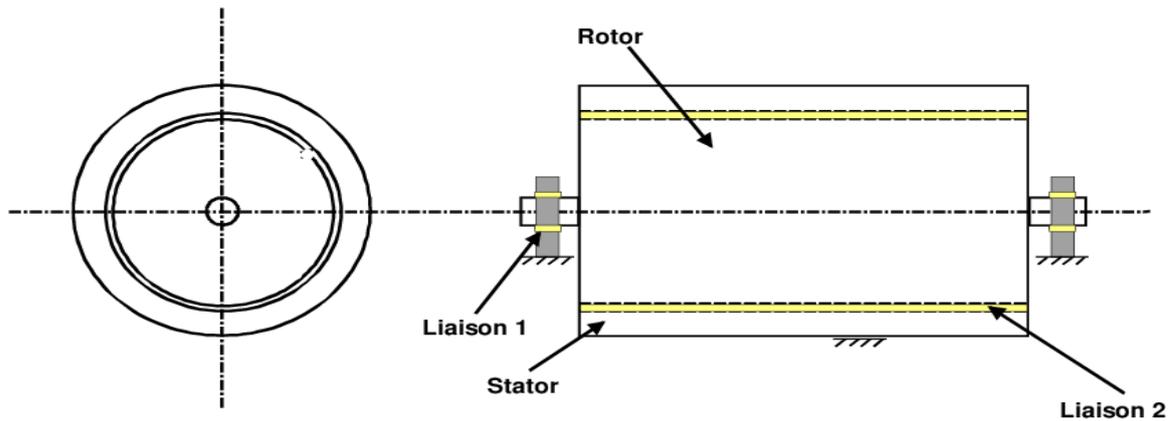


Figure 1.2 Différents organes d'une machine tournante

1.1.3 Classement « VIS » des machines tournantes :

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant [4] :

- Machines Vitales : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables.
- Machines Importantes : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi.
- Machines Secondaires : machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

En fonction de ce classement, d'un indice de vétusté, d'un indice de complexité des machines, on détermine les outils de surveillance à employer, leur paramétrage et la fréquence des campagnes de relevés comme exprime le tableau suivant [4].

Tableau 1.1 Exemple de surveillance à mettre en œuvre

Complexité de la machine	Machine		
	Vitale	important	secondaire
Complexe (présence de réducteur)	Surveillance spectrale	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux
Simple (une seule ligne d'arbre)	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux	Surveillance par niveaux globaux

1.2 Principaux défauts des machines tournantes:

Le diagnostic de l'état d'une machine, l'identification d'anomalies et le suivi de leurs évolutions ne sont possibles que si, préalablement, l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de l'affecter, c'est-à-dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts.

Il est donc essentiel de connaître la cinématique de la machine et les manifestations dynamiques ou symptômes associés aux différents défauts potentiels, afin de définir les indicateurs de surveillance, les techniques de traitement des signaux nécessaires au calcul de ces indicateurs ou à la mise en évidence de ces images et, enfin, pour formuler un diagnostic sur son état. [8]

1.2.1 Défaut de balourd (déséquilibre) :

Le balourd est le résultat d'un ensemble de forces engendrées par les écarts existant entre les centres de gravité des différents éléments constituant le rotor et son axe de rotation. En conséquence se crée une force centrifuge, issue de ces défauts de « non-concentricité » ou d'ajustage, et est proportionnelle à la masse de matière qui crée ce déséquilibre et au carré de la vitesse. Elle génère des efforts tournants qui vont agir sur les différents éléments constitutifs du rotor, les ancrages de la machine et les paliers jusqu'à entraîner leur dégradation. Le défaut de balourd est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements et il constitue l'un des principaux risques pour la sécurité. C'est pour cette raison sans doute qu'il fait l'objet de normes importantes, tant pour son évaluation que pour sa correction [8].

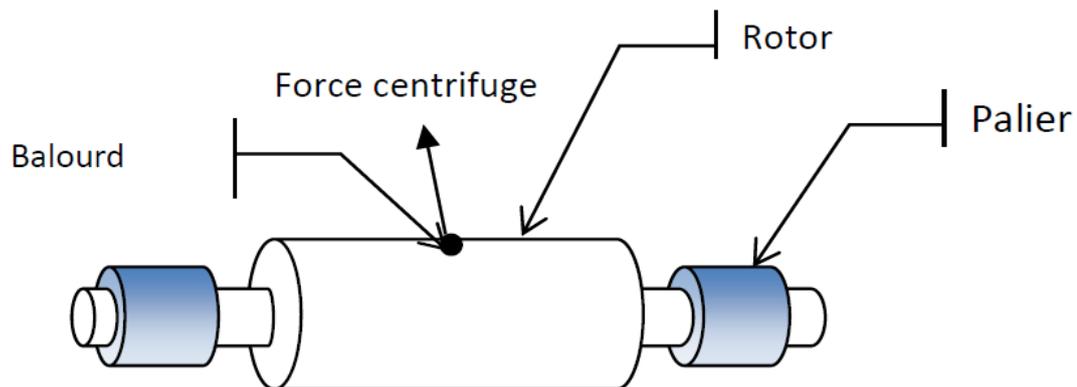


Figure 1.3 Défaut de balourd dans un rotor

Soit un disque de centre de gravité G tournant autour d'un axe. Si le centre G se trouve sur l'axe de rotation on dit que le disque est équilibré. Si une masse m est ajoutée en périphérie du disque, on crée une irrégularité qui a pour effet de modifier la position du centre de gravité G par rapport à son axe de rotation. On dit dans ce cas, que le disque présente un balourd. [5]

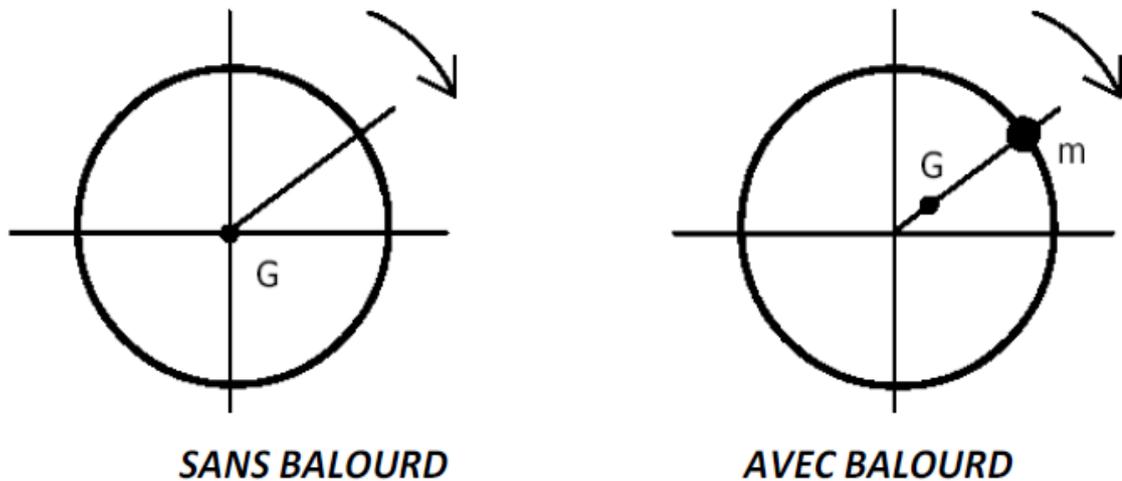


Figure 1.4 [7] Modélisation d'un balourd

1.2.1.1 Les causes du balourd:

Le balourd, déséquilibre massique, peut provenir de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, mais aussi [5,8] :

- d'une altération mécanique (perte d'ailette, érosion ou encrassement...),
- d'une altération thermique ou d'une déformation suite à des dilatations différentes des matériaux constituant le rotor ou encore à des différences de Température localisées (balourd thermique).
- Défauts de conception : Tolérance trop large sur la cotation des pièces (excentricité, jeu, ...), Asymétrie de rotation (vilebrequin, mandrin, etc. ...).
- Défauts de fabrication : Mauvaise homogénéité des matériaux utilisés (soufflure, inclusions,...), tolérances d'usinage (circularité, concentricité, ...).
- Défauts de montage : Asymétrie du montage des pièces (montage par clavette, goupilles, etc...), pièces mal fixées ou montées avec jeu.

1.2.1.2 Les différents types de balourd [5,8] :

1.2.1.2.1 Balourd statique :

En cas d'un balourd statique, les deux paliers supportant le rotor vont subir, en même temps, les effets de la force centrifuge due au déséquilibre. Il n'y aura donc théoriquement aucun déphasage entre les mesures prises sur les deux paliers pour une direction radiale donnée.

Il correspond essentiellement aux rotors sur lesquels le déséquilibre est prépondérant dans un seul plan de diamètre important (ventilateur, disque). Dans ce cas, une seule masse disposée diamétralement opposée au balourd permet d'équilibrer le rotor (équilibre en un seul plan) ou équilibrage statique.

1.2.1.2.2 Balourd dynamique :

En cas de balourd dynamique Les deux paliers supportant le rotor vont subir des efforts centrifuges de façon alternée. Le déphasage (voisin de 180°) entre les mesures effectuées au même point sur deux paliers consécutifs est donc révélateur d'un balourd dit « dynamique ».

Donc, il faut en général deux masses pour rattraper ce type de déséquilibre (un équilibrage multi plan.).

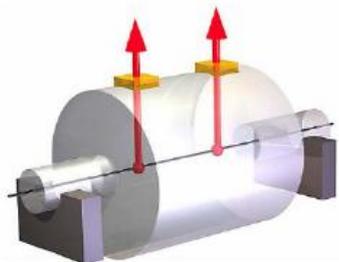


Figure 1.6 Balourd statique

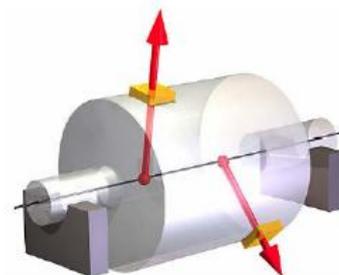


Figure 1.7 Balourd dynamique

Conséquences pratiques [9] :

Toute machine, même de conception et de réalisation très soignées, présente malgré tout un déséquilibre résiduel (acceptable ou non).

Ce déséquilibre induit un effort circulaire qui se confond avec la rotation. L'image vibratoire sera donc constituée d'une composante d'amplitude prépondérante à la fréquence de rotation du rotor.

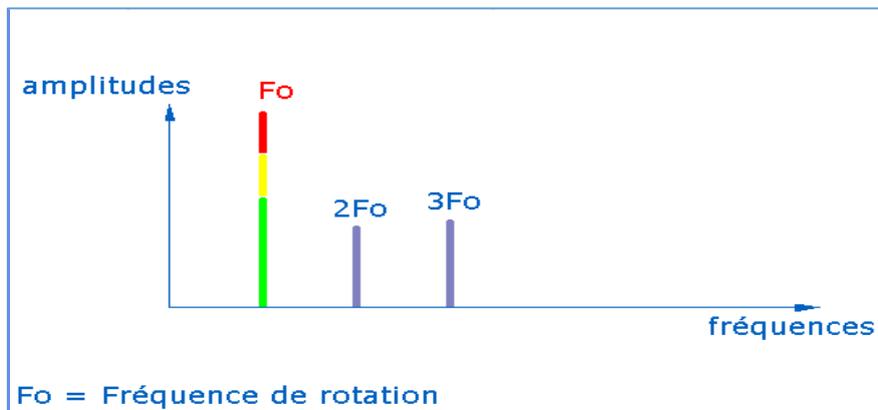


Figure 1.8 Spectre caractéristique de balourd

1.2.2 Le défaut d'alignement [10] :

Le défaut de lignage est essentiellement dû au non coïncidence de l'alignement des axes de rotation des deux machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage :

- Délignage parallèle : Défaut de concentricité des deux arbres.
- Délignage angulaire : Défaut de parallélisme des deux arbres.
- Délignage angulaire et parallèle : Combinaison des deux précédents.

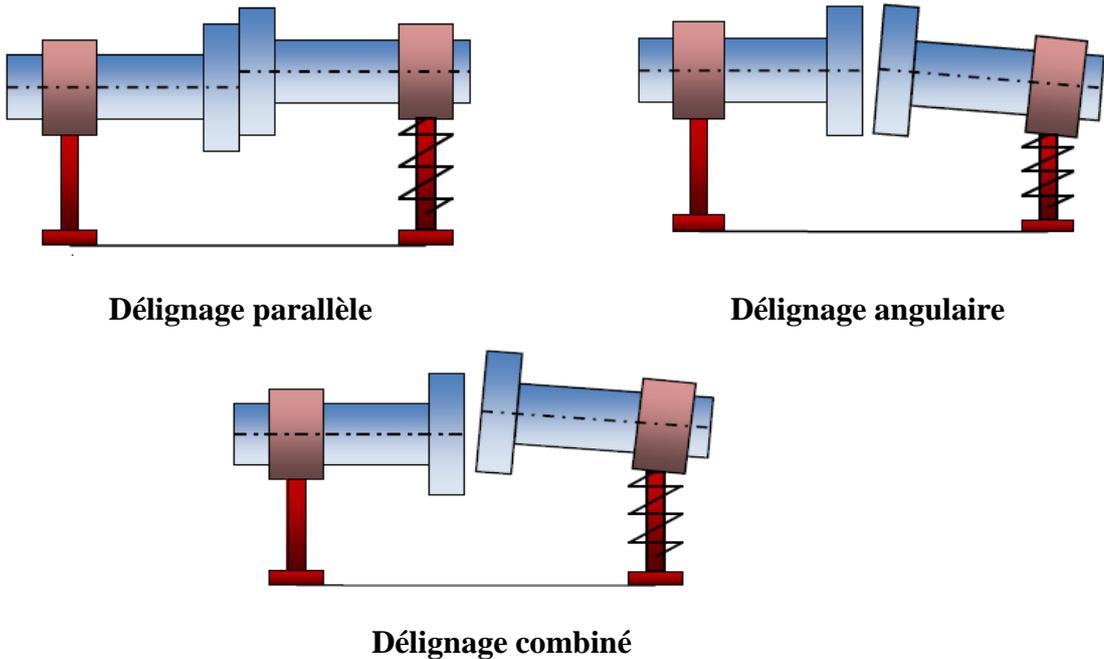


Figure 1.9 Types de délignage

1.2.2.1 Les causes de délignage:

- 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

Conséquences pratiques [9]:

Le défaut de lignage crée des contraintes internes au niveau des arbres et des paliers des machines accouplées. La contrainte exercée au niveau du palier génère une non-linéarité de raideur de ce dernier. Le déplacement occasionné par la force excitatrice s'en trouve écrêté, entraînant l'apparition de composantes harmoniques de la fréquence de rotation.

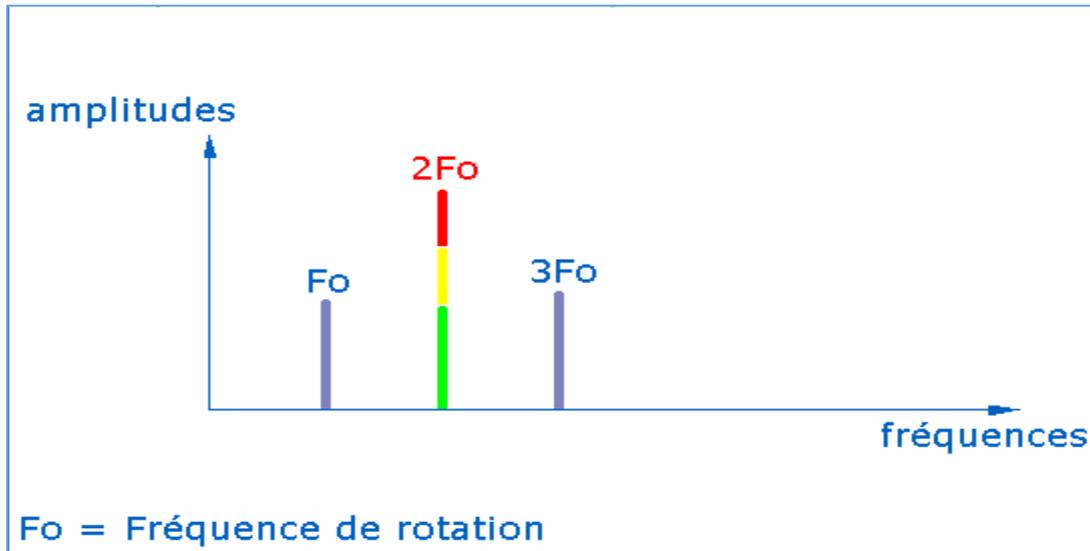


Figure 1.10 Spectre caractéristique de délignage

1.2.3 Défaut de roulement :

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : usure, écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), etc. Tous ces défauts ont un point commun : ils se traduisent tôt ou tard par une perte de fragments de métal. Ce défaut précurseur de la destruction est l'écaillage. Il se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage de roulement. [11].

Il existe différents types de défauts dus aux roulements :

- **L'écaillage** : il se manifeste par une perte de fragment de métal sur la partie de la machine que présente cette défaillance.
- **Usure** : usure par abrasion, due à une mauvaise lubrification, elle se caractérise par un aspect gris, givré des roulements.
- **Le grippage** : dû à l'absence de lubrification, à une vitesse excessive ou un mauvais choix du type de roulement. Ceci se manifeste par un transfert de micro matière arrachée sur les surfaces et redéposée par microsoudure.
- **La corrosion** : due à un mauvais choix du lubrifiant, surtout quand les roulements viennent d'être nettoyés et sont contaminés par la transpiration des mains.

1.2.3.1 Les causes de dégradation de roulements :

- Usure normale.
- Charge.
- Défaut de graissage.
- Défaut de montage.
- Agents extérieurs.

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un écaillage des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée. [10]

Conséquences pratiques [9] :

Un défaut localisé sur un des éléments se manifestera par un choc dur à la fréquence de contact de la détérioration.

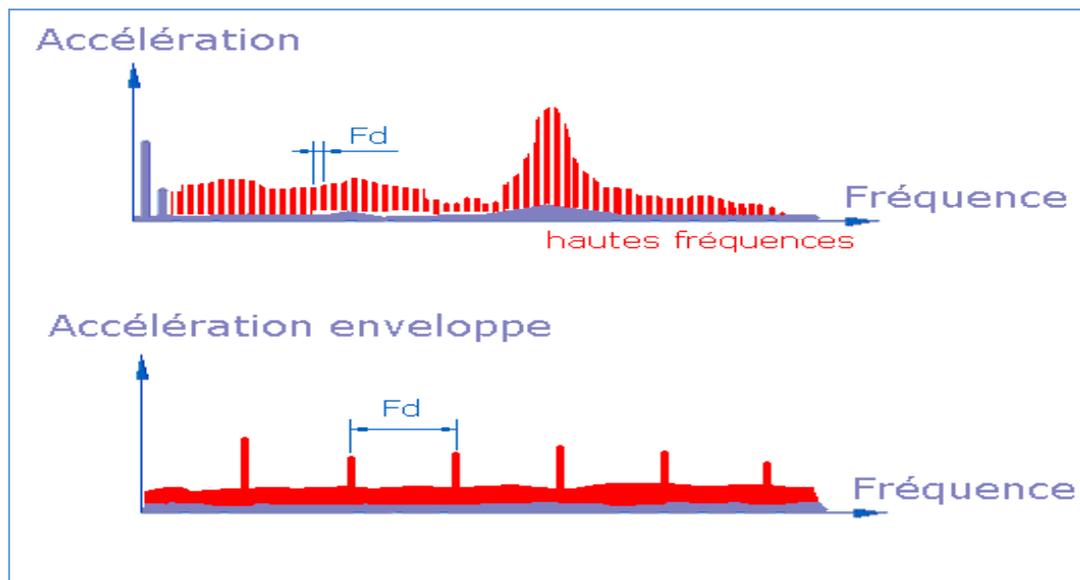


Figure 1.11 Spectre caractéristique de défauts dus aux roulements

1.2.4 Défaut d'engrenage [12]:

Les défauts de forme affectent les engrenages peuvent être soit des défauts de fabrication soit des transformations subies au cours de l'utilisation de la pièce :

- Défauts d'usinage :

Ce sont les défauts de la matière provenant d'une erreur dans la composition du matériau d'une inclusion de gaz accidentelle, d'un problème apparu lors d'un traitement du matériau par la chaleur.

- Défauts dus à l'usure :

Les dents des roues subissent une déformation périodique due à la charge mais tant qu'il n'y a pas d'usure par fatigue, cette déformation est provisoire et reste réversible lorsque il y a usure par fatigue, les dents subissent une déformation irréversible.

Les défauts qui affectent la surface des dents peuvent être provoqués par une mauvaise lubrification du réducteur.

1.2.4.1 les causes de défaut d'engrenage [7]:

- **Usure** : phénomène local caractérisé par un enlèvement de matière dû au glissement relatif de deux surfaces l'une sur l'autre ;
- **Usure par interférence** : produite au début ou en fin d'engrènement par les interférences de fonctionnement entre les dents conjuguées (mauvaise conception, flexion exagérée des dents en service).
- **Corrosion** : attaque chimique ou électrochimique du matériau.

- **Grippage** : résulte de la rupture du film lubrifiant sous l'action d'une surchauffe ou d'une pression excessive en fonctionnement, provoquant un contact métal/métal, soudure puis arrachement.
- **Piqûres** : endommagements de surface dus à la fatigue de contact, se présentant sous forme de cavités de différentes tailles.
- **Ecaillage** : endommagement profond initié en sous-couche des dents d'engrenages traités superficiellement, à la profondeur de la contrainte de cisaillement maximum.

Conséquences pratiques [9] :

Le passage de la dent détériorée provoque un choc dur à chaque tour. Le spectre résultant est un peigne de raies harmoniques de la fréquence de rotation du pignon incriminé.

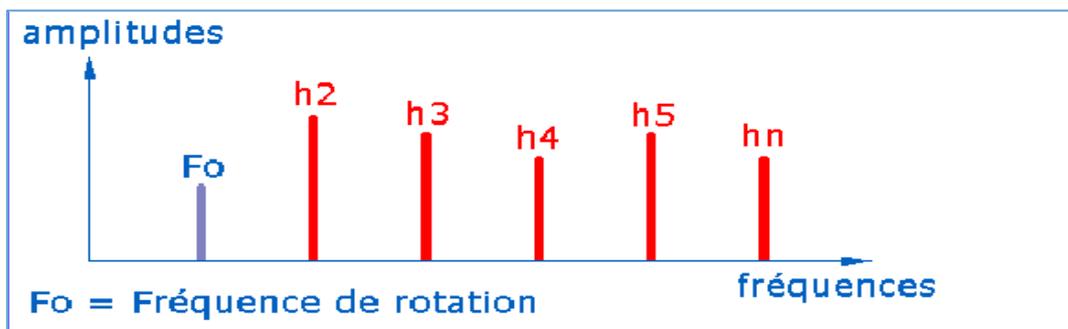


Figure 1.12 Spectre caractéristique de défaut d'engrenage

1.3 LES TECHNIQUES DE SURVEILLANCE:

La surveillance des machines s'intègre dans la politique de maintenance. Elle doit assurer la prévention des risques majeurs, la détection précoce des anomalies et l'analyse après incident, pour remédier aux défauts constatés.

1.3.1 L'analyse vibratoire :

Toutes les machines, et particulièrement les machines tournantes, vibrent et l'image vibratoire de leurs vibrations a un profil bien distinct lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement. Des que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc... apparaissent, l'allure de cette image se modifie, ce qui permet, de qualifier et prévoir l'intervention.

La plupart des défauts mécaniques peuvent être détectés par cette technique. [5]

La surveillance par l'analyse vibratoire des installations industrielles est l'outil préventif de la maintenance. Cette méthode est habituellement utilisée dans la plupart des installations. Elle détecte pratiquement toutes les anomalies qui peuvent apparaître dans les machines tournantes. Un défaut causé par un roulement, un jeu usé ou un défaut d'alignement, se manifeste par un changement des efforts internes que subit la machine, cela provoque une variation dans son comportement vibratoire [6].

Il existe deux technologies permettant de réaliser une surveillance vibratoire :

- **Par mesure directe du déplacement des parties tournantes :**

Réalisées à l'aide de capteurs à courants de Foucault, ces mesures, leur interprétation et leurs applications ne sont pas traitées ici. La technologie mise en œuvre est lourde. Une application courante est la surveillance des machines à paliers hydrauliques (à coin d'huile). Cette surveillance est presque toujours réalisée on line c'est-à-dire en temps réel. Les capteurs mesurent en permanence les déplacements des arbres et autorisent ainsi le déclenchement immédiat d'alarmes en cas de dysfonctionnement [4].

- **Par mesure de l'accélération subie par les parties fixes de la machine :**

Les moyens mis en œuvre sont, dans ce cas, beaucoup plus accessibles aux petites structures. À l'aide d'un accéléromètre relié à un collecteur de données, le technicien recueille les vibrations subies par les carters des machines.

Cette technique se prête aussi bien à la surveillance on line qu'à la surveillance périodique effectuée lors de rondes selon un calendrier préétabli.

L'industrie lourde, généralement utilisatrice de turbomachines, a souvent recours à l'ensemble des deux technologies afin de réaliser une surveillance vibratoire performante de son outil de production.

Cependant, si les arbres des machines surveillées sont montés sur roulements (c'est le cas pour la majorité d'entre elles), une surveillance périodique par mesure sur les parties fixes permet une analyse très fine de l'état des machines.

Les objectifs énoncés plus hauts sont donc atteints dès l'instant où l'activité est confiée à du personnel compétent et expérimenté. D'autre part, les coûts de préparation et de mise en œuvre étant très largement inférieurs à ceux de la technologie utilisant les capteurs à courants de Foucault [4].

1.3.1.1 Les différents défauts détectés par l'analyse vibratoire [7] :

- résonance de structure.
- jeu de palier.
- balourd ou déséquilibre de masse.
- mauvaise fixation.
- défauts de roulements.
- tension trop élevée des courroies.
- mauvais alignement d'une ligne d'arbre.
- Défauts d'engrenage.

1.3.2 La thermographie infrarouge [5]:

La thermographie est une des techniques utilisées pour contrôler l'état des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges (c'est-à-dire de chaleur) par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement.

Grace à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance.

Le champ d'application de cette technique est très vaste et on peut citer [7] :

- détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous-dimensionnés, cosses mal vissées, etc...)
- mécaniques (dégradation d'un palier, frottement,),
- détection des ponts thermiques et donc d'absence d'isolation thermique pouvant être néfaste au composant électronique sensible voisin,
- détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations, etc...

1.3.3 L'analyse des huiles [5] :

L'analyse d'huiles est d'une importance primordiale dans tout programme de maintenance des machines industrielles. La mise en œuvre de cette analyse est simple et presque tous les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être sujets à ce diagnostic. L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en ressent.

L'analyse d'huile permet de suivre dans le temps les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant. Cela permet d'apprécier son état de dégradation et donc son aptitude à remplir sa fonction dans la machine.

Les résultats de l'analyse permettent de détecter des anomalies telles que [7] :

- la pollution par des liquides (eau, solvants).
- la pollution par des particules (poussières, matériaux plastiques, fibres, etc...) causée par le processus lui-même et son environnement.
- les particules métalliques dues à l'usure ou la corrosion provenant des composants parcourus par le lubrifiant.
- l'oxydation, en présence d'air ou d'atmosphère corrosive, surtout lorsque les variations de température sont importantes.

1.3.4 L'analyse par ultrasons [6] :

L'analyse ultrason est une technique de surveillance conditionnelle qui permet de détecter les défauts par l'étude des ondes et des vibrations sonores acoustiques générés par les systèmes électromécaniques.

La mesure de son ou de bruit effectuée à l'aide d'un sonomètre qui évalue le niveau de pression acoustique. Ce dernier est ainsi transformé en un signal électrique, comparable en amplitude et en fréquence au phénomène acoustique. Le signal électrique peut être conditionné, échantillonné et traité de manière à caractériser le bruit mesuré. On peut ainsi par exemple déterminer des valeurs acoustiques exprimées en dB(A), effectuer des analyses fréquentielles, des analyses statistiques, et intégrer le signal sur une durée déterminée.

Exemple de domaines d'utilisation:

- Détection d'un bruit inhabituel qui peut être expliqué par l'analyse vibratoire.

1.3.5 Comparaison des techniques de surveillance [6]:

La comparaison des différentes techniques de surveillance est présentée au tableau 1.2 :

Tableau 1.2 Comparaison entre les différentes techniques de surveillance		
	Avantages	limitations
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts à une étape précoce. - Un diagnostic détaillé est réalisable -Permet une surveillance continue - Permet le contrôle de l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> -Spectres de fréquence parfois difficiles à analyser -Dans le cas de la surveillance continue, équipements utilisés est relativement cher
La thermographie infrarouge	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'effectuer un contrôle rapide des équipements - Interprétation souvent rapide des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire -Contrôle limité à ce que visualise la caméra (échauffements de surface) -Ne permet pas d'accomplir un diagnostic détaillé
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> -Reconnaissance d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou une défaillance. -On peut identifier l'origine de la défaillance par l'analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> -N'autorise pas la localisation régulière des défauts. - De nombreuses précautions sont obligatoires pendant le prélèvement de l'échantillon

Analyse ultrasonores	<ul style="list-style-type: none">- Permet de déceler l'apparition de défauts audible- Autorise une surveillance continue	<ul style="list-style-type: none">- Sensibilité au bruit ambiant.- Diagnostic souvent difficile à réaliser- Problème de répétition des mesures
-----------------------------	--	--

2.1 CARACTÉRISATION D'UNE VIBRATION [8]:

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient rapide autour d'une position moyenne appelée « position d'équilibre ».

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.

Le figure (2.1) montre que si le mouvement est entretenu par une force d'excitation périodique :

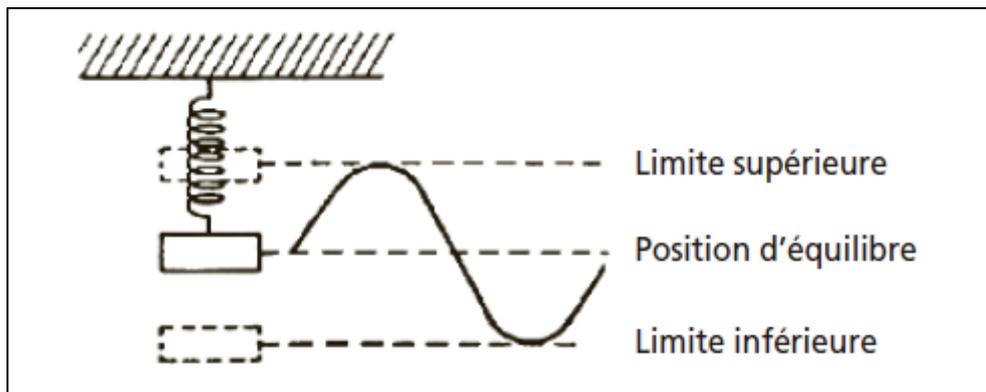


Figure 2.1 [8] Système masse-ressort

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

2.1.1 La fréquence

Définition :

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

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

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ cycle par seconde} \quad (2.1)$$

2.1.1.1 Relation entre fréquence et période :

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde.
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 :

$$F = 50 \text{ Hertz (50 Hz)} \quad (2.2)$$

$$T = 1/50 \text{ de seconde} \quad (2.3)$$

La fréquence f est donc l'inverse de la période T : $F = \frac{1}{T}$ (2.4)

2.1.2 L'amplitude:

Définitions :

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

De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs pour caractériser son amplitude.

- **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.

2.1.2.1 Les trois grandeurs représentatives de l'amplitude :

Si nous reprenons l'exemple du système mécanique précédent (figure 2.1), on constate que le mouvement de la masselotte se traduit par :

- **Déplacement** : La position de la masselotte varie de part et d'autre de la position d'équilibre, allant de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement.
- **Vitesse de déplacement** : Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre.
- **Accélération** : Celle-ci permet à la masselotte de passer de sa vitesse minimale en début de course à sa vitesse maximale au point d'équilibre avant de décélérer en fin de course.

2.1.2.2 Relations entre déplacement, vitesse et accélération :

Si pour un mouvement tournant, le déplacement X est représenté par :

$$x(t) = A \sin (2 \pi f t) \tag{2.5}$$

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

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \tag{2.6}$$

Et en dérivant à nouveau, on obtient son accélération :

$$\gamma (t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \tag{2.7}$$

Ces relations montrent alors que la vitesse « v » et l'accélération « γ » du mouvement de la masselotte, sont au même titre que son déplacement « x ».

2.1.3 Quelques formes de signaux vibratoires typiques [8] :

Un signal sinusoïdal représente par exemple la manifestation vibratoire d'un déséquilibre, d'un engrenement parfait, d'un déversement de la bague fixe d'un roulement.

Un signal sinusoïdal dont l'amplitude est modulée représente par exemple la manifestation vibratoire de l'engrenement d'un train d'engrenages dont un des arbres présente une forte excentration.

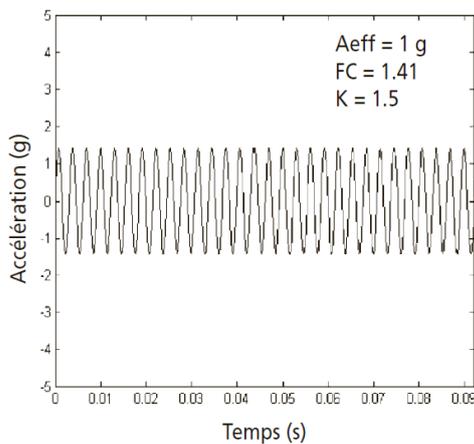


Figure 2.2.a [8] Signal sinusoïdal

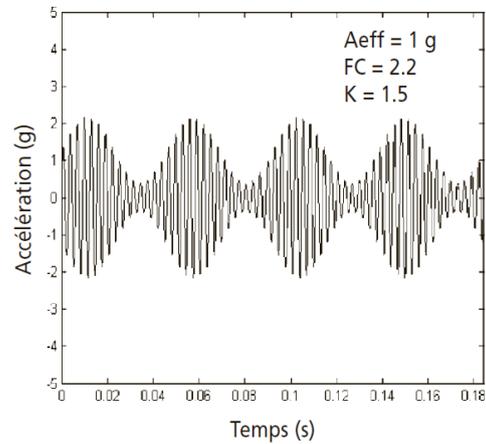


Figure 2.2.b[8] Signal sinusoïdal modulé

en

Amplitude

Un signal impulsionnel périodique représente la réponse de modes de résonance de bagues de roulement, de denture, de palier... à des chocs périodiques. Il traduit les manifestations vibratoires de défauts tels qu'écaillages et jeux mais aussi du fonctionnement normal de machines alternatives (compresseurs à pistons...).

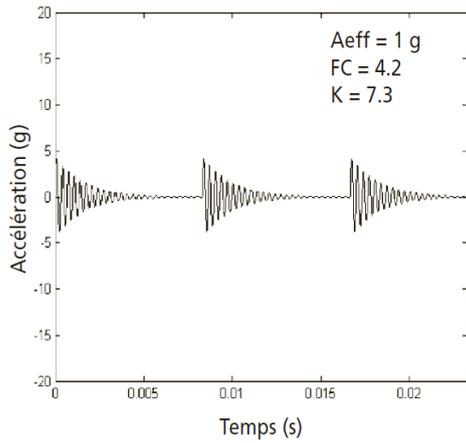


Figure 2.3.a[8] Signal impulsionnel périodique représentant la réponse du mode fondamental de bague de roulement de fréquence 3000 Hz

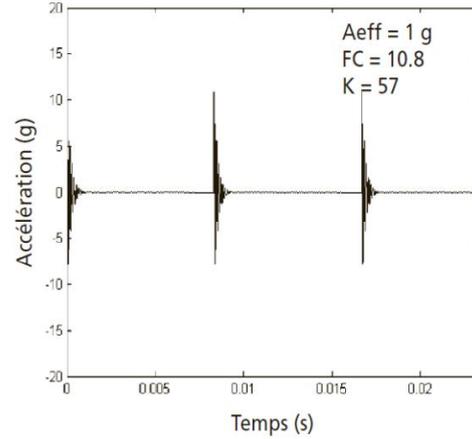


Figure 2.3.b[8] Signal impulsionnel périodique représentant la réponse du mode fondamental de bague de de fréquence 9000 Hz

Un signal impulsionnel aléatoire représente la réponse de mode des résonances à des excitations impulsionnelles aléatoires. Il traduit les manifestations vibratoires de roulage sur des surfaces présentant de l'usure (usure de bagues de roulement...) ou mal lubrifiées, de phénomènes de cavitation ou d'écoulements turbulents.

Le roulage des galets sur un écaillage génère des excitations impulsionnelles périodiques alors que le roulage sur les secteurs de la bague non écaillés mais présentant un peu d'usure génère des excitations impulsionnelles aléatoires.

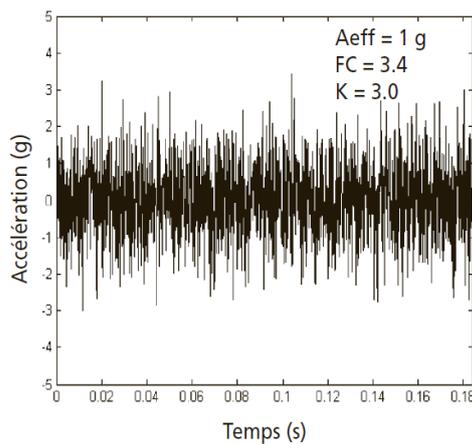


Figure 2.4.a[8] Signal impulsionnel aléatoire

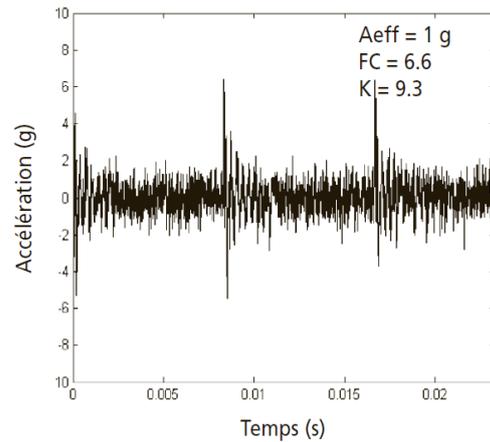


Figure 2.4.b[8] Signal impulsionnel mixte

2.2 REPRÉSENTATION ET TRAITEMENT D'UN SIGNAL:

2.2.1 Représentation temporelle [8] :

Le signal vibratoire délivré par un capteur peut être représenté de différentes façons. La première qui vient à l'esprit est la représentation de chaque événement en fonction de sa progression dans le temps (représentation temporelle).

Cette représentation est d'ailleurs utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ses paramètres de fonctionnement pour l'étude, par exemple, du comportement vibratoire d'un compresseur à pistons sur un cycle de compression. Elle sert aussi, et de façon très pertinente, à l'élaboration d'un diagnostic pointu lorsque, après dépistage d'une anomalie, il sera possible, grâce à des analyseurs de signaux haut de gamme, de suivre le signal temporel filtré autour de la fréquence générée par le défaut.

Ce type de représentation temporelle est aisé à exploiter lorsque le signal délivré par le capteur est simple (par exemple, signal délivré par un capteur de proximité représentant le déplacement relatif d'un arbre dans son palier (vibration de type sinusoïdal induite par le balourd du rotor)...). Il est encore facile à exploiter lorsque ce signal a fait l'objet d'un traitement approprié (filtrage, moyennage synchrone), mais il devient hélas vite inextricable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples.

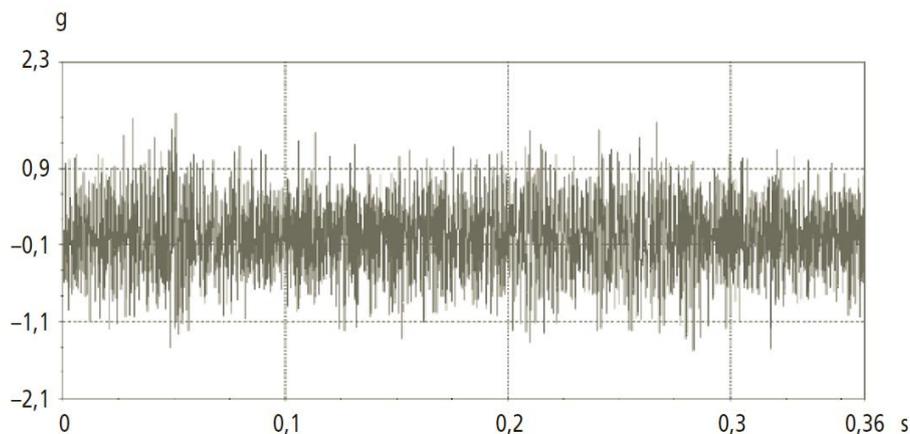


Figure 2.5[8] Signal temporel « brut » délivré par un accéléromètre fixé sur un des paliers MV d'un réducteur

Pour qu'il puisse être plus facilement interprété, le signal doit donc généralement être décomposé en différentes composantes sinusoïdales élémentaires.

Si cette décomposition est théoriquement possible par filtrages successifs, sa représentation dans le domaine temporel deviendrait vite trop foisonnante donc inexploitable.

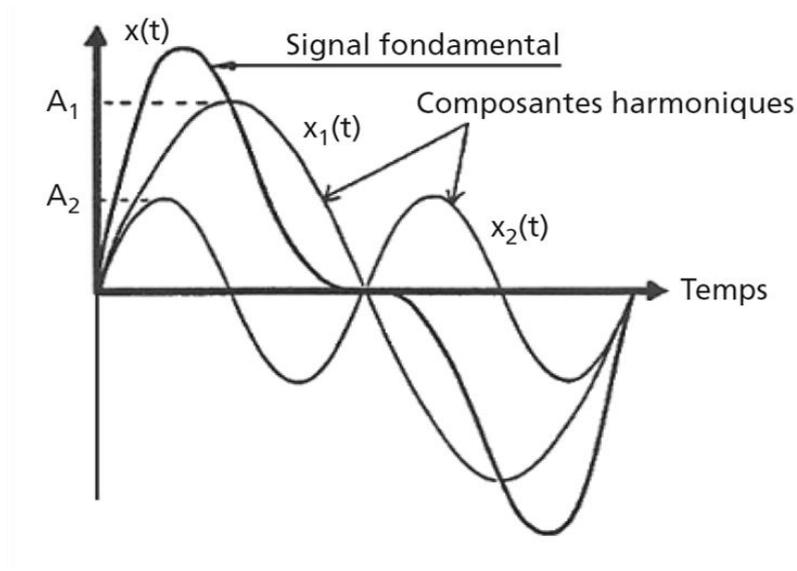


Figure 2.6 [8] Décomposition d'un signal temporel en ses deux composantes harmoniques

2.2.2 Présentation en fonction de la fréquence (représentation spectrale) [8] :

Faute de pouvoir représenter le signal vibratoire en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes/fréquences appelé spectre. Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales élémentaires constituant le signal est parfaitement défini par son amplitude et sa fréquence.

La représentation spectrale d'un signal complexe comme en (figure 2.7) devient ainsi plus claire et facilement exploitable (figure 2.8).

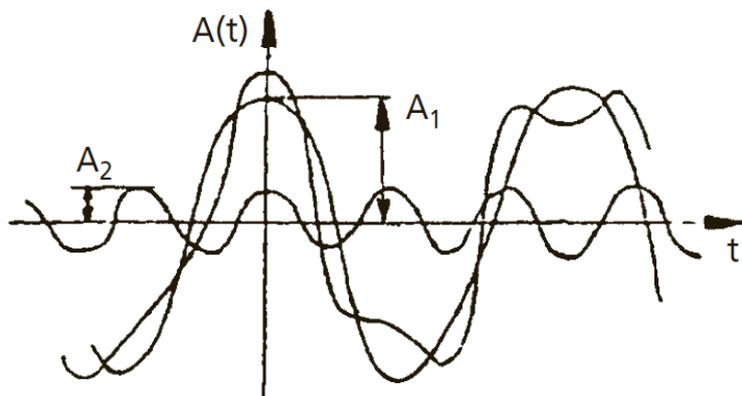


Figure 2.7 [8] Représentation temporelle des différentes composantes
D'un signal complexe

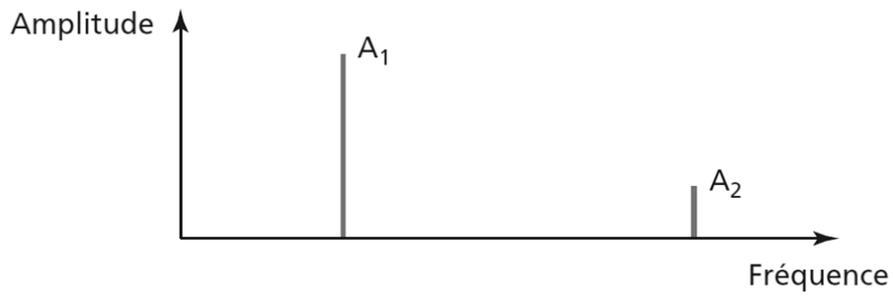


Figure 2.8 [8] Représentation spectrale des différentes composantes du signal donné en figure 2.7

La simplification apportée par ce type de représentation et la décomposition du signal en composantes sinusoïdales élémentaires (analyse spectrale) sont illustrées par la figure 2.9

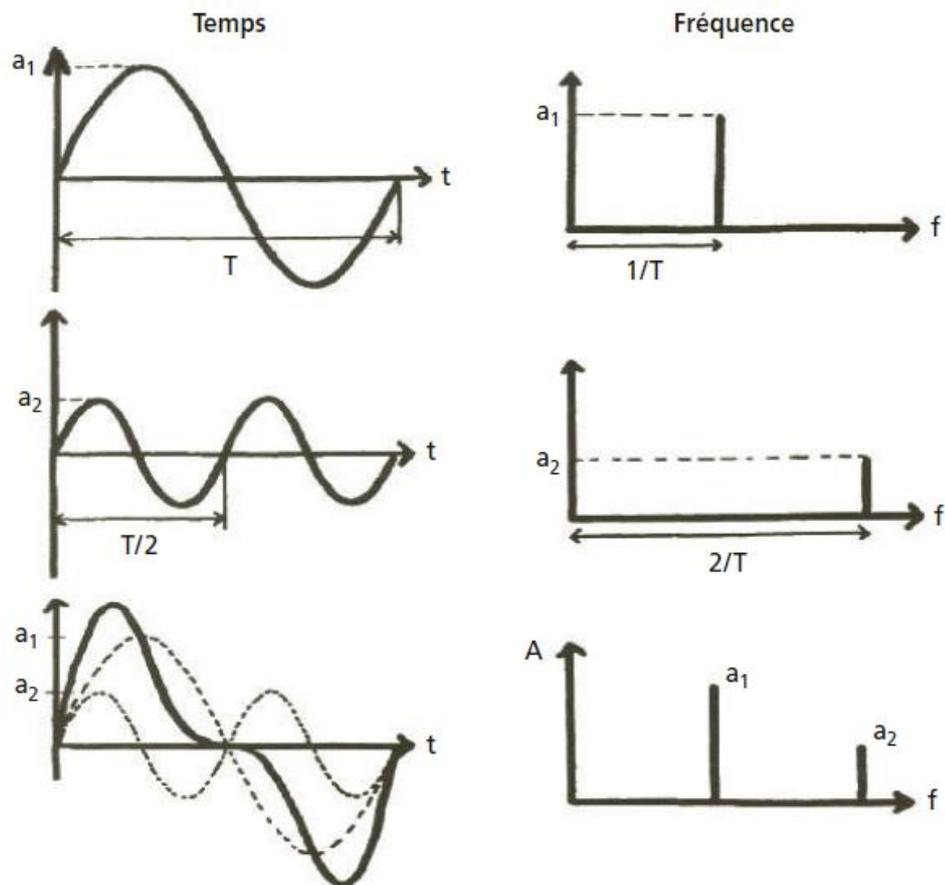


Figure 2.9 [8] Exemples de conversion temps/fréquences d'un signal temporel

Intérêt pratique de l'analyse spectrale [8] :

Toute anomalie affectant une machine tournante (balourd, désalignement, phénomène de tourbillon d'huile, déformation d'arbre, jeu excessif, desserrage de palier, défaut de roulement ou d'accouplement, anomalie électromagnétique affectant le rotor ou le stator d'un moteur, engrènement défectueux...) se traduit par des vibrations dont les fréquences correspondent aux fréquences fondamentales des forces qui les induisent et à leurs harmoniques (harmonique : composante dont la fréquence est un multiple d'une fréquence de base appelée fréquence fondamentale). La connaissance de la cinématique de la machine permet, sinon d'identifier l'anomalie, tout au moins de la localiser, de suivre l'évolution des amplitudes des vibrations qu'elle induit et, de ce fait, d'en apprécier la gravité.

Un spectre est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence, l'ordonnée et l'amplitude.

L'interprétation d'un spectre consiste dans un premier temps à trouver l'origine cinématique de chaque composante ou famille de composantes constituant le signal. L'interprétation d'un spectre sera d'autant plus précise et pertinente que le diagnosticien sera en possession d'un maximum de renseignements concernant les conditions d'exploitation, les principes de fonctionnement, les modes de vieillissement et surtout la cinématique de la machine.

Le calcul du spectre [8] :

Un spectre peut être obtenu de deux façons :

- **Pour mémoire** : Analogiquement, par l'utilisation d'un filtre « accordable », à largeur de bande, soit constante, soit proportionnelle à la valeur de la fréquence centrale retenue. L'image spectrale est obtenue en accordant le filtre sur toutes les fréquences de la plage désirée. Pour cette raison, les appareils qui utilisent cette technique sont souvent dits filtres à balayage.
- **De nos jours** : Numériquement, par l'application d'un algorithme (FFT), de calcul qui a la propriété de décomposer un signal complexe en ses différentes composantes élémentaires définies par leur amplitude et leur fréquence et qui permet de passer d'une représentation temporelle à une représentation spectrale.

L'analyse spectrale à l'aide de filtres « accordables » est de moins en moins utilisée, excepté encore dans quelques appareils dédiés à l'équilibrage des rotors ou à l'alignement des lignes d'arbres.

2.3 LA CHAÎNE DE MESURE [8]:

Une chaîne de mesure de vibrations doit remplir les fonctions suivantes :

Transformer la vibration mécanique en un signal électrique :

C'est le rôle du capteur. La grandeur électrique délivrée peut être :

- une tension comme dans le cas d'un signal issu d'un accéléromètre à électronique incorporée (ICP) ou d'un vélocimètre inductif. La sensibilité du capteur s'exprime alors en mV (millivolts) par unité physique.
- une charge électrique comme dans le cas d'un accéléromètre piézoélectrique dont la sensibilité s'exprime en PC/g (pico-coulomb par g) ou en m/s^2 (mètres par seconde carrée).

Conditionner le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable :

C'est le rôle du préamplificateur. Indispensable pour les accéléromètres piézoélectriques.

Intégrer le signal : Cette opération permet de transformer si nécessaire le signal délivré par un accéléromètre en un signal représentant la vitesse ou le déplacement du mouvement vibratoire.

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.

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.

Numériser le signal : C'est le rôle du convertisseur analogique/numérique (CAN) qui transforme le signal en données numériques avant de les transmettre :

- à une unité de mesure de grandeurs scalaires (amplitudes crête, crête à crête et efficace, paramètres dits spécifiques au suivi des roulements...).
- à un collecteur de données informatisées ou à un analyseur.
- à une éventuelle unité de conservation du signal temporel pour un traitement différé des signaux (post-traitement).

2.3.1 Les capteurs [8]:

La fonction du capteur est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique. Quelle que soit la nature du signal délivré (accélération, vitesse, déplacement...) et il constitue le premier maillon de la chaîne de mesure.

Un capteur se caractérise principalement par :

- **Sa bande passante :** La bande passante est la plage de fréquences (Par exemple [3-8 000 Hz]).

- **Sa 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.
- **Sa sensibilité :** C'est la relation qui lie la grandeur électrique délivrée par le capteur à l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance.
- **Sa tenue en température :** Elle est précisée par le constructeur, la température peut sensiblement modifier la sensibilité du capteur et même dans le cas d'un capteur piézoélectrique le détruire lorsqu'elle atteint le point de Curie du matériau sensible le constituant.
- **Ses grandeurs d'influence :** Le capteur, selon ses conditions d'utilisation, peut être sensible non seulement à la grandeur physique pour laquelle il a été conçu mais aussi à d'autres grandeurs physiques, appelées « grandeurs d'influence », susceptibles d'avoir une action non négligeable sur la justesse des mesures.
- **Sa masse et ses dimensions :** Pour certaines applications sur des petites pièces, plaques ou carters de faible épaisseur, le poids et les dimensions du capteur peuvent être des contraintes importantes à ne pas négliger. Les dimensions peuvent créer des difficultés de mise en place et le poids peut fausser la mesure en modifiant la raideur du support.

2.3.1.1 Les capteurs relatifs [8] :

Les Capteurs de proximité [8] :

Les capteurs de déplacement ou proximètres (ou encore appelés capteurs de proximité) mesurent la distance comprise entre la surface surveillée (généralement celle d'un arbre tournant) et l'élément détecteur du capteur (appelée sonde). Ce sont des capteurs dits relatifs.

Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault (C.C.F). Ce capteur est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur. Il est constitué d'une bobine parcourue par un courant électrique « hautes fréquences ». Le champ magnétique ainsi créé induit, à la surface de l'arbre, des courants appelés courants de Foucault qui modifient l'impédance de la bobine.

Ces variations d'impédance sont transformées en :

- une tension continue proportionnelle à la distance moyenne entre l'arbre et le capteur (composante statique),
- une tension alternative proportionnelle aux écarts de distance par rapport à la distance moyenne (composante dynamique), qui renseigne donc sur les déplacements relatifs de l'arbre par rapport à la sonde du capteur.

Un capteur de déplacement à courants de Foucault mesure le mouvement relatif de l'arbre par rapport au support sur lequel il est fixé (généralement le corps du palier).

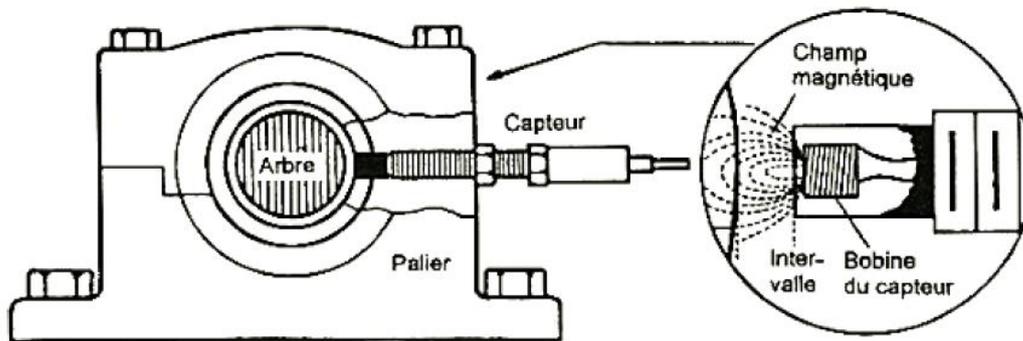


Figure 2.11[8] Principe du capteur inductif à courants de Foucault

2.3.1.2 Les capteurs absolus [8]:

Les vélocimètres [8]:

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté (figure 2.12). 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.

Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur. L'amplitude du signal délivré est directement proportionnelle à la vitesse de la vibration absolue du palier au point de mesure. La fréquence de résonance de ce type de capteur se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ, bien qu'il soit cependant possible d'abaisser à 1 Hz la fréquence de coupure inférieure du capteur, en insérant dans l'unité de mesure un circuit de linéarisation.

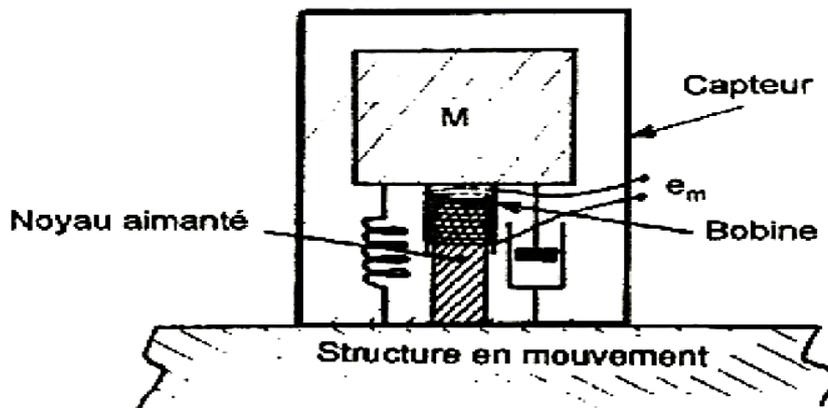


Figure 2.12 [8] Schéma de principe d'un vélocimètre

L'utilisation des vélocimètres, très fréquente dans les services de maintenance jusqu'aux années 1990, tend aujourd'hui à disparaître au profit des accéléromètres piézoélectriques qui, moins encombrants et plus fiables, présentent une bande passante et une dynamique de mesure beaucoup plus étendues.

Les accéléromètres [8] :

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. 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.

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.

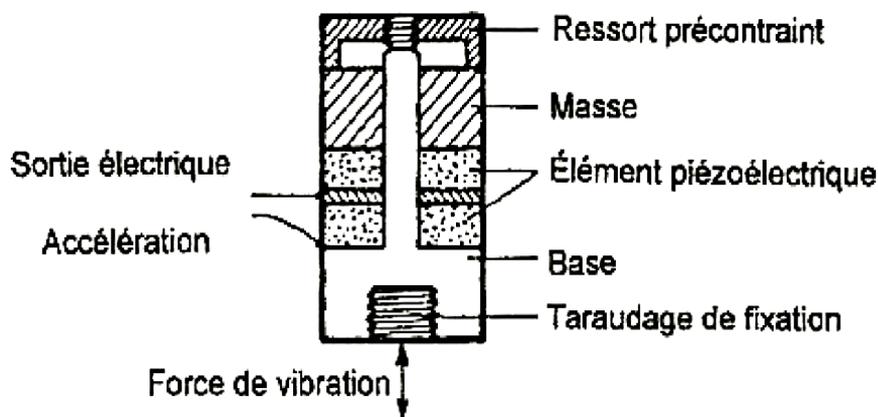


Figure 2.13 [8] Principe de fonctionnement d'un accéléromètre

Grandeurs d’influence :

Un accéléromètre piézoélectrique, comme tout capteur, est sensible à un certain nombre de grandeurs susceptibles température et variations rapides de température, humidité, champ sonore, champ électromagnétique...), même si les capteurs haut de gamme à cisaillement Delta sont moins sensibles à l’ensemble de ces grandeurs d’influence. Il conviendra donc de se prémunir des effets de champs électromagnétiques et de la présence éventuelle de circulation de courants d’arbre.

Tableau 2.1 les avantages, inconvénients des accéléromètres	
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - l’étendue de la bande passante. - une gamme dynamique très étendue. - l’obtention de la vitesse vibratoire et du déplacement instantanés par intégration. - une excellente précision pour un large « éventail » de conditions environnementales. - une excellente fiabilité dans le temps puisqu’aucun élément n’est mobile. - un faible encombrement et un grand rapport sensibilité/masse. 	<ul style="list-style-type: none"> - principalement la forte dépendance de sa bande passante avec la rigidité de sa liaison avec la surface vibrante. - les difficultés inhérentes à l’analyse de comportements vibratoires très basses fréquences qui se manifestent par des déplacements importants, mais aussi par des accélérations extrêmement faibles. Cette particularité rend nécessaire l’utilisation d’accéléromètres de grande sensibilité (1 000 mV/g) dont la sortie risque, en absence d’un filtrage passe-haut correctement positionné, d’être saturée par les composantes vibratoires de fréquences plus élevées.

2.4 DIFFÉRENTS STRATEGIES DE SURVEILLANCE [8] :

La surveillance vibratoire des machines est maintenant devenue le pilier d’une nouvelle stratégie de maintenance : la maintenance préventive conditionnelle, qui s’appuie sur l’évolution d’indicateurs objectifs représentatifs de l’état réel de chaque machine.

Dans ce concept, la surveillance 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 en les intégrant, si

possible, dans les arrêts procédés ou en provoquant des arrêts programmés à des moments opportuns, en fonction notamment des impératifs de production.

Cependant, si la détection à un stade précoce d'un défaut et le suivi de son évolution présentent déjà un grand intérêt, l'exploitant ou l'ingénieur de maintenance désire de plus en plus connaître la nature du défaut et sa gravité pour prendre une décision.

2.4.1 La surveillance par suivi d'indicateurs sélectionnés [8]:

2.4.1.1 Notions de seuil et d'indicateur [8] :

La détection d'anomalies affectant une machine nécessite de procéder, au préalable, au choix d'un certain nombre d'indicateurs plus ou moins élaborés dont l'évolution dans le temps est significative de l'apparition d'une anomalie et de son aggravation. À chaque indicateur est associé un seuil dont la valeur dépend de la nature du défaut et de la machine surveillée d'une part et de ses conditions de fonctionnement (vitesse de rotation et charge) d'autre part.

Tout dépassement de seuil doit déclencher la mise en œuvre d'une procédure préalablement définie, comprenant un certain nombre d'opérations déterminées en fonction du taux de dépassement, recherche d'un diagnostic plus élaboré, modification de la périodicité et du type de suivi, programmation d'une action corrective, arrêt immédiat de l'installation.

La détection des anomalies à un stade précoce nécessite :

- de procéder en premier lieu à une analyse des modes de défaillances des installations à surveiller et à une estimation de leur fréquence d'apparition en tenant compte des spécificités d'exploitation,
- de connaître les manifestations dynamiques (vibrations, fluctuations de couple...) des défauts susceptibles d'affecter les différents organes qui la constituent,
- de choisir les indicateurs les plus sensibles aux défauts retenus dans le programme de surveillance.
- de choisir un seuil associé à chaque indicateur en fonction de la nature du défaut et de la vitesse de rotation de la ligne d'arbres susceptible d'être affectée.

La fiabilité d'une surveillance et son coût dépendent du choix :

- des couples indicateurs-seuils, donc du mode de traitement des signaux délivrés par les capteurs.
- du type de capteurs utilisés (accéléromètres, capteurs de déplacement relatif, capteurs de courant, capteurs de vitesse angulaire...).
- du nombre de points de mesure sélectionnés (un point par organe, un point par palier, deux à trois points de directions différentes par palier, points supplémentaires sur la structure) pour représenter et suivre l'évolution du comportement vibratoire de l'installation.
- du mode d'acquisition des données, qui peut être continu ou périodique, et dans ce dernier cas, de la périodicité de collecte retenue (hebdomadaire, mensuelle, trimestrielle...).

Selon la complexité de la machine surveillée, son caractère plus ou moins « Stratégique » pour la production, les défauts dont on a décidé de détecter l'apparition et de suivre l'évolution et la fiabilité désirée, différents modes de surveillance peuvent être choisis.

Il s'agira notamment du suivi :

- de l'évolution d'indicateurs scalaires larges bandes, dit en « niveau global NG ».
- d'indicateurs scalaires bandes étroites.
- de l'évolution d'images spectrales (spectre, zoom, cepstre, spectre de fonction de modulation...).
- d'indicateurs typologiques (on appelle indicateur « typologique » un indicateur scalaire ou une image spectrale sensible à une gamme de défauts très peu étendue présentant des manifestations dynamiques typiques comme l'amplitude efficace de l'ordre 1 de la fréquence de rotation pour suivre l'évolution du déséquilibre ou des ordres 2 et 3 de la fréquence de rotation pour suivre l'évolution du lignage).

2.4.2 Surveillance par suivi d'indicateurs scalaires « Larges bandes » dite en « niveau global » [8] :

Le mouvement vibratoire global induit par le fonctionnement normal ou 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 (par exemple un balourd ou un désalignement).

Ces indicateurs représentent le plus souvent l'amplitude efficace (et parfois l'amplitude crête) du signal vibratoire (accélération, vitesse ou déplacement), mesurée toutes fréquences confondues, dans une plage très étendue, souvent dans la bande passante de l'appareil de mesure ou dans une bande fréquentielle normalisée. L'indicateur vibratoire NGV [10-1 000 Hz] (Amplitude efficace de la vitesse vibratoire mesurée dans la bande fréquentielle [10-1 000 Hz]) est un des indicateurs de surveillance le plus utilisé.

Améliorer la fiabilité de ce mode de surveillance [8]:

Tout d'abord en excluant de son champ d'application les installations :

- constituées de plusieurs lignes d'arbres dont les vitesses de rotation diffèrent notablement les unes des autres,
- induisant en fonctionnement normal une énergie vibratoire élevée à largeur spectrale étendue (compresseurs à vis, surpresseurs de type Roots, compresseurs à pistons...).
- En augmentant le nombre d'indicateurs scalaires larges bandes pour décrire le comportement vibratoire : il faut choisir des indicateurs de sensibilités différentes selon la forme du signal (amplitude efficace, amplitude crête, facteur de crête, kurtosis, indicateurs brevetés « défauts de roulements »...) ou son contenu fréquentiel (accélération, vitesse ou déplacement).

Avantages de ce mode de surveillance [8] :

- à son faible coût de mise en œuvre, qui ne nécessite ni investissement coûteux en matériel, ni formation importante, ni niveau de qualification élevé.
- au fait que, en dépit de sa faible fiabilité en cas de non-respect des règles précédemment énoncées, elle peut permettre d'éviter près des deux tiers des pannes, ce qui peut présenter, dans beaucoup de situations, un excellent résultat pour des machines peu stratégiques, aux regards des investissements et des charges engagés.

2.4.3 Suivi d'évolution d'images spectrales [8] :

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 dans la dérive des fréquences (dus généralement à une légère variation de la vitesse de rotation) et dans l'accroissement des amplitudes.

Tout changement significatif du nouveau spectre se traduit par un débordement du gabarit, qui déclenche l'alarme.

Empiriquement, on pourra souvent choisir comme découpage, pour la plupart des machines stratégiques :

- un spectre basses fréquences BF 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 basses et moyennes fréquences BF/MF dont l'étendue sera limitée aux dix premiers ordres de la fréquence de défaut de roulement la plus élevée (la fréquence de défaut de bague interne),
- un spectre haut fréquences HF 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, bagues de roulement ou de denture,
- 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.

2.4.4 Le diagnostic [8]:**2.4.4.1 Définition [8] :**

La surveillance systématique a pour objectif de révéler l'existence d'une anomalie le plus tôt possible et de suivre son évolution. Le diagnostic doit permettre d'identifier avec précision la nature de cette dernière et si possible d'en préciser la gravité. La

philosophie du diagnostic est donc fondamentalement différente de celle de la surveillance traditionnelle.

Un diagnostic est une démarche déductive qui s'appuie sur la recherche, dans des signaux liés au fonctionnement d'une machine, des manifestations dynamiques des différents défauts susceptibles d'affecter cette dernière.

Cependant, la machine, ne puisse exprimer directement ce qu'elle ressent, donc la conduit pour identifier un éventuel défaut à une recherche et à une analyse systématique de toutes les informations contenues dans les signaux délivrés par les différents capteurs assurant la surveillance de la machine et la régulation du procédé (vibration, vitesse de rotation instantanée et image du couple instantané, température des paliers, capteurs procédés), sans oublier les informations contenues dans les lubrifiants et à les corréliser entre elles.

Cette approche systématique s'effectue selon une méthodologie rigoureuse et fait appel à des techniques de traitement du signal beaucoup plus complexes que celles généralement mises en œuvre dans le cadre d'une surveillance « traditionnelle ». Elle utilise une large palette d'outils dans laquelle le diagnosticien pourra puiser en fonction, d'une part de l'aspect critique de la panne redoutée, et d'autre part de la complexité de la machine et de la fiabilité du diagnostic recherché.

On notera quelques outils classiques :

2.4.4.2 Les outils de diagnostic [8] :

Le spectre :

L'analyse spectrale, même si elle peut être utilisée en simple surveillance périodique sous une forme plus ou moins simplifiée, est avant tout la base de tout diagnostic. Elle permet d'identifier avec précision les fréquences des composantes discrètes constituant le signal, d'en quantifier les amplitudes, de les regrouper en famille (harmoniques, peignes de raies, bandes latérales associées à une fréquence de modulation, bruit aléatoire) et d'en identifier l'origine.

Le bruit de fond spectral ou « fond de spectre » représente les réponses des structures supports, des lignes d'arbres, des paliers à toutes les forces d'excitation, qu'elles soient périodiques ou aléatoires. La forme du fond de spectre au pied des principales raies, dans la mesure où ce dernier représente bien une réalité physique et non du bruit d'analyse dû à une résolution mal adaptée, permet d'identifier l'existence éventuelle de fréquences propres, susceptibles d'être excitées par des fréquences caractéristiques de la machine. Hypothèse qu'il conviendra toujours de vérifier par des investigations spécifiques.

Le zoom :

Un grand nombre d'anomalies mécaniques ou électromagnétiques se manifeste, avec un apport d'énergie très faible voire nul, par l'apparition de bandes latérales de modulation autour d'une fréquence cinématique appelée « fréquence porteuse » (par exemple, fréquence de rotation, fréquence d'engrènement, fréquence d'encoches, fréquence de pales, fréquence de compression...).

Les fréquences de modulation associées (fréquence de passage des pôles, fréquence de rotation, fréquence de rotation de la cage d'un roulement, fréquence de courroies...) sont le plus souvent très faibles devant celles des composantes modulées

et, de ce fait, l'identification de leur existence exige souvent un nombre de lignes spectrales nettement supérieur à celui proposé par l'analyseur. La réduction de la bande d'analyse B n'est possible que si la fréquence de la composante à analyser et ses bandes latérales associées restent contenues dans cette dernière.

3.1 Présentation de la machine

3.1.1 Ventilateur de fumée VF :

Un ventilateur est une machine ou équipement qui assure le mouvement d'un fluide gazeux dans un circuit déterminé. Il permet à ce fluide de vaincre les pertes de charge de la conduite qui le contient.

Dans la production de ciment, les principales sources de poussière sont les fours à clinker, les fûts de séchage, les matières premières et les cimenteries, ainsi que les unités de concassage. Les émissions de poussières des fours représentent jusqu'à 80% de la quantité totale de poussières émises dans l'atmosphère lors de la production de ciment.

Les ventilateur de fumée sont principalement conçus pour aspirer divers gaz de combustion, accumulés dans les fours à gaz de différentes chaudières, qui sont équipés de divers systèmes spéciaux de collecte des cendres, ainsi que pour l'extraction complète de ces gaz de combustion des chaudières à combustible spécial.

Le moteur électrique fait tourne la turbine (du ventilateur de fumée) via un accouplement à une vitesse de 992 t/min

Le ventilateur étudié repose sur des paliers rigides avec fixation au sol.

La chaîne cinématique est très simple, elle se compose d'un :

- Moteur électrique.
- Accouplement.
- Ventilateur de fumée.

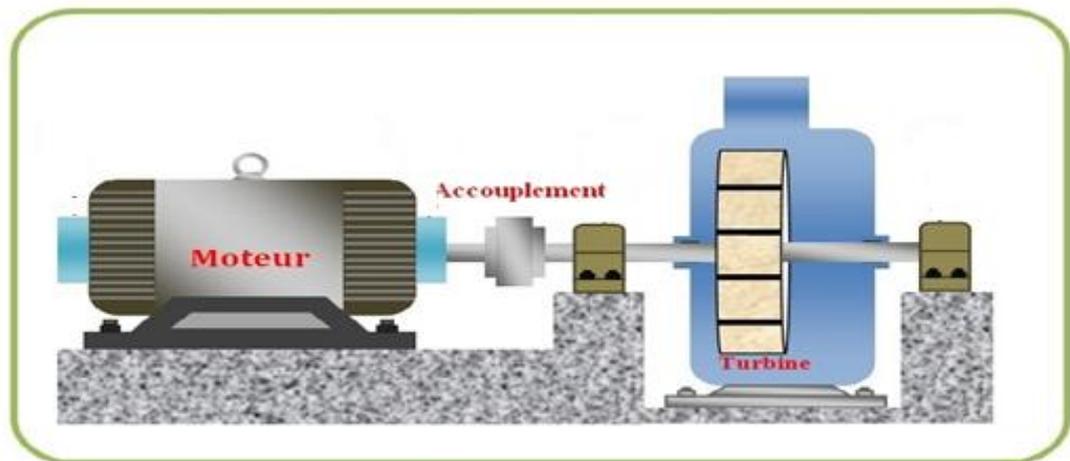


Figure 3.1 Schéma de la chaîne cinématique

3.1.2 Caractéristiques des ventilateurs de fumée de la cimenterie de Meftah (SCMI):

- **Vitesse de rotation :** 992 t/min
- **Puissance du moteur :** 1600 KW
- **Température de service :** (T°C des gaz) : 330 - 360°C
- **Rayon turbine :** 1700 mm

3.2 La conception des organes du ventilateur de fumées :

- Palier :

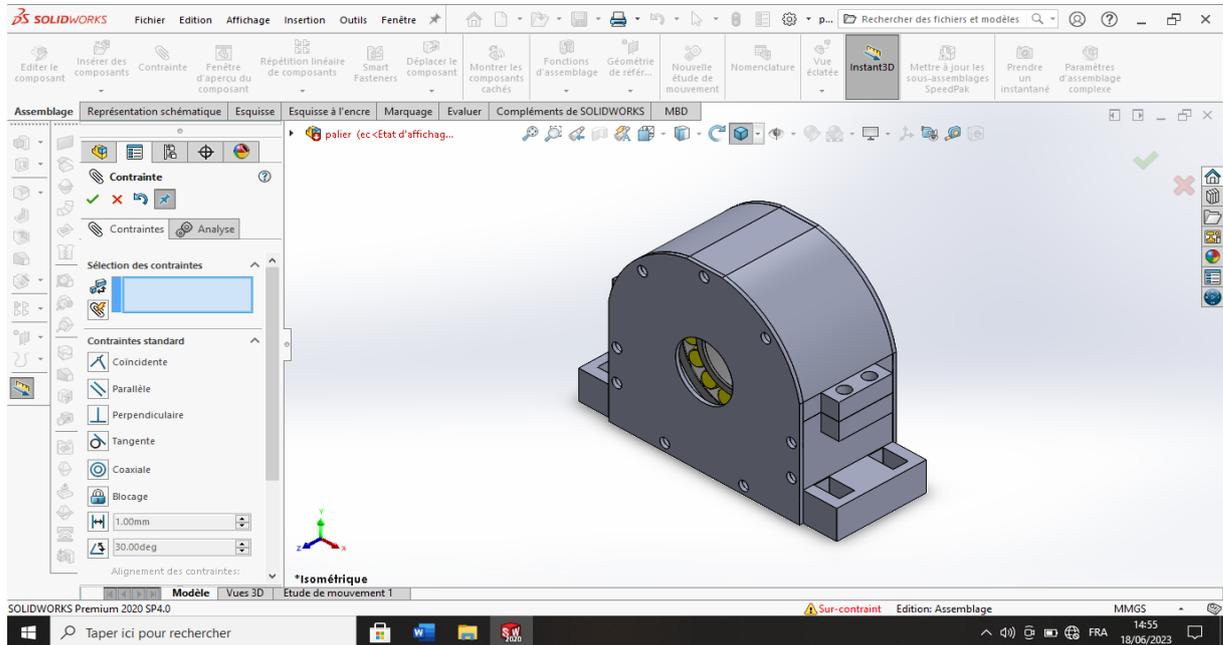


Figure 3.1 Représentation du palier du ventilateur

- Accouplement :

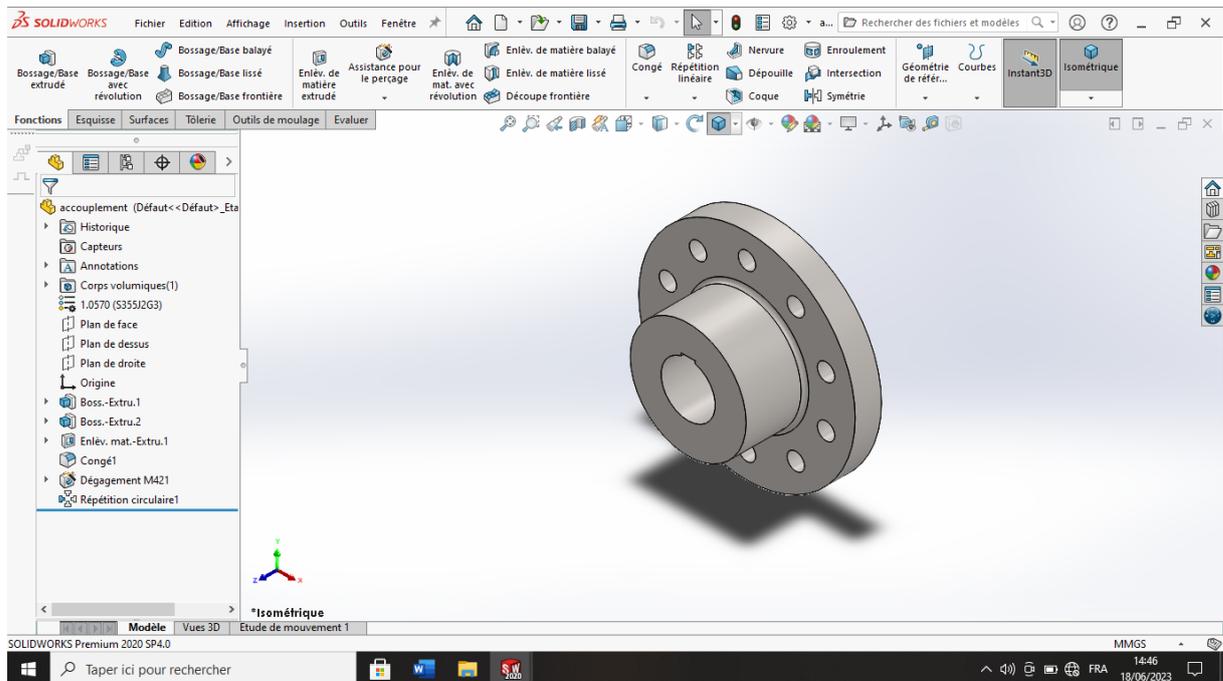


Figure 3.3 Représentation de l'accouplement du ventilateur

• Roulement :

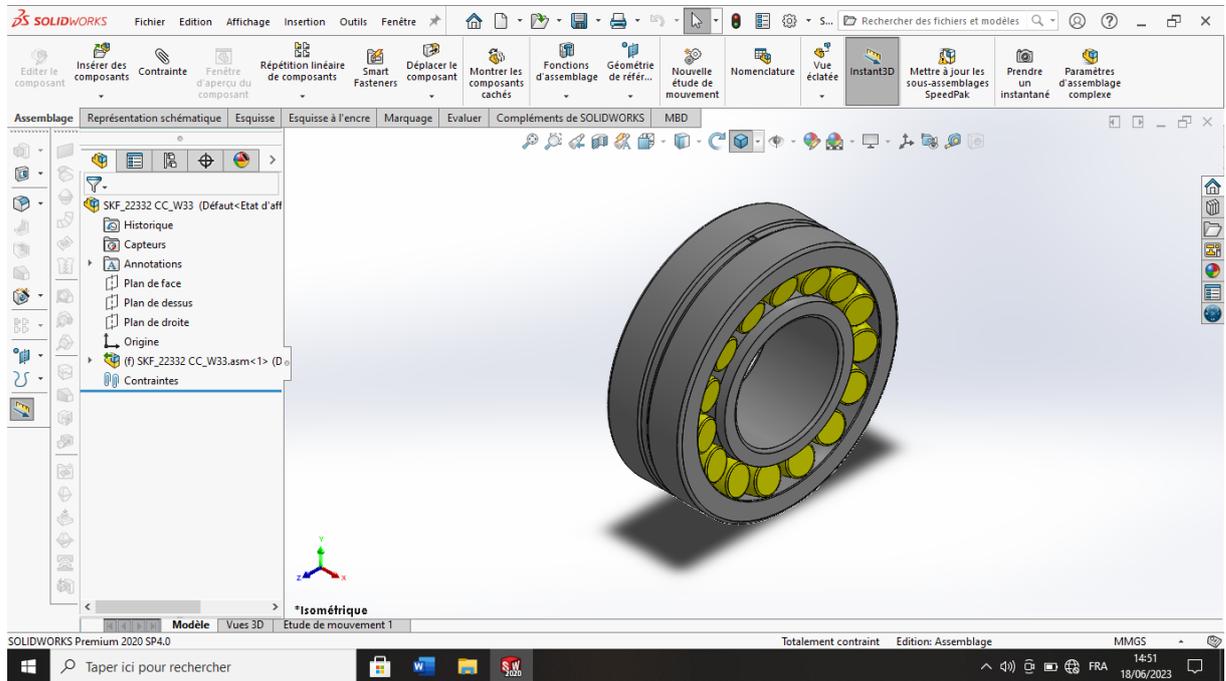


Figure 3.4 Représentation du roulement de ventilateur

• Turbine :

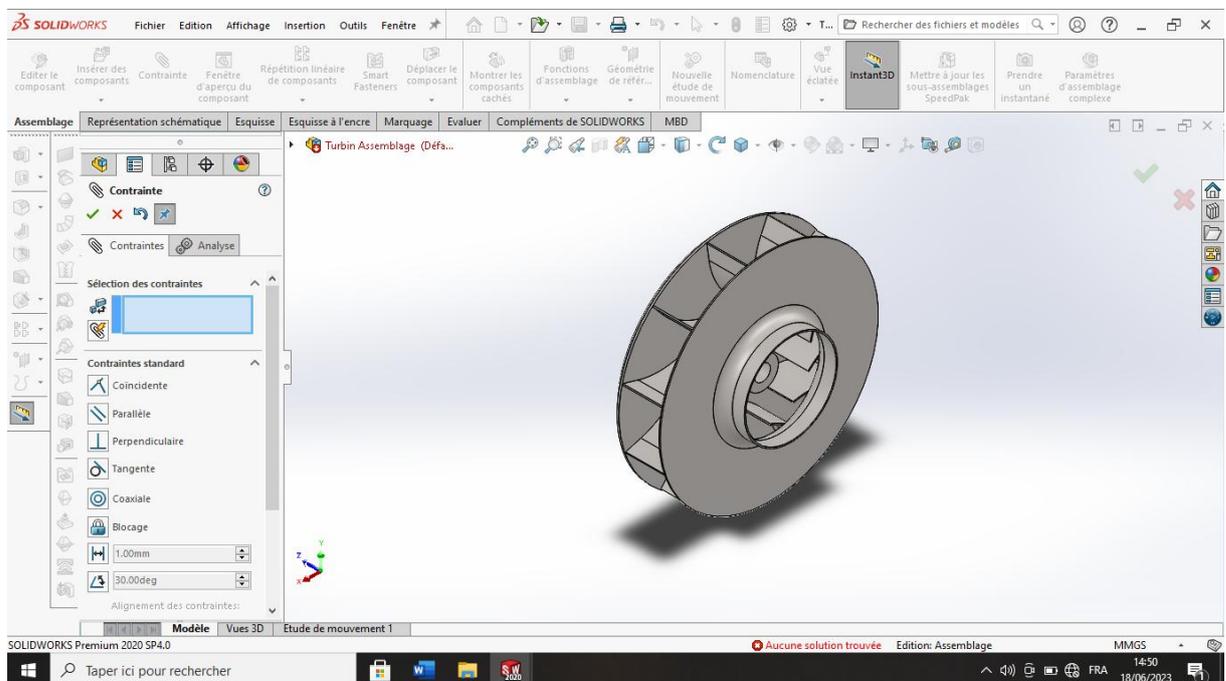


Figure 3.5 Représentation de la turbine du ventilateur

• Ventilateur de fumées :

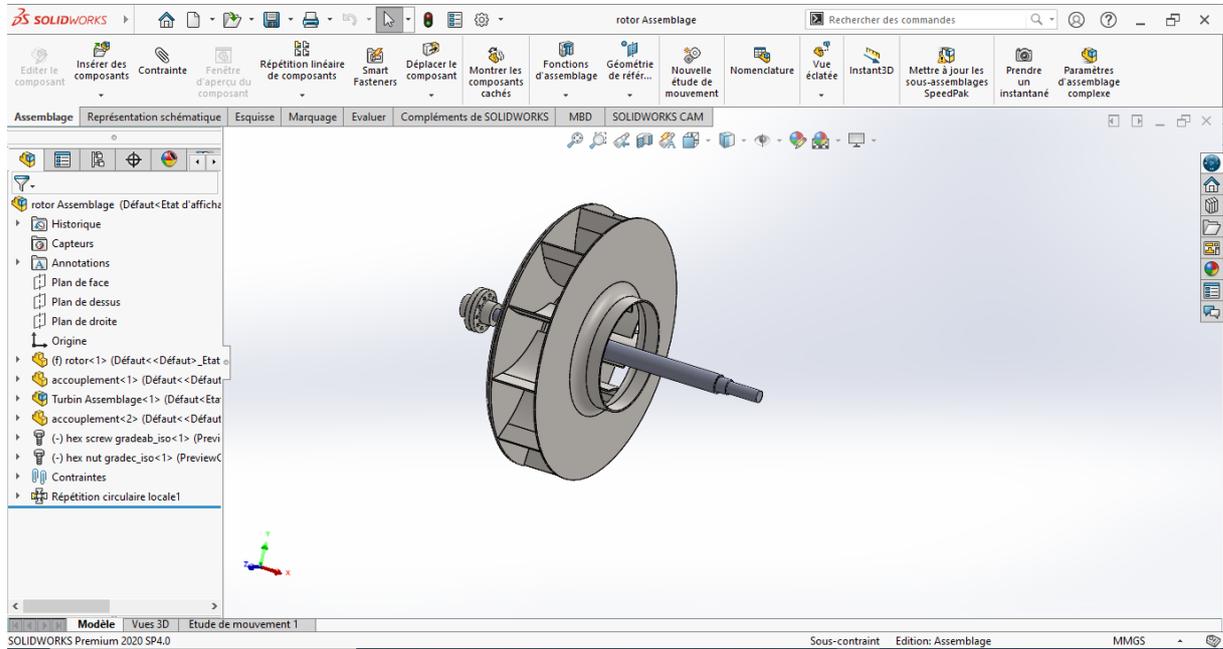


Figure 3.6 Représentation du ventilateur de fumées

3.3 Matériel utilisé:

3.3.1 SKF vibropen (CMAS100-SL) :

C'est un outil qui sert à vérifier facilement, rapidement et avec précision l'état de l'équipement rotatif de toute installation. Cet outil peut fournir aux personnels de maintenance et de contrôle une alerte précoce des problèmes potentiels de la machine avant qu'une panne ne produise. [13]

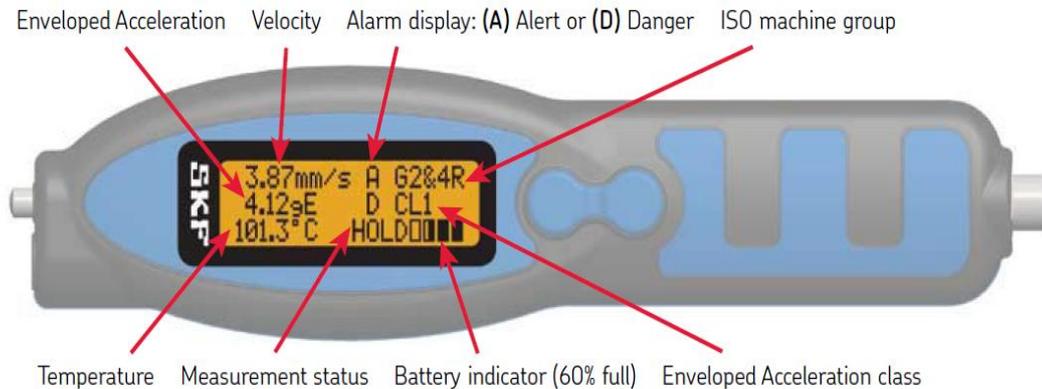


Figure 3.7 [13] SKF vibropen (CMAS100-SL)

Tableau 3.1 Caractéristiques générales du SKF (CMAS100-SL)

<p>Prise de vibrations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interne : accélération piézoélectrique intégrée. - Externe : accepte les accéléromètres de type ICP 100 mv/g. <p>Capteur de température :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Capteur de température IR interne. <p>Mensurations :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vitesse : <ul style="list-style-type: none"> -Plage: 0, 7-65 mm/s (RMS), Conforme à la norme ISO10816. -Fréquence 10-1000Hz, répond à la norme ISO2954. <ul style="list-style-type: none"> • Accélération enveloppée : <ul style="list-style-type: none"> -plage : 0,2-50,0 gE. -Fréquence : bande 3 (500-10000Hz). <ul style="list-style-type: none"> • Température : <ul style="list-style-type: none"> -Plage : -20 à +200 C°. -Précision thermique IR ± 2. -Distance : courte portée, maximum 10 cm de la cible. <p>Plage de température de fonctionnement</p> <ul style="list-style-type: none"> -En utilisation : -10 à +60 C°. -Pendant la charge : 0 à +40 C°. 	<p>Température de stockage :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Moins d'un mois -20 à 45 C°. -Plus d'un mois mais moins de six mois -20 à +35 C°. <p>Humidité : 95 % d'humidité relative sans condensation.</p> <p>Boîtier : IP54</p> <p>Approbations : CE.</p> <p>Test de chute: 2m.</p> <p>Poids : 125g.</p> <p>Dimensions:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Longueur : 200mm. -Largeur : 47mm. -Hauteur : 25,4 mm. <p>Capacité de la batterie : 550 mAh</p> <p>Autonomie de la batterie : 10 heures avant de recharger (avec capteur externe jusqu'à 30 % d'autonomie en moins).</p> <p>Capteur externe pris en charge : tout accéléromètre standard avec une sensibilité de 100 mv/g de type ICP</p>
--	---

3.3.2 Accéléromètre (One prod ASH201-A):

Caractéristiques de l'accéléromètre :

- Sensibilité : $\pm 5\%$, 25°C 100 mV/g.
- Plage d'accélération : 80 g crête.
- Non-linéarité d'amplitude : 1%.
- Plage de fréquence : 0,5 – 14 000 Hz.
- Fréquence de résonance montée : 30 kHz.
- Plage de température : -50°C – +120°C.
- Fréquence de résonance montée : 30 kHz.
- Plage des températures : -50°C – +120°C.
- Poids : 90g.
- Dimensions : (H x Ø) 53 mm x 22 Hex.



Figure 3.8 [14] Accéléromètre piézoélectrique



Figure 3.9 Câble connecteur

3.3.3 Collecteur analyseur (movipack 01dB-s'tell) [15] :

Le collecteur analyseur (movipack 01dB-s'tell) est un outil performant de collecte de données. C'est un outil des systèmes de mesure portable des vibrations en milieu industriel il est également adapté aux conditions extrême rencontrées dans l'industrie chimique et pétrochimique, la sidérurgie, la papeterie, les cimenteries, etc.



Figure 3.10 Collecteur analyseur (movipack 01dB-s'tell)

Tableau 3.2 Caractéristiques et avantages de (movipack 01dB-s'tell)

Caractéristiques générale	Avantages
<ul style="list-style-type: none"> -Écran rétroéclairé, 16 niveaux de gris, 320 x 240 pixels, 80 x 60 mm. -Clavier avec 21 touches tactiles multifonctions. -Mémoire : 32 Mo (stockage de plus de 5000 (3200 lignes) spectres). -Communication : RS232, USB et IRDA (infrarouge). -Fonctions d'autocontrôle et d'auto-étalonnage. -Batterie Li-Ion, autonomie : 8 heures en utilisation intense. -Boîtier : Polycarbonate ABS, IP65. -Conforme à la norme CE. -Dimensions : 220 x 130 x 60 mm. -Poids : 0,9 kg (pile inclus). -Température de fonctionnement : De -10°C à 50°C. -Humidité: 90% sans condensation. -Sécurité: protection IP65. 	<ul style="list-style-type: none"> -Boîtier compact et légère. -Commande à une seule main (droit ou gauche). -Interface utilisateur intuitive utilisant des icônes. -Aide en ligne. -Rapidité. -Capteurs de visée laser sans contact intégrés pour la mesure de la vitesse de rotation et de la température, aucune connexion d'accessoire externe nécessaire. -Procédure d'identification automatique du point de mesure par lecteur à distance d'étiquettes électrique évitant toute erreur de positionnement du capteur (le temps de mesure est alors réduit). -Sécurité optimal pour les interventions en environnement sévère.

3.3.4 Logiciel (system 1) [16] :

Le logiciel System 1 est une réponse tout-en-un même en matière de gestion des actifs et de surveillance de l'état des machines. S'appuyant sur les piliers stratégiques de la connectivité, de l'analyse et de la visualisation, la plate-forme System 1 fournit les données de surveillance des actifs critiques et les solutions d'analyse que l'opérateur ou le technicien de la maintenance a besoin pour assurer le bon fonctionnement de ds machin des tournantes et éviter les temps d'arrêt indésirables.

La plate-forme connectée de System 1 rassemble et stocke des données importantes sur l'état de la machine dans l'ensemble de l'entreprise dans un emplacement central, pour une analyse en temps réel, un diagnostic et une planification de la maintenance préventive basée sur l'état.

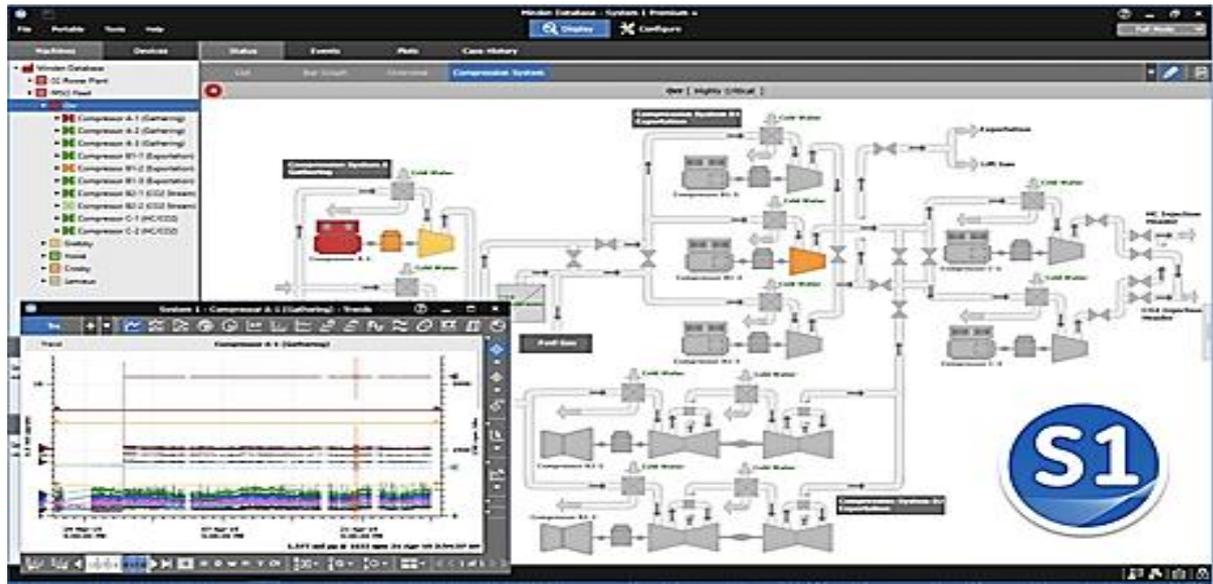


Figure 3.11 System 1

3.4 Choix des points de mesures :

Les points énumérés de 01 à 04 sur le schéma cinématique sont les points de prélèvement des mesures de vibrations.

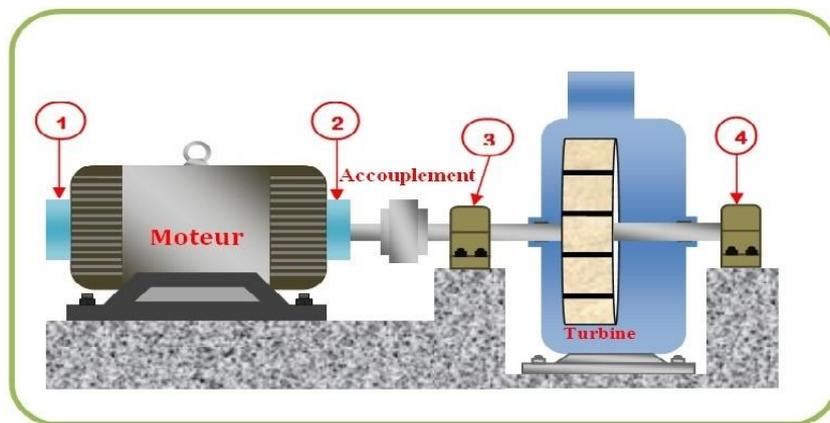


Figure 3.12 Schéma cinématique et positions des points de mesures.

On se concentre particulièrement sur les paliers N°3 et N°4.



Figure 3.13 Palier N°4



Figure 3.14 Palier N°3

On a généralement 3 positions de mesure principales :

- Radiale axiale
- Radiale horizontale
- Radiale verticale



Figure 3.15 Les positions de mesure sur le palier N°3



Figure 3.16 Enregistrement des mesures sur le palier N°3

3.5 La norme suivie (ISO10816-3) :

Niveaux vibratoires admissibles						
Norme ISO 10816-3						
Machines industrielles – Puissance supérieure à 15 kW						
Vitesse nominale entre 120 trs/min et 15000 trs/min						
Mesures in situ.						
Groupe 3						
Pompes à roue ailetée (centrifuge, hélicoïdale ou axiale)						
Avec entraînement séparé - Puissance > 15 kW						
Amplitude Vibratoire (valeur efficace)	Support rigide			Support souple		
	µm	mm/s	Zone	µm	mm/s	Zone
Bande passante: 10 – 1000 Hz si > 600 trs/mn 2 – 1000 Hz si < 600 trs/mn			D	90	11.0	D
	56	7.1	C	56	7.1	C
	36	4.5	B	28	3.5	B
	18	2.3	A			A

Figure 3.17 La norme ISO 10816-3

Groupe 1 : Eléments de moteurs ou de machines qui, dans ses conditions normales de fonctionnement, sont intimement solidaires de l'ensemble d'une machine. (Les moteurs électriques produits en série, de puissance allant jusqu'à 15 kW, sont des exemples typiques de machines de ce groupe)

Groupe 2 : Machines de taille moyenne, (en particuliers moteurs électriques de puissance comprise entre 15 et 75 kW) sans fondations spéciales. Moteurs montés de façon rigide ou machines (puissances jusqu'à 300 kW) sur fondations spéciales.

Groupe 3 : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations rigides et lourdes, relativement rigides dans le sens de la vibration, Avec Puissance > 15 kW.

Groupe 4 : Moteurs de grandes dimensions et autres grosses machines ayant leurs masses tournantes montées sur des fondations relativement souples dans le sens de la vibration (exemple : groupe turbogénérateurs, particulièrement ceux qui sont installés sur des fondations légères).

3.6 Mesure avant l'intervention (avant l'arrêt programmé)

3.6.1 Analyse de Niveau globale : Les résultats obtenus par notre mesure effectuée sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération.

Sev.	Point	Date	Mes-1 (mm/s) RMS	Diagnostic	Mes (g) RMS	Diagnostic
Moteur	P1_H	10 Jan 2023	2,630 mm/s	BON	1,717 g	BON
	P1_V	10 Jan 2023	1,169 mm/s	BON	1,139 g	BON
	P2_H	10 Jan 2023	2,608 mm/s	BON	0,567 g	BON
	P2_V	10 Jan 2023	1,926 mm/s	BON	0,745 g	BON
	P2_A	10 Jan 2023	1,966 mm/s	BON	0,495 g	BON
Turbine	P3_H	10 Jan 2023	13,41 mm/s	Danger	0,376 g	BON
	P3_V	10 Jan 2023	10,31 mm/s	Danger	0,339 g	BON
	P3_A	10 Jan 2023	4,185 mm/s	Alarme	0,218 g	BON
	P4_H	10 Jan 2023	3,715 mm/s	BON	0,149 g	BON
	P4_V	10 Jan 2023	1,810 mm/s	BON	0,123 g	BON

Résultats d'analyse :

Les critères du jugement des vibrations des niveaux globaux prises le 10 janvier 2023, illustrés dans le tableau 3.3, et d'après les normes internationales **ISO 10816-3**, nous confirmons ce qui suit :

- Les niveaux vibratoires prélevés en termes de vitesse et accélération sur les deux paliers moteur sont jugé BON
- Les niveaux de vibrations prises sur le palier N°03 dans le sens horizontal et vertical sont jugé Danger en terme de vitesse. Dans le sens axial le niveau est Alarmant, tandis qu'en termes d'accélération les niveaux sont jugé BONS dans les trois directions.
- Les niveaux de vibrations prises sur le palier N°04 en termes de vitesse et accélération sont jugé BONS dans les deux directions horizontales et verticales.

3.6.2 Analyse spectrale

Lors de nos mesures les résultats obtenus sont données par les spectres suivants.

• **Sur le palier N°3 :**

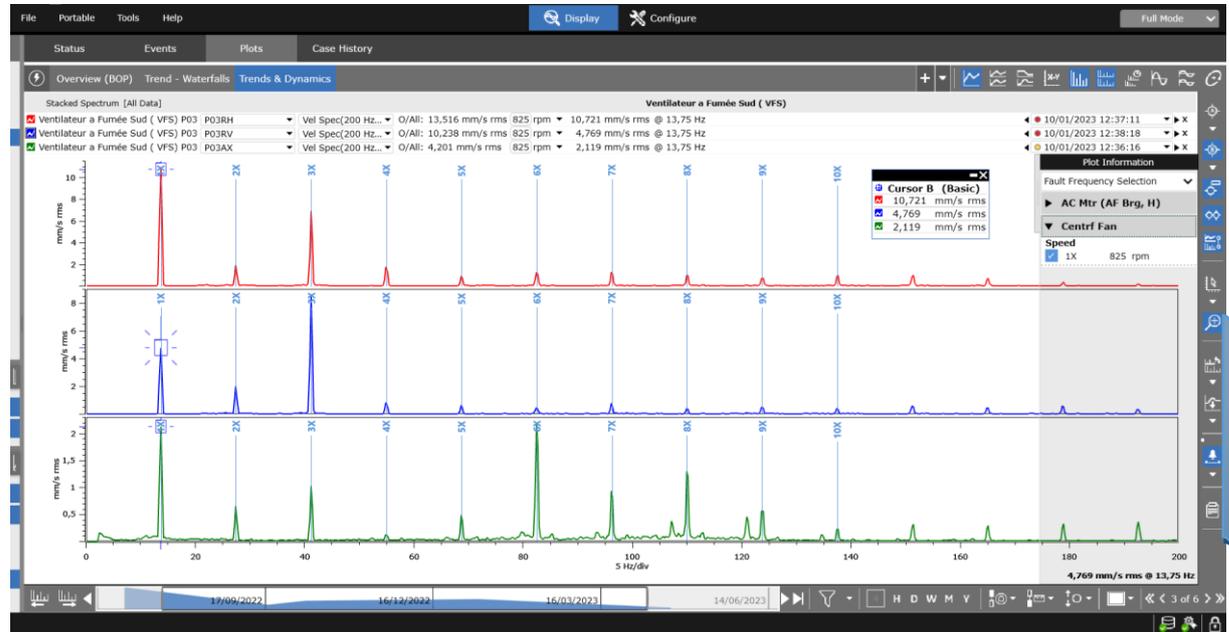


Figure 3.18 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A).

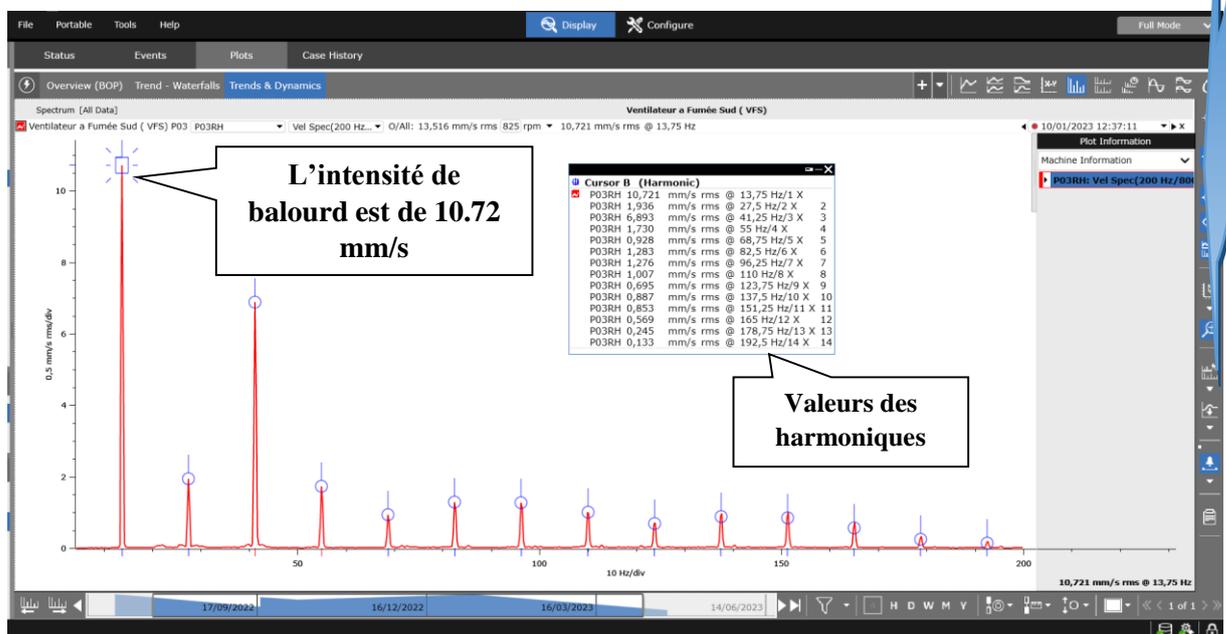


Figure 3.19 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction horizontale, illustre un balourd important sur lui.



Figure 3.20 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction verticale, illustre un désalignement.

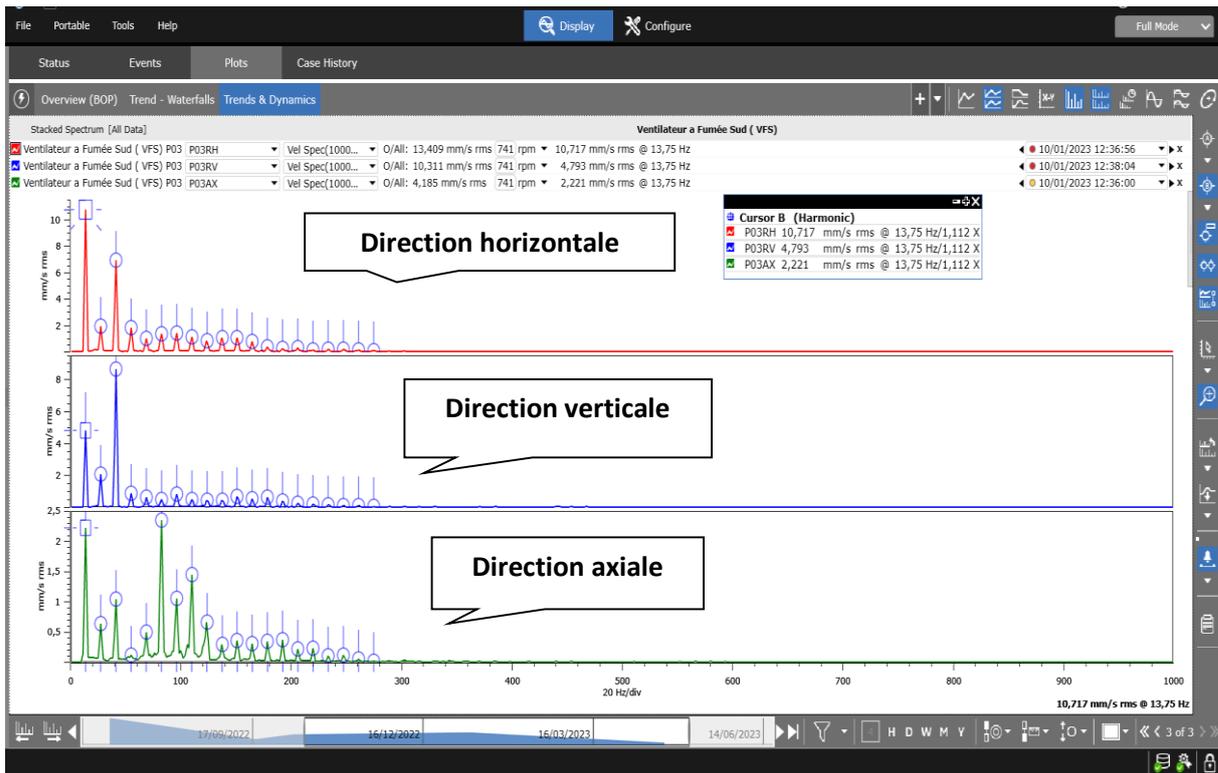


Figure 3.21 Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A).

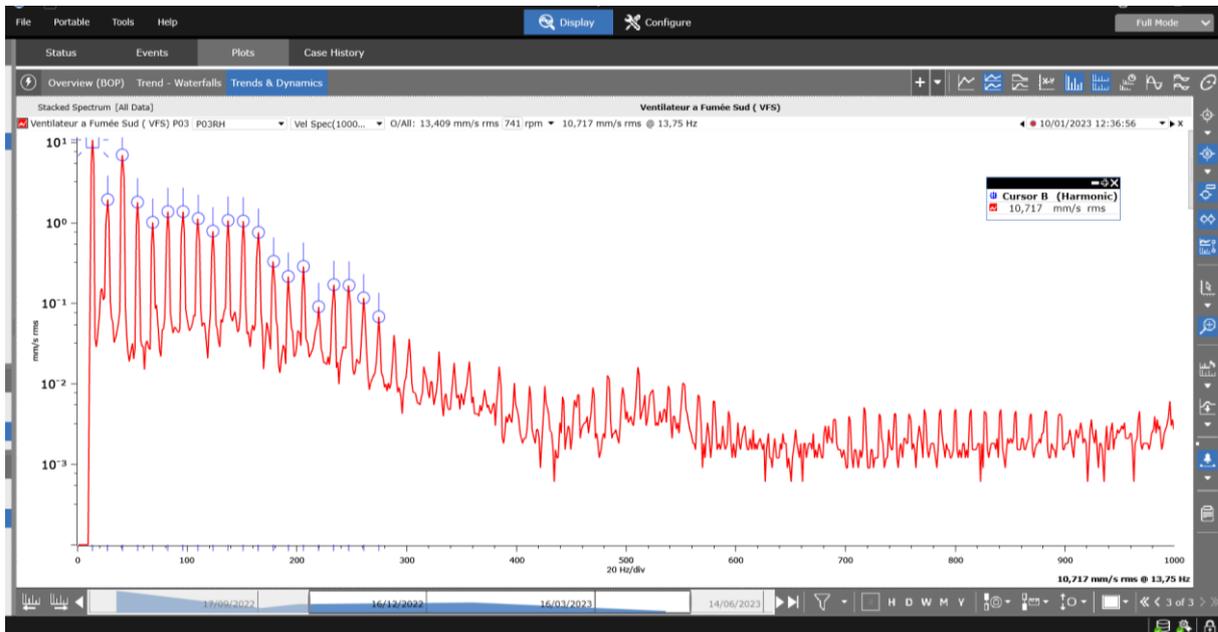


Figure 3.22 Spectrale logarithmique (moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3, met en évidence un défaut de jeu sur les portées de roulement sur l'arbre ou sur le palier.

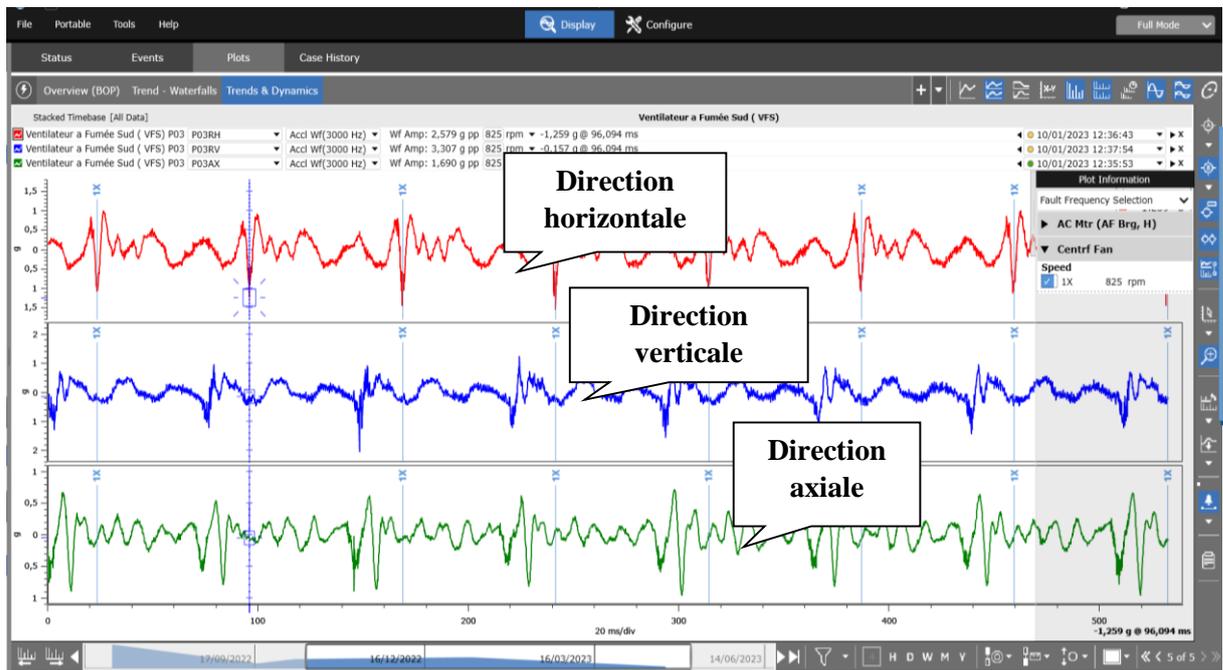


Figure 3.23 Spectrale temporaires prise sur le palier N°3, de la turbine en trois directions (H, V, A).

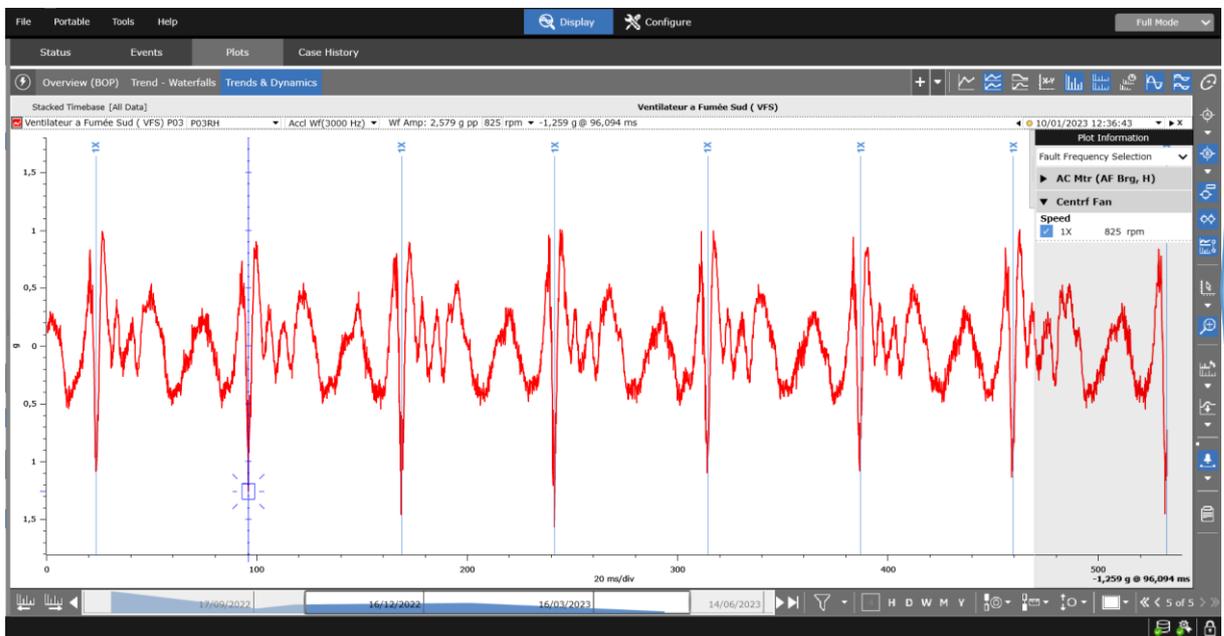


Figure 3.24 Spectrale temporaires prise sur le palier N°3 dans la direction horizontale, illustre impact de défaut de balourd lui.

Sur le palier N°4:

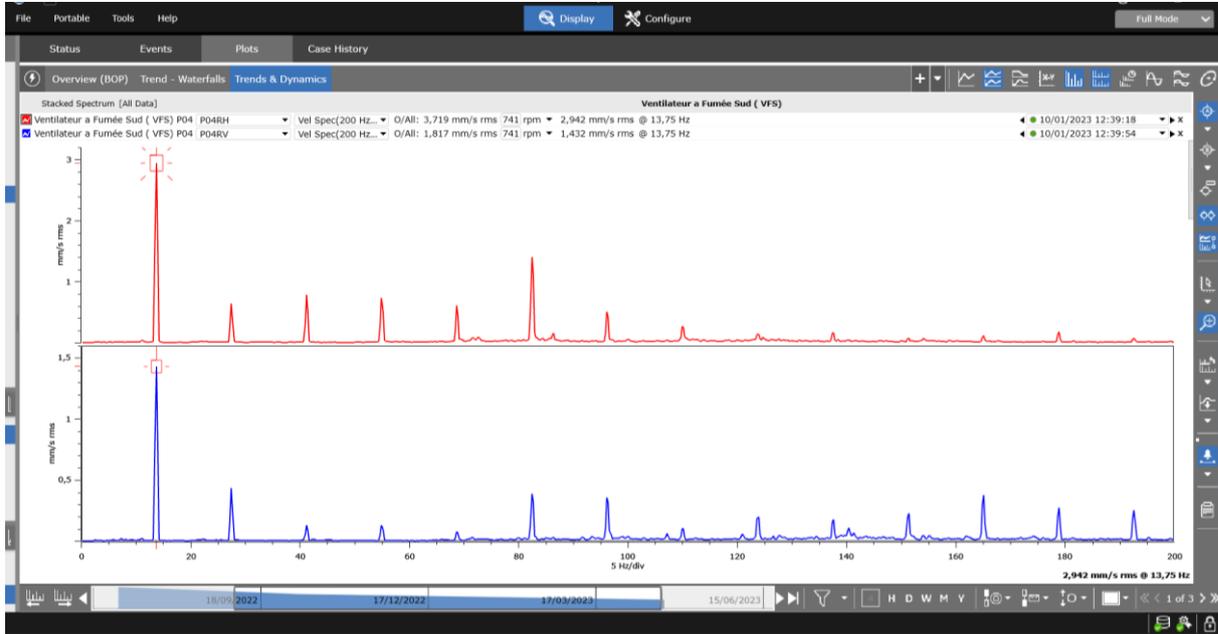


Figure 3.25 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V).

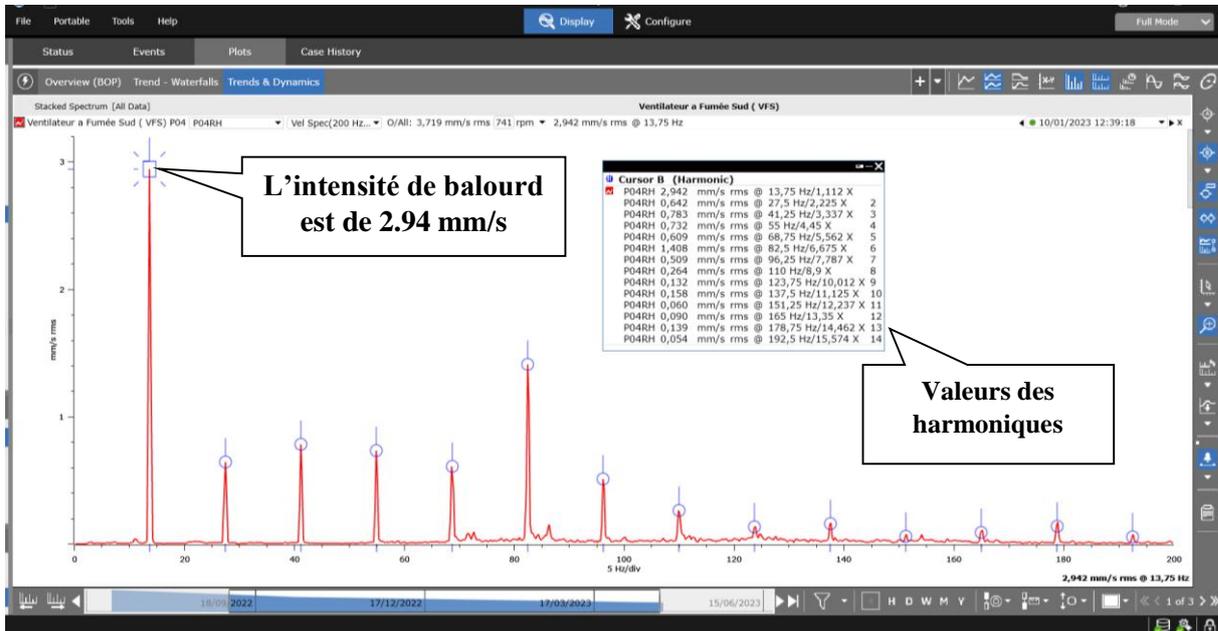


Figure 3.26 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en direction horizontale, démontre l'intensité de balourd

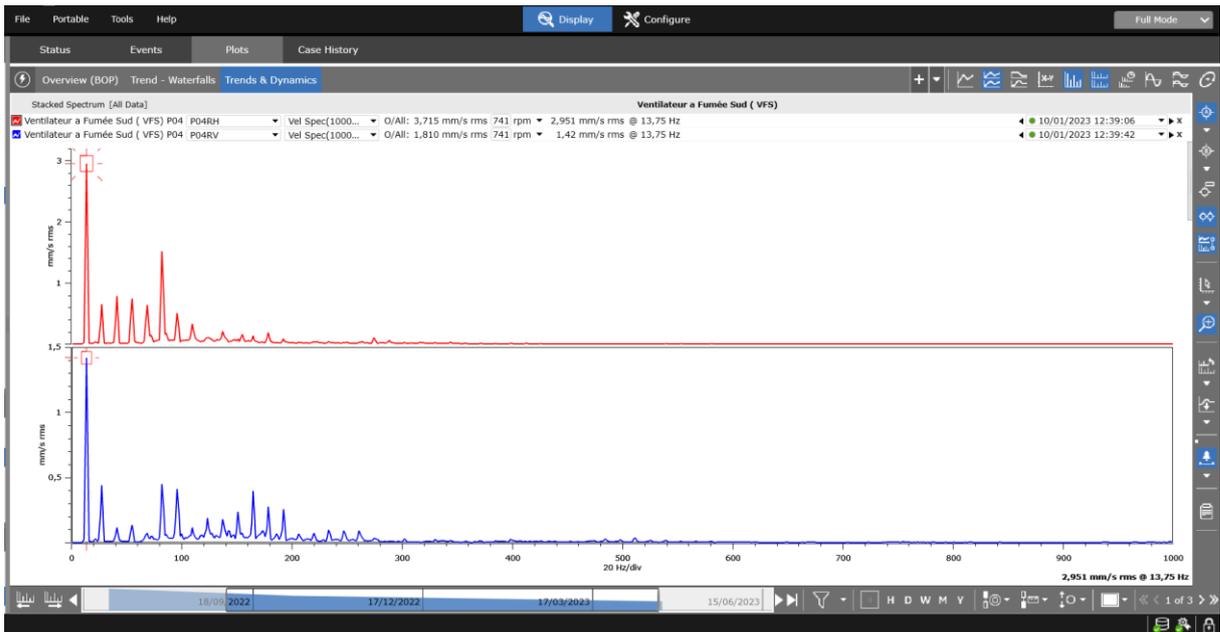


Figure 3.27 Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V).

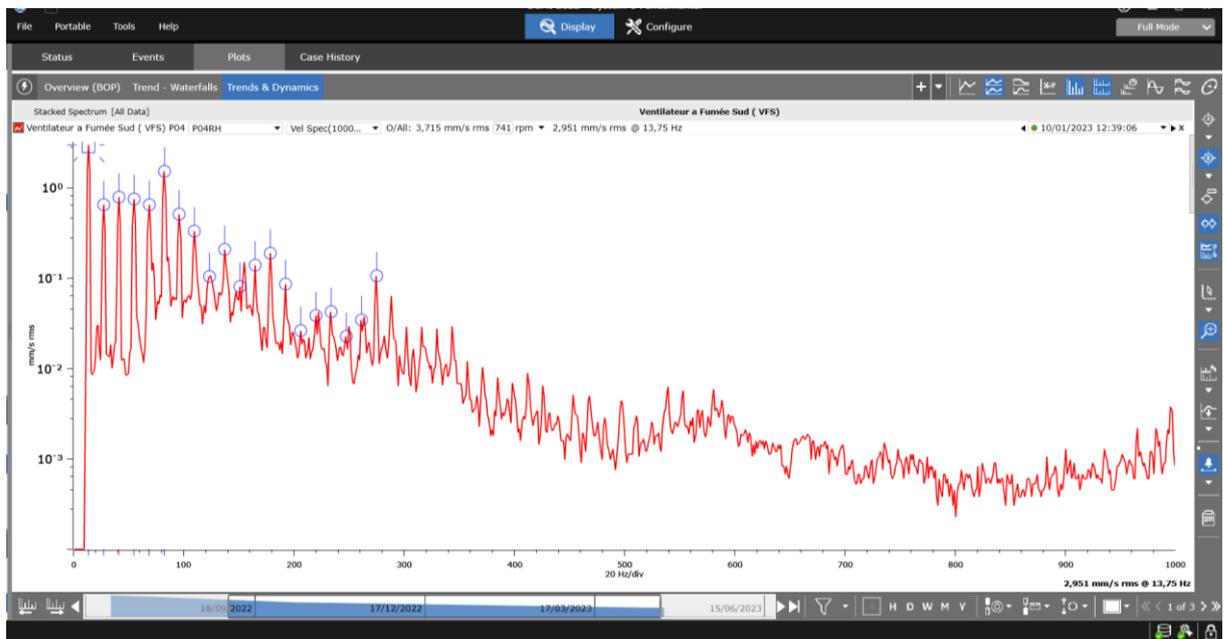


Figure 3.28 Spectrale logarithmique ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°4.

3.6.3 Résultats d'analyse

L'analyse spectrale des mesures prises sur le palier N°3 dans le sens horizontal, permet de conclure de l'apparition d'un balourd sur la turbine à la fréquence de 13.75 HZ, d'après la composante prépondérante à la fréquence de Cu indiquée présenté dans le spectre 3.18.

Le spectre pris dans le sens verticale indique la présence d'un peigne de raie à la fréquence de base de 13.75 HZ ou la troisième harmonie (13.75 x 3) ce qui nous permet de supposer de la présence d'un désalignement entre l'arbre moteur et celui de la turbine.

De l'interprétation de l'analyse spectrale on conclue une présence des anomalies suivantes :

- Un balourd sur la turbine générant des vibrations sur le palier N°3 d'un niveau de « **10.72 mm/s** » dans la direction horizontale, jugé Danger d'après les normes ISO 10816-3.
- Détection d'un désalignement entre l'arbre moteur et celui de la turbine générant des vibrations d'un niveau de «**08,53 mm/s**» comme l'indique la troisième harmonie des composantes de spectre de la figure 3.20. Ce niveau enregistré sur le palier rotor N°3 dans la direction verticale est jugé dangereux d'après les normes précitées.

Le défaut de balourd enregistré sur la turbine, est dû au problème de colmatage de la matière sur les pales de cette dernière. D'où l'importance d'une opération de nettoyage pour éliminer tous les substrats agglomérés déposés sur les pales lors de l'usage répété de la machine.

Mesures à entreprendre :

Nous recommandons de procéder aux actions suivantes :

- Nettoyage la turbine en utilisant le sablage,
- Vérification de l'état de l'accouplement entre le moteur et la turbine, en particulier le jeu entre les ressorts et les brides d'accouplement.
- Contrôle de serrage des manchons de roulements sur les deux paliers du rotor portant la turbine.
- Programmer un éventuel équilibrage de la turbine.

3.7 Nettoyage de la matière sur la turbine :

Avant le nettoyage : on voit qu'il y a un colmatage de la matière sur la roue du ventilateur



Figure 3.29 Colmatage de la matière sur la turbine

Pour le nettoyage de la roue du ventilateur on a utilisé la méthode de sablage.

3.7.1 Le sablage :

Le sablage est un procédé industriel de décapage adapté au nettoyage de grandes surfaces ou *des pièces mécaniques de toutes matières*. Le procédé consiste en la projection d'un flux d'agents abrasifs à haute pression sur une surface donnée afin d'en éliminer la couche qui l'encrasse.

On utilise du sable (ou une autre poudre ayant également des propriétés abrasives).

Cette technique est largement utilisée pour décaper des dépôts de résidus, désoxyder un métal ou un alliage, rénover les constructions en pierre ou.

En effet, la méthode implique l'utilisation de produits abrasifs très agressifs tels que le corindon, le garent et des billes de verres. La poussière provoquée par le contact des éléments abrasifs sur la surface à décapier est très dangereuse.

Dans notre cas on a utilisé le sable pour nettoyer la turbine ainsi que les équipements suivants :

- Sableuse.
- Compresseur pour la haute pression.
- Un tamis de sableuse pour tamiser le sable.
- Pistolet de sablage.



Figure 3.30 Sableuse



Figure 3.31 Tamis



Figure 3.32 Compresseur

Après le nettoyage :

On voit que la roue du ventilateur est bien nettoyée et toute la couche de matière en dépôt a été enlevée.



Figure 3.33 Turbine après sablage

3.8 Mesures après l'opération de maintenance (Après l'intervention)

3.8.1 Analyse de niveau globale :

Les résultats des mesures obtenus après intervention sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 3.4 Niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération.

Sev.	Point	Mes-1	Mes	Diagnostic	Mes-1	Mes	Diagnostic
		(mm/s) RMS 10/01/2023	(mm/s) RMS 23/04/2023		(g) RMS 10/01/2023	(g) RMS 23/04/2023	
Moteur	P1_H	2,630 mm/s	0,779 mm/s	BON	1,717 g	1,732 g	BON
	P1_V	1,169 mm/s	0,423 mm/s	BON	1,139 g	2,573 g	BON
	P2_H	2,608 mm/s	1,388 mm/s	BON	0,567 g	0,252 g	BON
	P2_V	1,926 mm/s	0,991 mm/s	BON	0,745 g	0,584 g	BON
	P2_A	1,966 mm/s	0,834 mm/s	BON	0,495 g	0,466 g	BON
Turbine	P3_H	13,41 mm/s	3,744 mm/s	BON	0,376 g	0,107 g	BON
	P3_V	10,31 mm/s	1,428 mm/s	BON	0,339 g	0,110 g	BON
	P3_A	4,185 mm/s	0,754 mm/s	BON	0,218 g	0,092 g	BON
	P4_H	3,715 mm/s	1,624 mm/s	BON	0,149 g	0,103 g	BON
	P4_V	1,810 mm/s	1,184 mm/s	BON	0,123 g	0,086 g	BON

Avec:

- Mes-1 : Mesure effectuée le 10/01/2023 (avant l'intervention).
- Mes : Mesure effectuée le 23/04/2023 (après l'intervention).

Résultats d'analyse

En comparant les résultats illustrés dans le tableau 3.4 avec ceux trouvés le 10 janvier 2023, nous constatons une baisse remarquable des niveaux de vibrations sur l'ensemble des paliers du ventilateur, en particulier sur les deux paliers N°03 et 04 de la turbine. Ces niveaux de vibrations enregistrés en termes de vitesse et accélération sont jugés BONS en se référant aux critères de jugement des vibrations, d'après la norme ISO 10816-3.

3.8.2 Analyse spectrale et comparaison :

Nous avons représenté les spectres obtenus par les prises de mesures effectuées le 10 Janvier 2023 et 23 Avril 2023, afin de mieux comparer ces résultats comme l'indique les figures ci-après :

• Sur le palier N°3 :

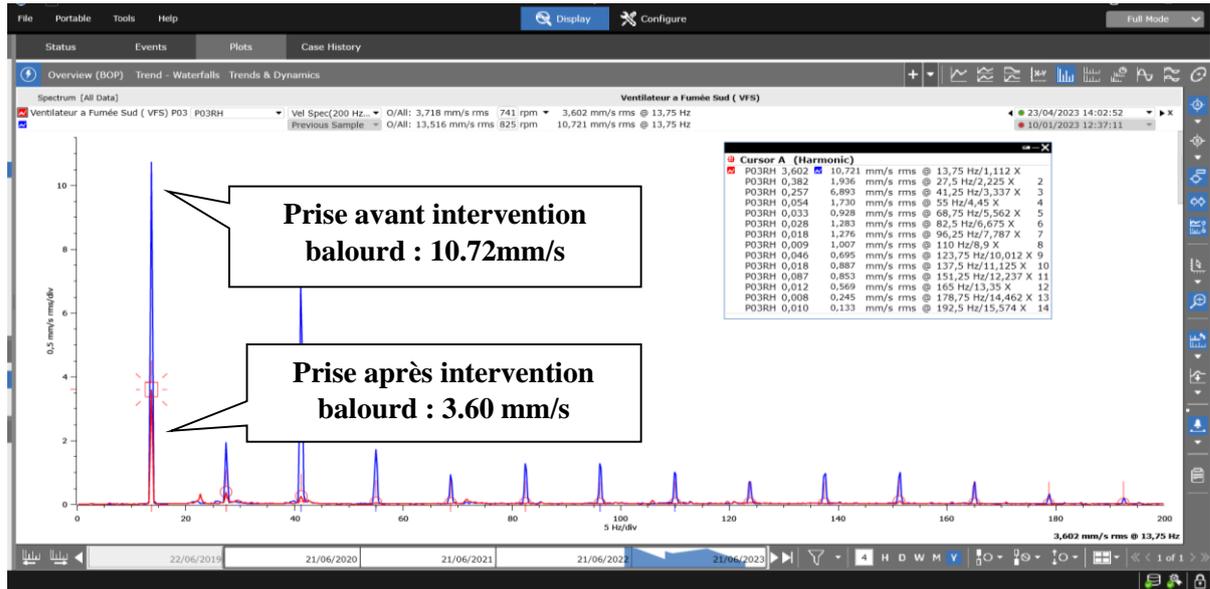


Figure 3.34 Image spectrale superposée linéaire prise sur le palier N°03 dans la direction horizontale, démontre la diminution de l'intensité du balourd sur la bande basse fréquence

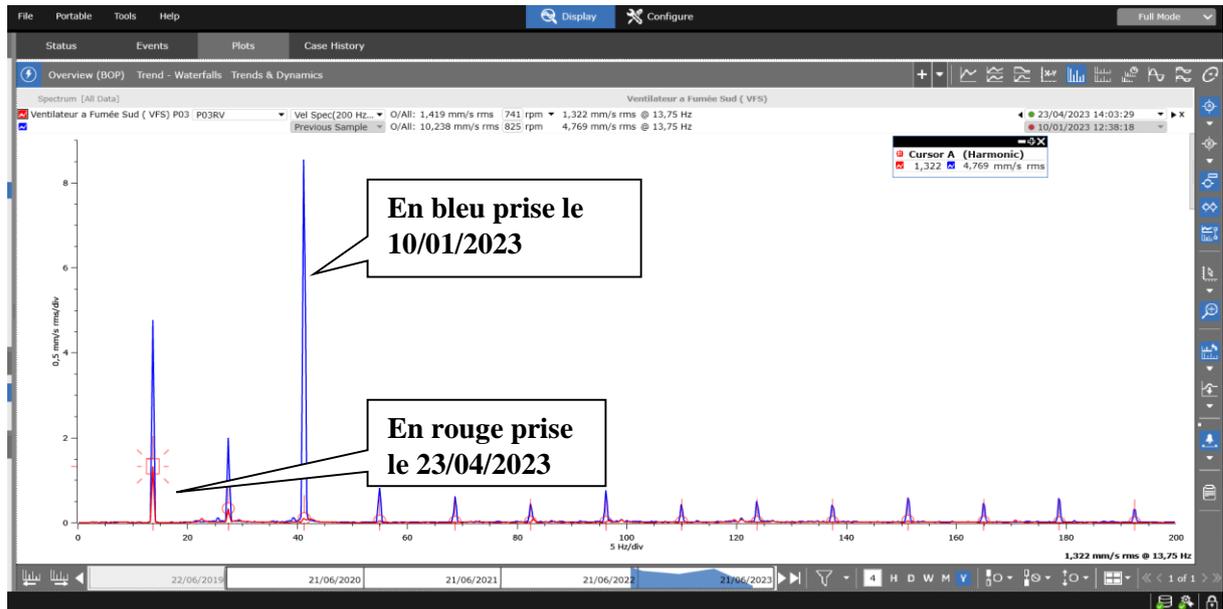


Figure 3.35 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°03 dans la direction verticale, changement du comportement sur la bande moyenne fréquence.

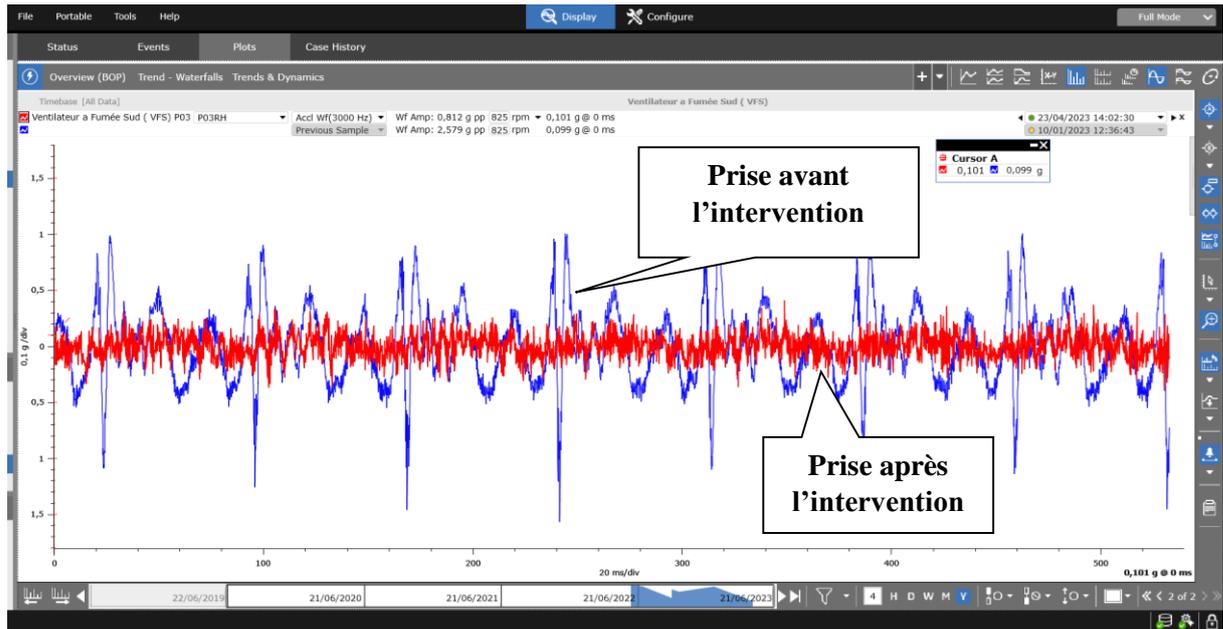


Figure 3.36 Image spectrale temporaire superposé prise sur le palier N°03 dans la direction horizontale, démontre la disparition du choc.

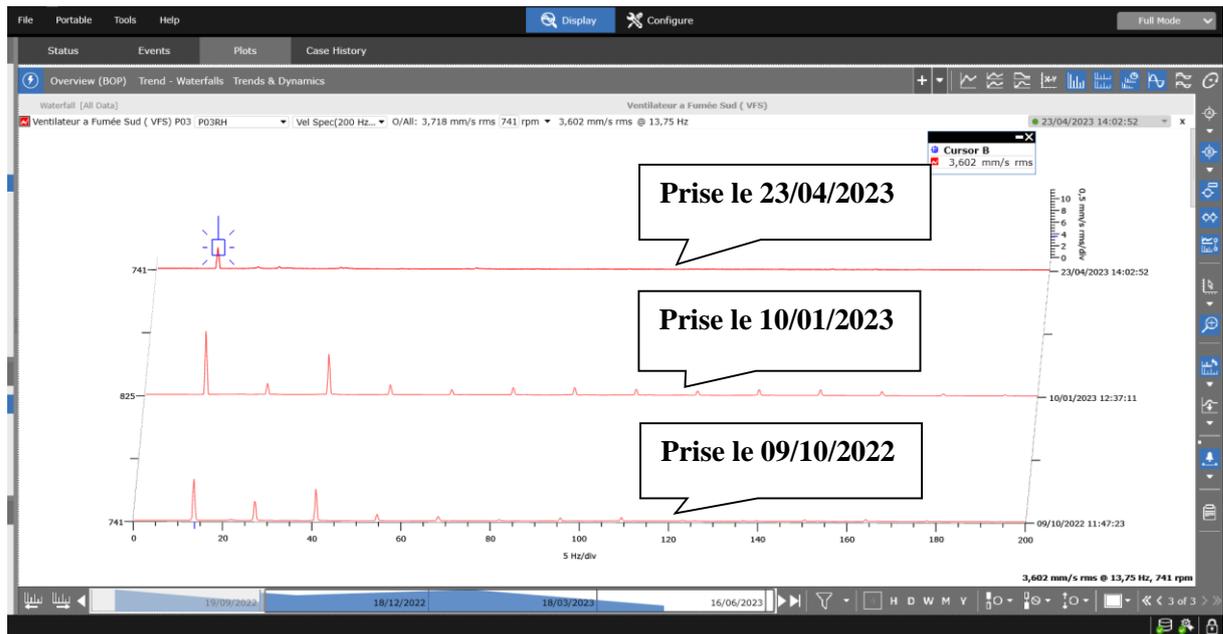


Figure 3.37 Spectrale linéaire en cascade (base fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en directions horizontale.



Figure 3.38 Courbe de tendance sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en vitesse « mm/s ».

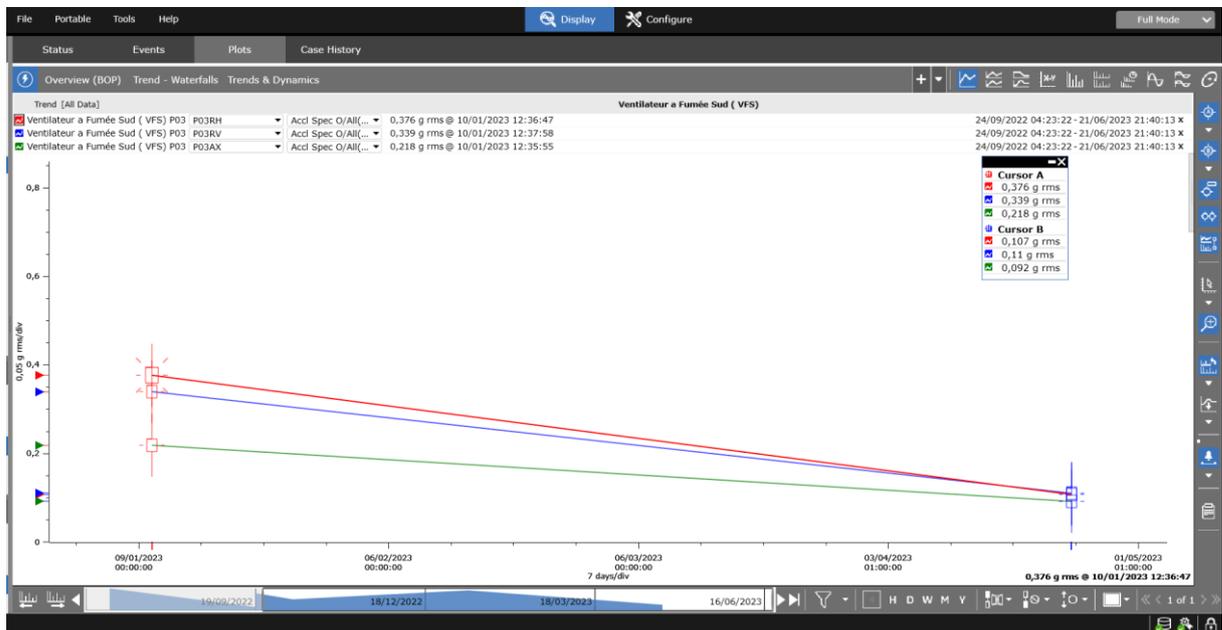


Figure 3.39 Courbe de tendance sur le palier N°3 de la turbine dans 3 directions (H, V, A), illustrant le décroissement du niveau vibratoire en accélération « g ».

- **Sur le palier N° 4 :**

Les résultats obtenus par notre mesure effectuée sont données par les spectres suivants.

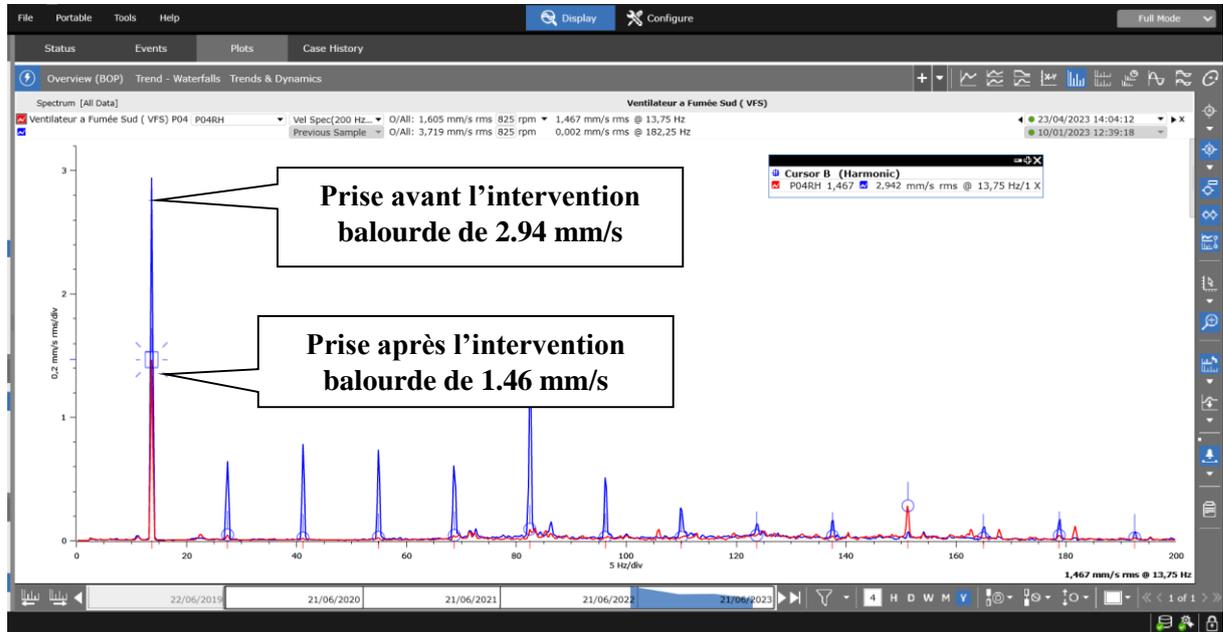


Figure 3.40 Image spectrale superposée linéaire prise sur le palier N°04 dans la direction horizontale, démontre la diminution de l'intensité du balourd sur la bande moyenne



Figure 3.41 Spectrale linéaire en cascade (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en directions horizontale.



Figure 3.42 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V), illustrant la décroissance du niveau vibratoire en vitesse « mm/s ».

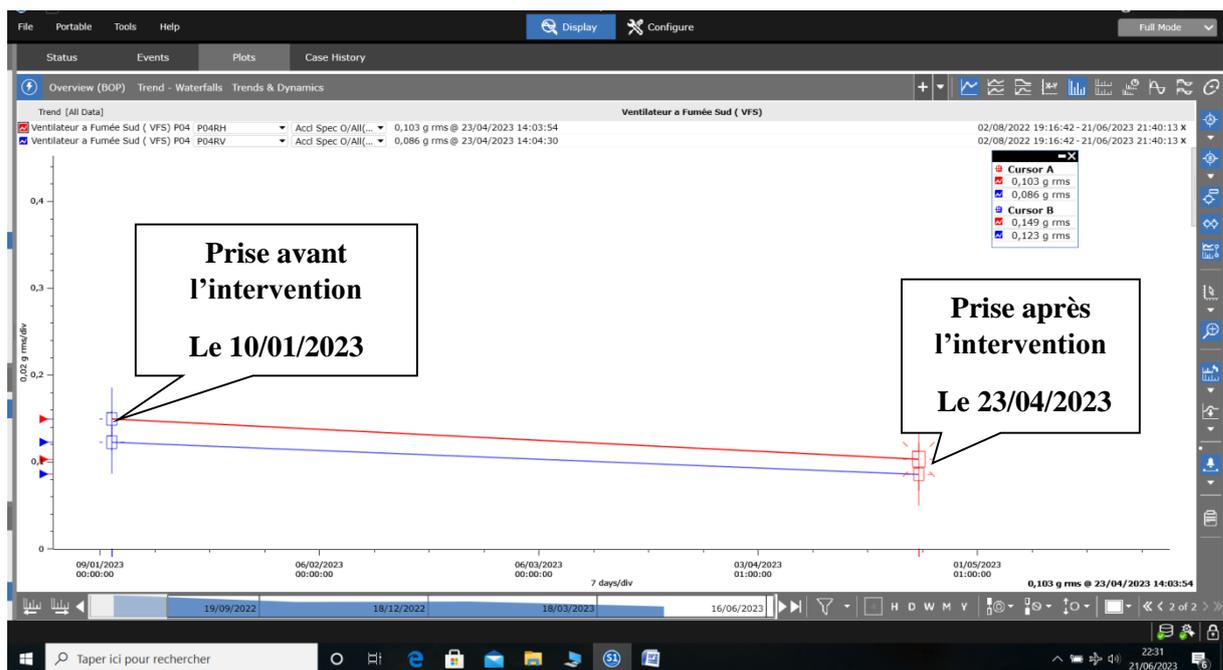


Figure 3.43 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en deux directions (H, V), illustrant la décroissance du niveau vibratoire en accélération « g ».

Conclusion :

Suites aux travaux de maintenance réalisés sur la turbine après son démontage, qui ont consisté en général au sablage des pales de la turbine en un nettoyage profond, l'analyse spectrale de mesures vibratoires, nous a permis de remarquer une baisse considérable des niveaux vibratoires en terme de vitesse et d'accélération. Cette intervention a provoqué certes un arrêt de la machine, mais a permis d'apporter les corrections des défauts enregistrés sur cet équipement.

L'installation fonctionne actuellement avec des niveaux de vibrations "Acceptables".

Conclusion générale

Dans l'industrie les machines tournantes ont un rôle important et décisif dans la chaîne de production, ce qui nous a motivés à appréhender et mieux connaître les différentes anomalies affectant ce genre de machines, car ces défauts présents sur une machine peuvent affecter toute la chaîne de production.

La recherche et l'élimination des défauts sont effectuées par des techniques de surveillance et de maintenance très efficace (dynamique), car des problèmes éventuels peuvent être décelés à un stade précoce et il est alors possible d'intervenir avant que la machine ne tombe en panne.

Comme nous avons vu, l'analyse vibratoire est sans doute l'un des piliers de la maintenance, et elle considérée comme la technique de surveillance la plus diversifiée. En effectuant un diagnostic correct d'une machine on peut préserver toute la chaîne de production.

Ce travail était axé sur l'application de l'analyse vibratoire, afin de faire la détection et le diagnostic des différents défauts qui peuvent affecter une machine tournante.

Dans le cas expérimental, on a focalisé notre travail sur la détection, la recherche, et l'analyse des défauts affectent la roue de turbine d'un ventilateur de fumée VF.

Nous avons pris des mesures par différents instruments de mesure avec l'aide des ingénieurs qualifiés et expérimentés de l'entreprise où nous avons effectué notre stage.

Les mesures au niveau global nous ont permis de connaître tous les éléments qui ont des niveaux vibratoires (en vitesse et en accélération) de toute la chaîne cinématique du ventilateur. Lors de notre analyse on s'est concentré particulièrement sur les paliers supportant la roue de ventilateur (palier N°3, palier N°4).

L'analyse spectrale représentée montre clairement les défauts situés sur les paliers (N°3, N°4). Avec la correction des éléments de vibration nous sommes arrivés à observer sur site la diminution des valeurs des défauts situées sur le ventilateur. Cette diminution des valeurs est visible par comparaison des spectres avant et après l'intervention.

En conclusion, comme l'élimination totale d'un défaut sur une machine tournante est presque irréalisable, on remarque néanmoins que suite aux appareillages de mesures existants et à la maîtrise des méthodes de mesures on peut enregistrer et analyser les résultats pour une application de correction en conséquence.

Pour éventuellement prévoir et éviter toute panne due aux vibrations et gagner ainsi un temps précieux en sauvegardant l'appareil productif.

Références bibliographiques

- [1] : **Dougdag Mourad**, Introduction de défauts dans l'étude des machines tournantes, thèse de magister, soutenu juin 2001, Université de Blida.
- [2] : **Fahssi Omar, Labchek Adnan**, Détection, étude et analyse de défauts d'une machine industrielle projet de fin d'étude, soutenu en 2016, Université de Blida.
- [3] : **Maghraoui rabah**, cours Dynamique des machines tournantes 2022, département de génie mécanique, Université de Blida.
- [4] : **David Augeix**, analyse vibratoire des machines tournantes, 2001.
- [5] : **Lendolsi foued**, Cours Génie Mécanique - Maintenance. Récupéré sur technologuepro: <https://www.technologuepro.com/cours-genie-mecanique/cours-1-techniques-surveillance/>
- [6] : **Leila NACIB**, diagnostic des défauts dans les machines tournantes par l'analyse vibratoire, thèse de doctorat soutenu octobre 2015, Université Badji Mokhtar - Annaba.
- [7] : **Mme Mehdiia Ghozlane**, technique de surveillance des machines tournantes, 2eme Edition, analyse vibratoire, analyse des huiles industrielles, thermographie infrarouge ,2015.
- [8] : **Alain Boulenger, Christian Pachaud**, Aide-mémoire, Surveillance des machines par analyse des vibrations, 2009.
- [9] : **Skf**, skf riability systems, analyse vibratoire les défauts, types
- [10] : **F. Champavier**, Origine des Vibrations Chapitre 3, Analyse vibratoire des machines tournantes, 24/06/2002.
- [11] : **Jacques Morel**, surveillance vibratoire et maintenance prédictive ,2002.
- [12] : **Cécile capdessus**, aide au diagnostic machines tournantes par traitement de signal, thèse de doctorat, soutenu le 15 décembre 1992, à l'institut national polytechnique de Grenoble.
- [13]: **SKF groupe 2008**, SKF reliability systems, www.SKF.com/cm .
- [14]: **01dB-Metravib**, Data sheet ASH201-A Accelerometer, www.01db-metravib.com .
- [15]:**01dB-stell**, Dual-channel Analyser Collector, www.01db-stell.com .
- [16]: **Bently-nevada**, system-1-condition-monitoring-software, www.bakerhughes.com