



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master

en Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Titre

**Diagnostic d'un ventilateur de fumée par analyse
vibratoire**

Promoteur :

-Mr. TIBERKAK RACHID

Co promoteur :

-Mr. MEZIANE MANSOUR

Réalisé par :

-BOUDJEMADI AIMED

- KEZAI TAKI EDDIN

- AYACH CHOAYB

Invité :

- NABI YOUNES**
- EL HACHMI HAMOUDI**

Remerciements

On tient avant tout à exprimer notre reconnaissance à MR.TIBERKAK RACHID pour avoir accepté de nous encadrer dans cette étude. On le remercie pour son implication. Son soutien et ses encouragements tout au long de ce travail.

On souhaite également remercier MR. EL HACHMI HAMOUDI Co-promoteur pour nous avoir suivis avec ses précieux conseils méthodologiques tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Merci aux professeurs du Département de Mécanique pour nous avoir transmis leur passion durant toutes ces cinq années.

On adresse nos remerciements à MR. MANSOUR MEZIAN chef département de BTC de la cimenterie de Meftah (SCMI) et Mr. NABI YOUNES ingénieur en vibrations de l'UIM (SMIF), filiales du Groupe GICA pour leurs accompagnements et leur disponibilités à nous alimenter en informations précieuses et nécessaires pour la rédaction de ce mémoire.

Nos remerciements aux membres de la famille surtout nos parents qui nous ont toujours soutenu, encourage moralement et matériellement.

En fin, on tient à exprimer nos remerciements avec une profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

*A ma chère mère, qui me donne toujours
l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier
pour moi, c'est grâce elle que j'ai en fin fini
mes études et devenir ce que je suis
aujourd'hui, je la remercie du fond de mon
cœur.*

*A mon père, pour ses encouragements et son
soutien, et surtout ses conseils qui m'ont éclairé
le chemin, ses sacrifices qui n'ont jamais cessé
pour nous mettre à l'aise et dans de bonnes
conditions pour la réussite ce travail. À mes
chères sœurs.*

*A tous mes amis sans exception, notre trinôme,
taki et choaybe qui ont contribué avec leur
présence, collaboration et disponibilité durant
toute la période de réalisation de ce modeste
travail.*

*A wassim, sami et rabah avec leur
encouragement et soutien moral.*

*À toute la famille BOUDJEMADI, et à tous les
enseignants.*

IMAD EDDINE

Je dédié ce travail

*A ma mère et mon père qui m'ont soutenu et
encouragé durant ces années d'étude, qu'ils
trouvent ici le témoignage de ma profonde
reconnaissance.*

*A mes frères et sœurs et ceux qui ont partagé
avec moi tous les moments d'émotion lors de la
réalisation de ce travail*

*A lhaj et TaTa Samira qui supporté et
encouragé toute l'année*

À toute la famille Kezai et Kouicem .

*Je remercie mon ami Imad Eddine et Choayb
pour tous les jours d'études et les beaux jours
que nous avons passés avec Wassim, Rabah et
Sami.*

*A mes amis d'enfances Mohamed Amzaine,
Hichem Haoua, Abdraouf et kadar larbas*

Merci

TAKI EDDINE

*Je dédie cet humble travail : à ma mère, qui
m'a donné de l'espoir et n'a jamais lésiné sur la
prière pour moi, à mon père pour ses
encouragements et son soutien, à tous mes
frères et amis et à ceux qui ont contribué de
près ou de loin à ma réussite, et à tous les
enseignants, sans oublier la famille
universitaire et les encadrants de cette
graduation.*

CHOAYB

ملخص

يهدف العمل الحالي إلى تطوير نهج لحل مشكلة اهتزاز مروحة العادم VF2 في فرن مصنع الأسمنت مفتاح. تم إجراء قياسات تجريبية على العديد من نقاط السلسلة الحركية. من أجل تشخيص أعطال تشغيل المروحة من أجل تصحيحها.

سوف يتقارب تحليل وتفسير النتائج نحو ما يسمى بالتشخيص الشامل والنوعي، والنتيجة هي الإجراءات التصحيحية أو العلاجية للألة.

هذا هو السبب في أن الصيانة الوقائية للألات الدوارة تتطلب مراقبة شبه دائمة لاهتزازاتها. ومع ذلك، فإن السلوك الصحي مرادف لمستوى منخفض من الاهتزازات.

Résumé

Le présent travail a pour objectif d'élaborer une approche pour résoudre le problème de vibrations du ventilateur exhausteur VF2 du four de la cimenterie de Meftah. Des mesures expérimentales ont été faites sur de nombreux points de la chaîne cinématique dans le but de faire un diagnostic des défauts de fonctionnement du ventilateur afin de les corriger.

L'analyse et l'interprétation des résultats convergeront vers un diagnostic dit exhaustif et qualitatif dont l'aboutissement, est les actions correctives ou curatives de la machine.

C'est pour cela que la maintenance préventive des machines tournantes, passe par une surveillance quasi-permanente de leurs vibrations. Cela dit un comportement sain est synonyme d'un bas niveau de vibrations.

Abstract

The objective of This work is to develop an approach to solve the vibration problem of the VF2 exhaust fan of the Meftah cement plant. Experimental measurements have been made on many points of the kinematic chain. The aim was to diagnose the fan's operating faults in order to correct them.

The analysis and interpretation of the results will converge towards a so-called exhaustive and qualitative diagnosis, the outcome of which is the corrective or curative actions of the machine.

This is why the preventive maintenance of rotating machines involves almost constant monitoring of their vibrations. This being said, healthy behaviour is synonymous with a low level of vibration.

Liste de symbole

A_t : Accélération.

A_0 : Accélération maximale.

AAF2 : American air filtre.

ABB :

AC : amplitude crêt.

ADAPT : systèmes de protection des machines.

Aeff : amplitude efficace.

Ascent® : logiciel inclus dans le VB8.

Belzona : fait d'une résine époxy sans solvant renforcé d'un alliage d'acier silicium.

BPI : Défaut piste intérieure.

BPO : Défaut piste extérieure.

BS : Défaut de billes.

BV-3 : groupe 3 la norme iso.

°C : degré Celsius.

CC : alésage conique et alésage cylindrique.

CPM : nombre de cycles par minute.

daPa : deca pascal.

DMD : demande de mise à disposition.

E : Dégradation

EMR : entretien du matériel roulant

EPI : Equipment exigé dans l'entreprise (gille casque, godasse).

E.R.C : entreprise régionale des ciments

f : fréquence du signal.

FB : défaut d'élément roulant.

F_C : Facteur de crêt.

F_D : Facteur défaut.

FFT : fast Fourier transform.

FT : Défaut de cage.

G : unité d'accélération.

GOS : go one stage (pour aller plus loin) référence de palier.

HBF: Hubert Bals Fund (fabricant).

HFD : haute fréquence du roulement. Des outils tels que.

H, V, A : radial (horizontale, verticale) et axial.

Hz : nombre de cycles par seconde.

ISO 10816: la norme.

IEPE: Integrated Electronics Piézo-Electrique.

KW: kilowatt.

LOTO: Lock Out Tag Out.

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

m/S² : unité accélération (mètre par seconde ou care).

mV/g : sensibilité de capteur.

η : rendement.

NA442 : la norme Algérienne

NGD : niveaux globale dynamique.

nanNm : L'unité couramment utilisée est le nanomètre.

ODS : Operational Deflection Shape.

φ : Déphasage par rapport à l'origine des temps.

ΔP : défiance de la pression.

ω : Pulsation.

Rad /s : radient par seconde.

RACK 3500 : systèmes de protection des machines.

RMS : Root Mean Square.

RWN : référence de palier.

RPM : Revolutions per minute, équivalent de tours par minute.

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition.

S.C.MI : la société des ciments de la mitidja.

SEE: Spike Energy.

SKF: Svenska Kullager Fabriken, ou SKF.

S.N.M.C : la nationalisation des matériaux de construction

S.P.A : Société par Action.

SSB : appelée la surface spécifique de Blaine

tr/min : tour par minute.

V₀ : vitesse maximale.

V(t) : vitesse.

VB8 : collecteur analyseur (bently nivada).

VF1 : ventilateur de fumée 1.

VF2 : ventilateur de fumée 2.

VFs : les deux ventilateurs de fumée nord et sud.

V&H : direction radiale

W33 : Rainure annulaire et trois trous de lubrification dans la bague extérieure.

WINCC : un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA).

X (t) : déplacement.

X0 : déplacement maximale.

780A-D2 : référence de capteur.

Liste des figures

Figure 1.1 :	Schéma d'un ventilateur	04
Figure 1.2 :	Ventilateur axial	05
Figure 1.3 :	Ventilateur centrifuge	05
Figure 1.4 :	Roue de ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'avant (double)	05
Figure 1.5 :	Roue de ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière (double ouïe)	06
Figure 1.6 :	Roue de ventilateur centrifuge à aubes radial	06
Figure 1.7 :	Roulement SKF à rotule à rouleaux	09
Figure 1.8 :	Turbine	09
Figure 1.9 :	Palier (GOS.HBF.332)	10
Figure 1.10 :	Accouplement rupex560 rwn	10
Figure 1.11 :	Moteur asynchrone	11
Figure 1.12 :	Les différents types de maintenance industrielle.....	16
Figure 2.1 :	Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal.....	19
Figure 2.2 :	Les grandeurs de mesure	20
Figure 2.3 :	Balourd de couple	23
Figure 2.4 :	Balourd statique	23
Figure 2.5 :	Balourd dynamique	23
Figure 2.6 :	Désalignement parallèle	24
Figure 2.7 :	Désalignement angulaire	25
Figure 2.8 :	Constitution générale d'un roulement	26
Figure 2.9 :	Spectre de chocs en détection d'enveloppe	31
Figure 2.10 :	Spectre de chocs	31
Figure 2.11 :	Spectre temporelle d'un choc	32
Figure 2.12 :	Accéléromètre fonctionnant sur le principe piézo-électrique	33
Figure 2.13 :	La plage de fréquence d'accéléromètre	34
Figure 2.14 :	Courbes de réponses en fréquence des accéléromètres à sensibilité différent	34
Figure 2.15 :	Courbes de réponses en fréquence des accéléromètres	35
Figure 2.16 :	Vélocimétrie fonctionnant selon le principe électrodynamique	35
Figure 3.1 :	Niveaux globale on ligne affiche à salle de contrôle	38
Figure 3.2 :	Collecteur analyseur (VB8)	39
Figure 3.3 :	Accéléromètre de type piézoélectrique	40
Figure 3.4 :	Image du logiciel system 1	41
Figure 3.5 :	La Norme ISO 10816	42
Figure 3.6 :	Schéma cinématique et points de mesures de la machine	43
Figure 3.7 :	Acquisition sur site	44
Figure 3.8 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A)	45
Figure 3.9 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction horizontale, illustre un balourd important sur lui	45
Figure 3.10 :	Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A)	46
Figure 3.11 :	Spectrale logarithmique ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3, met en évidence le défaut de roulement sur lui	46
Figure 3.12 :	Spectrale temporaires prise sur le palier N°3, de la turbine en trois directions (H, V, A)	47
Figure 3.13 :	Spectrale temporaires prise sur le palier N°3 dans la direction verticale, illustre le choc important sur lui	47
Figure 3.14 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A)	48
Figure 3.15 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en	48

	direction axiale, démontre l'intensité de désalignement	
Figure 3.16 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en direction verticale, illustre un choc important à ½ la fréquence de rotation lui	48
Figure 3.17 :	Spectrale temporaires prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre l'écaillage de la bague interne de son roulement	49
Figure 3.18 :	Spectrale linéaire prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre l'écaillage de la bague interne de son roulement	49
Figure 3.19 :	Spectrale linéaire (basse fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°4 démontre un défaut sur élément roulant de son roulement	50
Figure 3.20 :	Spectrale logarithmique (basse fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°4 démontre un défaut sur élément roulant de son roulement	50
Figure 3.21 :	Palier remplacé	52
Figure 3.22 :	Roulement remplacé	53
Figure 3.23 :	La pâte belzona sur l'arbre	53
Figure 3.24 :	Colmatage de la turbine	53
Figure 3.25 :	Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°03, démontre la diminution de l'intensité du balourd. du choc sur la bande moyenne fréquence	55
Figure 3.26 :	Spectrale logarithmique superposé prise sur le palier N°3, démontre la disparition du défaut roulement sur lui après l'intervention	56
Figure 3.27 :	Image spectrale temporaire superposé prise sur le palier N°03, démontre la disparition du choc	56
Figure 3.28 :	Spectrale linéaire en cascade (moyen fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en directions verticale	57
Figure 3.29 :	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 »	57
Figure 3.30 :	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 »	58
Figure 3.31 :	Spectrale linéaire en cascade (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en directions verticale	59
Figure 3.32 :	Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°04, démontre la disparition du choc	59
Figure 3.33 :	Spectrale temporaires superposé prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre la disparition de défaut de roulement (l'écaillage de la bague interne)	60
Figure 3.34 :	Spectrale logarithmique superposé prise sur le palier N°4, démontre la disparition du défaut roulement sur lui après l'intervention réalisé	60
Figure 3.35 :	Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en vitesse « mm/s »	61
Figure 3.36 :	Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en accélération «g »	61
Figure 4.1 :	L'arbre en SolidWorks	64
Figure 4.2 :	Graphe fréquence propre de l'arbre	65
Figure 4.3 :	Mode 1 la déformation de Von mises à vitesse de rotation = 0 tr/min	65
Figure 4.4 :	Mode 2 déformation de Von mises à vitesse de rotation = 0 tr/min	66
Figure 4.5 :	Mode 3 déformation de Von mises à vitesse de rotation = 0 tr/min	66
Figure 4.6 :	Mode 4 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min	67
Figure 4.7 :	Mode 5 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min	67
Figure 4.8 :	Mode 6 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min	68
Figure 4.9 :	L'arbre et turbin en SolidWorks	69
Figure 4.10 :	Arbre-Turbine avec paliers.....	70
Figure 4.11 :	Température 385 c	70
Figure 4.12 :	Déplacement total a vitesse de rotation 825 tr/min	71
Figure 4.13 :	Contrainte équivalente Von mises	71
Figure 4.14 :	Coefficient de sécurité	72

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :	Types de ventilateur	05
Tableau 1.2 :	Classification des ventilateurs industriels	07
Tableau 1.3 :	Avantage est inconvenient des ventilateurs industriel	08
Tableau 1.4 :	La valeur limites de vibrations suivant la norme ISO 14694	14
Tableau 1.5 :	Les incidents eventuels et les remèdes	15
Tableau 2.1 :	Nature de la vibration selon les variations de son amplitude en fonction du temps	21
Tableau 2.2 :	Formules pour le calcul des fréquences des défauts	26
Tableau 3.1 :	Historique d'intervention sur ventilateur de la fumée	37
Tableau 3.2 :	Caractéristiques d'accéléromètre	40
Tableau 3.3 :	Des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération	44
Tableau 3.4 :	Les pièces remplacent	54
Tableau 3.5 :	Des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération	55
Tableau 4.1 :	Modélisation et caractéristiques physiques de l'arbre	64
Tableau 4.2 :	Fréquence propre de l'arbre	64
Tableau 4.3 :	Propriété physique de l'arbre et turbin	69

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre 1 Généralité sur les ventilateurs	
1.1. Introduction	03
1.2. Définition d'un ventilateur	03
1.2.1. Les différentes parties d'un ventilateur centrifuge	03
1.2.2. Principe général de fonctionnement	04
1.3. Type de ventilateur	05
1.4. Classification des ventilateurs	06
1.5. Domaine d'application des ventilateurs industriels	07
1.6. Avantages et inconvénients des ventilateurs industriels	08
1.7. Les organes du ventilateur de fumées	08
1.7.1. Roulement	08
1.7.2. Turbine	09
1.7.3. Palier	09
1.7.4. Arbre	10
1.7.5. Accouplement	10
1.7.6. Moteur	10
1.8. Étude de cas de ventilateurs de tirage du four de la cimenterie de Meftah	11
1.8.1. Caractéristiques des ventilateurs de tirage de la cimenterie de Meftah	11
1.8.2. Résultat escompté des VFs	12
1.8.3. Résultat escompté des VFs	12
1.8.4. Résultat escompté des VFs	12
1.8.5. Fonctionnement et process des VFs	12
1.9. Surveillance	14
1.10. Maintenance	
1.10.1. Introduction	
1.10.2. Les différents types de maintenance industrielle	
1.11. Conclusion	16
Chapitre 2 La surveillance par l'analyse vibratoire	
2.1. Introduction	17

2.2. Les applications industrielles	17
2.2.1. Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en application	17
2.2.2 Les avantages suivants peuvent être perçus	18
2.3. Caractéristiques d'une vibration	18
2.3.1. Degré de liberté	18
2.3.2. La fréquence	18
2.3.3. L'amplitude	19
2.4. Les grandeurs de mesures	19
2.4.1. Déplacement X (t)	19
2.4.2. Vitesse V(t)	19
2.4.3. Accélération A(t)	20
2.5. Les différentes formes de vibration	20
2.5.1. Les vibrations périodiques	20
2.5.2. Les vibrations apériodiques	21
2.6. Niveaux globale	21
2.7. Principe défauts mécaniques	22
2.7.1. Le balourd	22
2.7.1. Défaut d'arbre	23
2.7.3. Le désalignement	24
2.7.4. Défaut de roulement	26
2.8. Technique d'analyse	30
2.9. Capteurs	32
2.10. Conclusion	36
Chapitre 3 Étude de cas du ventilateur de fumées	
3.1. Introduction	37
3.2. Historiques	37
3.3. Surveillance (on ligne)	38
3.4. Surveillance off ligne	39
3.5. Matériel utilise	39

3.5.1. Introduction	39
3.5.2. Présentation du Collecteur analyseur	39
3.5.3. Capteur de Vibration ''Accéléromètre 100 mv/g''	40
3.5.4. Logiciel d'analyse ''SYSTEME 1''	40
3.6. Normes utilisées	41
3.7. Etude expérimentale	43
3.7.1. Points de mesure	43
3.7.2. Configuration de machine sur logiciel	43
3.7.3. Acquisition sur site	44
3.7.4. Mesure avant la maintenance (avant l'arrêt programmé)	44
3.7.5. Travaux programmes durant l'arrêt	51
3.7.6. Mesure Après la maintenance (Après l'intervention)	54
3.8. Conclusion	62
Chapitre 4 Modélisation par ANSYS	
4.1. Introduction	63
4.2. Analyse modale	63
4.2.1. Modélisation de l'arbre	64
4.2.2. Résultats et interprétation	64
4.3. Analyse structurale statique	68
4.3.1. Modélisation de l'arbre et la turbine	68
4.3.2. Résultat et interprétation	70
4.4. Conclusion	72
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	76
Annexe	77

Introduction générale

La production du ciment est une importante activité qui contribue au développement économique du pays, comme dit l'adage "si le bâtiment va tout va" ! Ainsi, il y'a lieu de cimenter le joint qui coexiste entre l'industrie cimentière et la filière habitat sans toutefois, occulter les ouvrages d'art, les barrages, les autoroutes revêtues en béton auto-plaçant et les autres constructions.

L'exploitation normative des équipements d'une cimenterie, repose sur une maintenance préventive et prédictive qui consiste à anticiper les défaillances avenir d'une installation, un organe, un système, etc...

Concrètement, il s'agit d'aller au-devant d'une panne ou d'un dysfonctionnement grâce à la collecte et cumul d'un ensemble de données.

En plein essor, ces dernières années, la maintenance préventive et prédictive, est devenue l'axe pivot et stratégique en économie d'entreprises industrielles. Elle évite, par exemple, l'immobilisation des équipements de production « pannes" ayant des répercussions financières souvent colossales. Elle permet de planifier des opérations régulières de contrôle et d'analyse des organes-machines en fonction du temps moyen entre deux pannes. Selon une étude publiée le 1^{er} juillet 2021 par Senseye, fournisseur de solutions pour une gestion de l'état des équipements fondés sur l'intelligence artificielle (**IA**), les multinationales du secteur industriel et manufacturiers déplorent en moyenne 37 heures de temps d'arrêt machine par mois, qui induisent des surcoûts de revient à l'unité produite.

C'est à ce titre, que l'analyse vibratoire pilotée par un système expert ou l'intelligence artificielle, trouve toute son essence dans l'état d'art de la maintenance "préventive, prédictive" quant à l'identification précise des défauts mécaniques et plus particulièrement la détection des niveaux de dégradation des équipements ; cela dit par ricochet, c'est l'outil idoine pour minimiser les coûts de production.

C'est justement, ce contexte qui nous a motivé d'élaborer le présent projet de fin d'étude (**PFE**) avec, la thématique mesures de vibrations des ventilateurs et, particulièrement, traiter la problématique du ventilateur de tirage des gaz de fumées (**VF2**) "**un cas d'école avéré**", du four de la cimenterie de Meftah filiale du groupe des ciments d'Algérie par abréviation le GICA.

Grâce aux mesures des vibrations effectuées sur un ventilateur, on peut connaître l'état de santé d'un équipement de production et collecter toutes les informations relatives aux conditions de son fonctionnement.

De ce fait, les problèmes sont identifiés précocement et on peut prévoir un entretien avant la panne effective du ventilateur. De cette façon, les imprévus sont évités et les pertes de production minimisées.

Nous pouvons citer comme exemples de défauts vicieux qui peuvent être recherchés et interprétés par des mesures de vibrations :

- Le déséquilibre dynamique,
- Le mauvais alignement de l'accouplement ou de la transmission
- Le jeu excessif des roulements ou structurels (fixation au châssis ou des paliers),
- L'écaillage des roulements,

- Les défauts de lubrification versus de transmission ou de capteur,

Lorsque les points de mesures d'une machine ne sont pas sûrs elle ou sont difficilement accessibles, des vibromètres (sondes fixes), peuvent être installés avec leurs recopies au niveau de la salle de contrôle pour la lecture, la surveillance et le suivi dans le temps.

Aujourd'hui, de plus en plus de données de surveillance de fonctionnement des machines sont lues à temps réel dans les salles de contrôle et de commande à distance sur des **PLC**, **Moniteurs** et autres **systèmes informatiques**. Grâce à cela on peut sécuriser la machine pour la piloter en fonction des vibrations mesurées, notamment, les gros ventilateurs exhausteurs ou de tirage final.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Une généralité est présentée dans **le premier chapitre** dans laquelle les différents types de ventilateurs leurs applications, inconvénients et avantages ont été cités

Le deuxième chapitre consacré aux défauts rencontrés dans les machines tournantes. Les techniques d'analyse vibratoire costumment utilises sont aussi cités dans ce chapitre.

Dans le chapitre trois, une étude de cas du ventilateur de fumée est détaillée. Des mesures de vibration ont été faites avant et après l'intervention.

Une modélisation par, ansys est réalisée dans **le quatrième chapitre** dans le but de faire une analyse modale et dynamique de l'ensemble arbre et turbine-arbre

Une conclusion générale clôture notre mémoire mettant en valeur notre étude et intervention au niveau de la cimenterie de Meftah.

Chapitre 1 : Généralités sur les ventilateurs

1.1. Introduction

Les processus technologiques de production des biens de service, exigent des utilités performantes en l'occurrence le transport des fluides gazeux, le refroidissement, la circulation de l'air pour certains équipements et environnement de travail à l'exemple de ventilateur d'un climatiseur.

Indubitablement la demande en besoin de ventilation ne cesse de croître tant bien en milieu industriel que dans les locaux commerciaux et logements d'habitation.

Par ailleurs, c'est la nécessité d'utilisation qui détermine le rôle et la fonction à remplir par un ventilateur à installer voire souffleur, aspirateur, refouleur ou les deux simultanément, cela dit en mûrissant l'investissement.

À ce titre, l'étendue de technologie conçue permet de répondre à tous les besoins intrinsèques en termes de débits, volumes et hauteur manométrique. C'est pourquoi le choix et l'option d'installer un ventilateur à tirage axial, radial etc., est aujourd'hui aisé.

1.2. Définition d'un ventilateur

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.

Sur les diverses sortes de ventilateurs, on distingue

1. Les ventilateurs à basse pression totale de 20 à 125 mm colonnes d'eau (C.E.). Parmi ces ventilateurs se trouvent les hélicoïdaux qui sont essentiellement des "transporteurs d'air" et ceux centrifuges à basse pression.
2. Les ventilateurs centrifuges à moyenne pression totale de 125 mm à 500mm C.E.
3. Les ventilateurs centrifuges à **haute pression totale de 500 à 700 mm C.E, objet de notre étude.**
4. Au-delà, pour des pressions allant de **700 à 3000 mm C.E**, on utilise des compresseurs rotatifs à engrenages du type Roots ou à palettes du type Mil's.

Remarque : un ventilateur peut être aspirant, refoulant ou les deux à la fois si nécessité du process oblige à installer ce type "AR".

1.2.1. Les différentes parties d'un ventilateur centrifuge (voir schéma)

Un ventilateur centrifuge comprend :

1. Le pavillon **P** ou ouïe d'aspiration placé au centre de l'un des flasques. Ce pavillon est destiné à véhiculer le fluide avec une vitesse et une direction définie jusqu'à l'entrée de la turbine ou roue à aubes.
2. La turbine **R** ou roue à ailettes munie d'aubages, élève la pression du fluide et croît sa vitesse en lui transmettant l'énergie qu'elle reçoit du moteur de commande.
3. Sur certains ventilateurs le diffuseur **D** est à ailettes.

4. La volute **C** ou spirale ou bêche, a la forme d'un colimaçon. Elle joue aussi le rôle de diffuseur.

1.2.2. Principe général de fonctionnement

- Le fluide contenu à l'origine dans le ventilateur subit l'action de la force centrifuge résultant de la rotation de la turbine. Il est entraîné par les pâles qui l'envoient à la périphérie de la volute en
- Imprimant à l'orifice de refoulement tangent à ladite volute.
- L'expulsion du fluide à la périphérie de la turbine se traduit par la création d'une dépression dans le pavillon et, ensuite une aspiration d'air égale à la quantité refoulée. Le mécanisme précédent se répétant sans cesse, il s'établit de la sorte une circulation 'd'air continue à travers le ventilateur.
- À la sortie des ailettes de la turbine, le fluide est animé d'une grande vitesse ; il possède donc une énergie cinétique importante. Celle-ci ne peut être bien utilisée que si elle est transformée et maximisée en énergie statique ou pression statique. C'est au diffuseur et à la volute de pousser au loin cette transformation en offrant au gaz un espace suffisant et de forme appropriée pour que la vitesse diminue sans perte de charge sensible.
- Par analogie ce fonctionnement est similaire ou analogue à celui d'une pompe centrifuge. Comme dans le cas de la pompe, la somme des dépressions à l'aspiration et au refoulement, est égale à la hauteur manométrique du ventilateur.

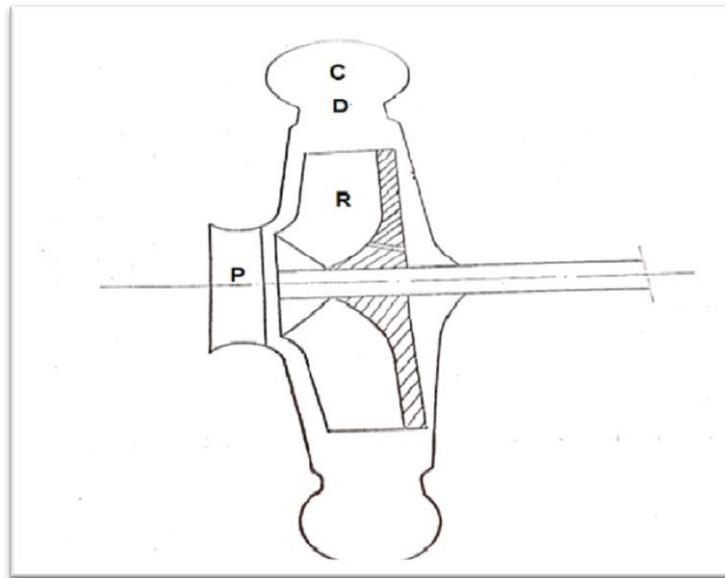


Figure 1.1 Schéma d'un ventilateur [23].

Légende :

- P** : Le pavillon
R : La Roue ou turbine
C : La volute
D : Le diffuseur

1.3. Type de ventilateur [2]

Il existe plusieurs types de ventilateurs industriels qui varient en fonction de la quantité d'air à déplacer, de leur moteur, de la zone à refroidir et de divers autres facteurs. Bien qu'il existe une infinité de ventilateurs, ils se répartissent en deux catégories, les centrifuges et les axiaux.

Ci-dessous le tableau présente les types de ventilateur les plus utilisés dans l'industrie. [2]

Tableau 1.2 Types de ventilateur [2].

Ventilateur	Type		
Centrifuge	A aubes incline ver l'avant	A aubes incline vers l'arriere	A aubes radial
Axial	A tubes	A pale	A hélice

A. Ventilateurs axiaux [2]

Les ventilateurs à flux axial ou les ventilateurs axiaux industriels utilisent une hélice pour aspirer l'air et le décharger dans la même direction axiale. Les types les plus courants de ventilateurs axiaux sont : les ventilateurs axiaux à tube ou de conduite, ceux à panneau ou muraux, les refroidisseurs de et les circulateurs d'air [2].

Les ventilateurs axiaux sont généralement utilisés pour évacuer l'air impropre ou les fumées des processus tels que les cabines de pulvérisation de peinture.



Figure 1.2 Ventilateur axial [2].

B. Ventilateur centrifuge

Les ventilateurs centrifuges sont utilisés dans la production de l'air comme la ventilation, la climatisation et le chauffage. Ils sont considérés comme ventilateurs de basse Pression, (732 Pa).[3] Leur technologie permet de les utiliser dans le milieu industriel, moyenne Pression soit $732 \leq P \leq 3\,660$ Pa et haute Pression $3\,660 < P < 30\,000$ Pa. La pression qu'ils génèrent est suffisante pour vaincre les pertes de charge du réseau aéraulique.



Figure 1.3 Ventilateur centrifuge [3].

Il existe différent type de ventilateurs centrifuges :

➤ **À aubes inclinées vers l'avant** : appelées action ou "à cage d'écureuil". La roue de ces ventilateurs comprend un nombre important d'aubes de faibles dimensions, inclinées vers le sens de rotation de la roue. [2]



Figure 1.4 Roue de ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'avant (double ouïe) [2].

- **À aubes inclinées vers l'arrière, " à réaction".** La roue de ces ventilateurs comprend un nombre réduit d'aubes de plus grandes dimensions inclinées en opposition au sens de rotation de la roue. [2]

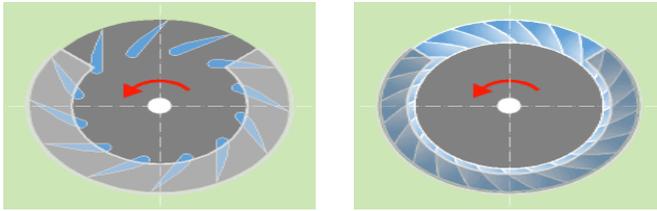


Figure 1.5 Roue de ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière (double ouïe) [2].

- **À aubes radiales :** la roue de ces ventilateurs est composée d'aubes droites. Ce type de ventilateur a un très mauvais rendement. Il est peu utilisé dans les installations de ventilation et de conditionnement d'air ; de par sa forme, relativement insensible à l'encrassement. On l'utilise principalement dans l'industrie pour assurer le transport pneumatique de produits légers comme les copeaux, les poussières, et autres... [2].



Figure 1.6 Roue de ventilateur centrifuge à aubes radial [2].

1.4. Classification des ventilateurs [1]

Il y a plusieurs manières de classer les ventilateurs, parmi elles:

A. Suivant la pression

- Les ventilateurs basse pression : pression maximale ≤ 70 daPa.
- Les ventilateurs moyenne pression : $70 \leq$ pression ≤ 350 daPa
- Les ventilateurs haute pression : pression ≥ 350 daPa.

B. Suivant le principe de fonctionnement

- Les ventilateurs centrifuges.
- Les ventilateurs hélicoïdes (axiaux).

C. Suivant les caractéristiques du fluide véhiculé

- Air propre.
- Air chargé (poussières, fibres...).
- Air humide.
- Air à température élevée, etc.

La classification la plus courante se fait suivant la trajectoire de l'air dans la roue. On distingue les ventilateurs centrifuges, hélicoïdaux et tangentiels (**tableau 2**) .

Tableau 1.3: Classification des ventilateurs industriels[1].

Ventilateur	Intérêts	photo
Centrifuge à aubes inclinées vers l'avant	. Roue dite « en cage d'écureuil » . Nb d'aubes entre 32 et 42 unités . Rendement de l'ordre de 60 à 75%	
Centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière	. Rendement de 75 à 85% . Nb d'aubes entre 6 à 16 unités	
A pales radiales	- Peu utilisé dans les installations de conditionnement d'air. Utilisé dans l'industrie pour le transport de produits légers (copeaux, produits textiles, poussières)	
Hélicoïde	- Ventilateur dit « axial » - Direction d'écoulement essentiellement axiale - Nb d'aubes entre 2 et 60 unités - Rendement de 40 à 90%	

1.5. Domaine d'application des ventilateurs industriels [4]

Les ventilateurs axiaux sont utilisés principalement pour circuler l'air dans un bâtiment ou évacuer directement l'air vers l'extérieur. Les ventilateurs centrifuges sont utilisés dans des systèmes de captation d'air à la source ou pour un réseau de distribution d'air avec des grilles de diffusion.

➤ Les ventilateurs centrifuges

- Procédé industriel ;
- Aspiration ;
- Dépoussiérage ;
- Refroidissement des machines
- Transport pneumatique, poudres, grains, fibres ;
- Soufflage ;

➤ Les ventilateurs axiaux

- Ventilation des tunnels, souterrains, locaux industriels ;
- Refroidissement ;
- Séchage ;
- Évacuation de l'air ;
- Conditionnement de l'air ;

1.6. Avantages et inconvénients des ventilateurs industriels [5]

Le tableau suivant illustre les avantages et inconvénients des ventilateurs axiaux et centrifuges dans le milieu industriel.

Tableau 1.4: avantage est inconvénient des ventilateurs industriel [5].

Types de ventilateurs	Avantages	Inconvénients
Centrifuge Pales inclinées vers l'avant (action)	- Encombrement réduit - Investissement modéré	- Rendement assez faible ($\eta < 70\%$) - Possibilités de régulation limitées
Pales radiales	- Régulation par laminage intéressante - Pression assez élevée	- Rendement assez faible ($\eta 65\div 70\%$) - Air très poussiéreux ($\eta < 60\%$) - Air propre ($\eta > 70\%$)
Pales inclinées vers l'arrière (réaction)	- Bon rendement (peut atteindre $85\div 90\%$) - Pression élevées - Adaptation facile du débit	- Encombrement - Investissement plus important
Axial de type hélicoïde	- Large plage de débit - Facilité de réglage du débit - Rendement élevé ($\eta > 85\%$ avec redresseur). - Investissement plus ou moins élevé selon le type d'hélicoïdes	- Pression moindre que les centrifuges à réaction. - Risque plus élevé de pompage - Niveau de bruit plus élevé que les centrifuges en moyennes fréquences

1.7. Les organes du ventilateur de fumées [6]

1.7.1. Roulement : type SKF à rotule sur rouleaux référence 22332 CC/W33 de précision élevée avec de faibles frottements et, à haute capacité de charge. Cette capacité s'accommode au désalignement d'où une maintenance à moindre coût et, une meilleure longévité du roulement.

- Largeur de la portée de roulement : 114 mm
- Hauteur centrale de la portée du roulement : 170 mm



Figure 1.9 palier (GOS.HBF.332).

1.7.4. Arbre : C'est l'organe d'entraînement de la turbine, supporté par 2 paliers un fixe et l'autre libre. Cet arbre assure la liaison mécanique de la roue à aubes ou à ailettes avec le moteur de commande.

1.7.5. Accouplement [7] : Les accouplements **Rupex 560 rwn**, ont la spécificité de compenser les faux ronds ou de légers désalignements ceci grâce à leur semi-élasticité. Le siège conique des boulons tampons facilite le montage et garantit un fonctionnement quasiment sans maintenance. La forme optimisée des tampons bombés permet un montage aisé par emboîtement et assure un jeu à la torsion minimale. De nombreuses variantes sont proposées entre autres à disque de frein, moto frein. Etc...



Figure 1.10 accouplement rupex560 rwn.

1.7.6. Moteur : il est de type asynchrone et de technologie ABB [8]. C'est une machine tournante avec un variateur de fréquence type ACS1000, la partie fixe étant le stator, celle mobile le rotor ou l'induit avec un collecteur de charbons.

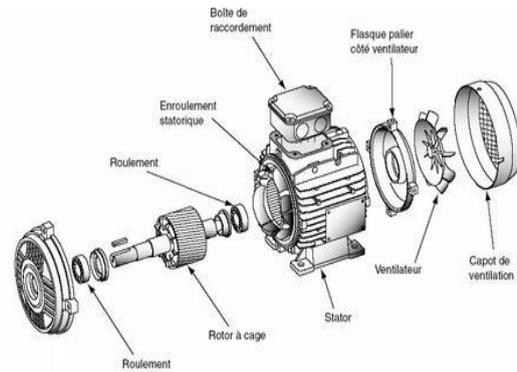


Figure 1.11 moteur asynchrone.

1.8. Étude de cas de ventilateurs de tirage du four de la cimenterie de Meftah [23]

L'abréviation est VF1/VF2

Le four de la cimenterie de Meftah est doté de deux (02) ventilateurs de tirage ou exhausteur des gaz de fumées résultant de la combustion du gaz naturel dans le brûleur principal du four.

Le dédoublement (deux unités) se justifie par le design de la tour de préchauffe en deux lignes ou colonnes de cyclones.

La farine crue alimentée au four transite par ces deux circuits pour subir une décarbonatation à hauteur d'environ $40 \div 45\%$ ce, avant son entrée dans le four où s'achève celle-ci.

En fait, la cuisson de la farine crue en clinker (composant principal, du ciment), est un processus à contre-courant voire la farine crue est descendante de l'amont vers l'aval et les gaz de fumées ($2000 \div 2200^{\circ}\text{C}$), sont ascendant c'est-à-dire tirés par deux puissants ventilateurs de l'aval vers l'amont. C'est ainsi que s'effectue l'échange thermique du couple gaz/ farine avec un temps de résidence allant de 2 à 6 secondes.

1.8.1. Caractéristiques des ventilateurs de tirage de la cimenterie de Meftah

- ✓ **Nombre d'unités** : 02
- ✓ **Terminologie de la cimenterie** : Ventilateurs de fumées
- ✓ **Abréviation** : VF1 & VF2.
- ✓ **Technologie** : ABB
- ✓ **Puissance** : 1600 kW
- ✓ **Vitesse** : 992 tr/min
- ✓ **Température de service** : ($T^{\circ}\text{C}$ des gaz) : $330 \div 360^{\circ}\text{C}$ à la sortie de la tour.

Verrouillage de sécurité :

- **Seuil d'alarme niveau 1** : 425°C , le ventilateur ne s'arrête pas mais l'alarme ne s'acquiesce qu'après règlement du dysfonctionnement par l'opérateur en salle de

commande.

- **Seuil d'alarme niveau 2** : 450°C, le ventilateur s'arrête intempestivement, cette température verrouille le redémarrage du ventilateur jusqu'à l'abaissement de celle-ci en dessous du seuil d'alarme niveau 1.

1.8.2. Résultat escompté des VFs

- Sortie de la tour de préchauffage ceci pour obtenir le plus haut rendement de la décarbonatation de la farine crue à travers l'échange thermique maximal.
- Apporter l'oxygène requis pour une combustion oxydante du gaz naturelle au niveau du brûleur principal ceci en sus de l'air primaire ou air de mélange.

À titre indicatif pour une combustion optimale, le niveau d'oxygène doit être :

- Dans la boîte à fumées (en amont du four) = 2.5%.
 - A la sortie de la tour de préchauffage 4%.
- La teneur idéale d'oxygène requise est la différence soit 1.5%.

1.8.3. Résultat escompté des VFs

Mis en marche

- Tirer les gaz de l'intérieur du four «point zéro refroidisseur - four) vers la sortie de la tour de préchauffage ceci pour obtenir le plus haut rendement de la décarbonatation de la farine crue à travers l'échange thermique maximal.
- Apporter l'oxygène requis pour une combustion oxydante du gaz naturelle au niveau du brûleur principal ceci en sus de l'air primaire ou air de mélange.

À titre indicatif pour une combustion optimale, le niveau d'oxygène doit être :

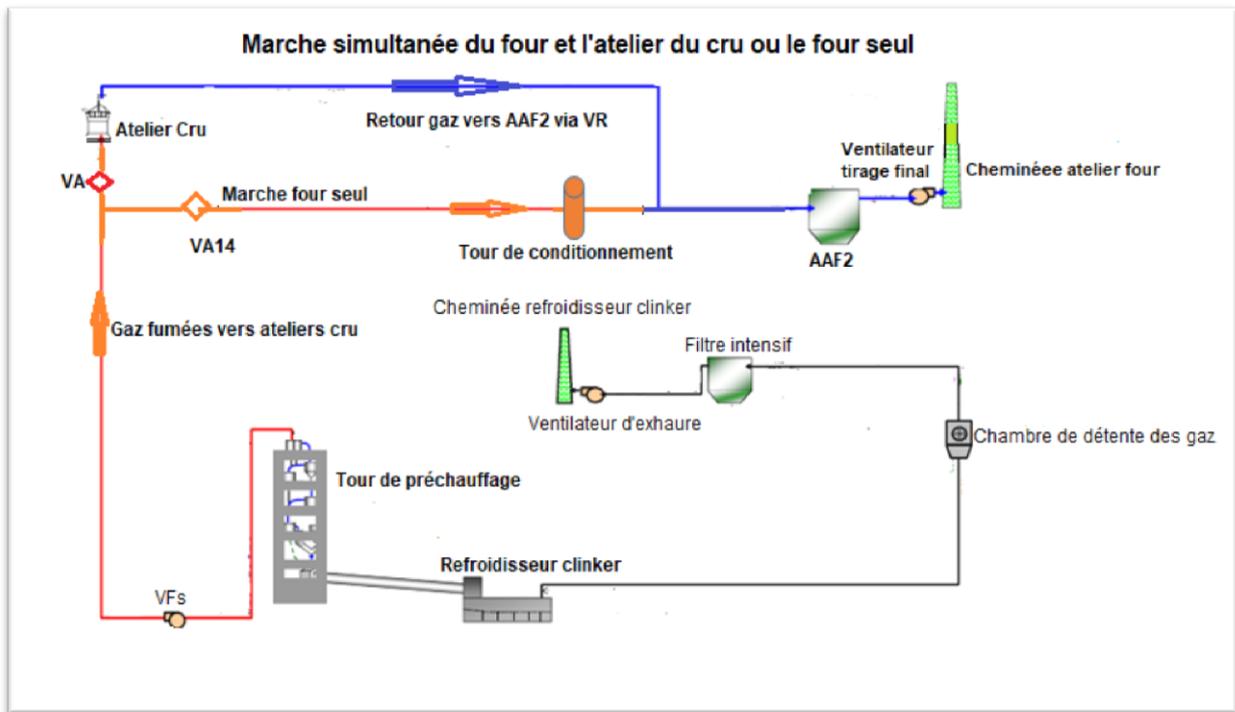
- Dans la boîte à fumées (en amont du four) = 2.5%
 - A la sortie de la tour de préchauffage 4%.
- La teneur idéale d'oxygène requise est la différence soit 1.5%.

1.8.4. Installation ou position des VFs dans le process

Ils sont implantés au pied du préchauffeur (tour de cyclones) à voie sèche. Cette position satisfait l'exigence du process notamment, créer un point zéro ($\Delta P = 0$) au point de jonction du ventilateur d'exhaure du refroidisseur à clinker et un second point zéro avec le ventilateur de relais (1600 KW) de l'atelier pré-concassage séchage qui achemine les gaz de fumées à partir de la sortie de la tour de cyclones via le volet A, pour sécher les matières premières zét broyées pour obtenir de la crue farine crue.

1.8.5. Fonctionnement et process des VFs

- a. Au cours du réchauffage du four, un des ventilateurs de fumées est démarré deux heures après l'allumage du brûleur principal, ceci en guise d'assurer une flamme oxydante grâce à l'apport d'oxygène généré par le ventilateur.
- b. Au démarrage c'est-à-dire à l'alimentation du four, les deux ventilateurs de fumées



1.9. Surveillance

- Contrôler périodiquement le serrage des boulons du ventilateur.
- Mesurer à intervalles réguliers, le colmatage et l'usure de la roue.
- Contrôler au moyen d'un vibromètre le niveau vibratoire des paliers (dans les trois directions mais surtout suivant l'axe horizontal). Suivant la norme ISO 14694 pour ce type de matériel, les plages de valeurs limites de vibrations sont les suivantes :

Tableau 1.5: La valeur limites de vibrations suivant la norme ISO 14694.

Groupe	Bon	Admissible	Alarms	Danger/Arrête
BV-3	< 4,5	4,5...7,1	7,1...9	> 9 mm/s

- Valeurs limites de vibrations : Avertissement : 7,1 mm/s ; Arrêt : 9 mm/s.
- En cas de dépassement de la valeur d'avertissement, il faut impérativement contrôler le ventilateur. Un fonctionnement au-dessus de cette valeur ne peut être que temporaire.

Tableau 1.6: Les incidents éventuels et les remèdes [23].

Incidents	Causes possible	Remèdes
Un palier chauffe	Graisse non adaptée	Mettre la graisse préconisée mais ne pas remplir plus que le 1/3 du volume intérieur du palier
	Manqué de rodage	Arrêter le ventilateur. Laisser refroidir le palier puis remettre en marche. Recommence plusieurs fois s'il le faut.
	Mauvais montage	Contrôler et corriger le montage et les jeux.
Un palier est bruyant	Manque de graisse	Remplir jusqu'au 1/3 du volume
	Roulement usé	Remplacer le roulement
Vibrations anormales	Usure et déformation permanente du rotor	Remplacer le rotor
	Dépôt sur les aubes	Ouvrir le ventilateur et nettoyer l'intérieur
	Roulement usé	Remplacer le roulement
	Déformation du stator	Libérer les boulons de scellement et détacher les tuyauteries raccordées au ventilateur. Vérifier si l'assise du ventilateur porte bien partout sur sa fondation. Supprimer les sollicitations dues aux gaines extérieures.
	Mauvais alignement du moteur	Vérifier s'il n'y a pas de déformation du stator (voir ci-dessous). Sinon, aligner à nouveau le moteur avec la plus grande précision.
	Vibrations du moteur	Faire équilibrer le moteur sinon le remplacer
	Fréquence propre du plancher ou des gaines	Modifier cette fréquence et rompre l'harmonie par renforcement des gaines et d'autres pièces.
	Pompage dû à une trop forte réduction du débit	Le ventilateur travaille dans une zone instable. Eviter cette zone de fonctionnement
La roue frotte contre le stator	Mauvais remontage après un démontage	Démonter à nouveau et remonter en respectant les jeux normaux et en rétablissant soigneusement l'alignement
	Deformation du stator	Voir plus haut
	Déformation due à une température exagérée	Si c'est le rotor qui est déformé, il faut le remplacer. Si c'est le stator, il suffit parfois de déplacer légèrement le rotor suivant son axe dans les paliers pour autant que l'alignement du moteur reste parfait, sinon il faut redresser le stator.
Excès de puissance absorbée	Diminution des pertes de charge du circuit	Réduire la vitesse du ventilateur
	Gaz plus froid que prévu	Réduire la vitesse du ventilateur

1.10. Maintenance

1.10.1 introduction [24]

La maintenance s'exerce sur des équipements industriels de production placés dans le contexte économique de l'entreprise.

Chaque équipement plus ou moins complexe, constitue un système technique, conçu pour mettre en œuvre un procédé et destiné à réaliser, partiellement ou totalement, un produit ou un service. La maintenance a pour mission de veiller sur les systèmes techniques que sont les systèmes de production pour :

- préserver leur bon état de fonctionnement en évitant l'apparition de défaillance (maintenance préventive) ;
- rétablir leur bon état de fonctionnement quand il est dégradé par l'apparition de défaillance (maintenance corrective) ;
- optimiser leurs conditions d'exploitation (maintenance améliorative).

Dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'équipement pour savoir sur quoi, où, quand, comment intervenir, afin de remédier aux défaillances, de les prévenir et surtout d'éviter d'engendrer la moindre gêne à la production.

1.10.2. Les différents types de maintenance industrielle

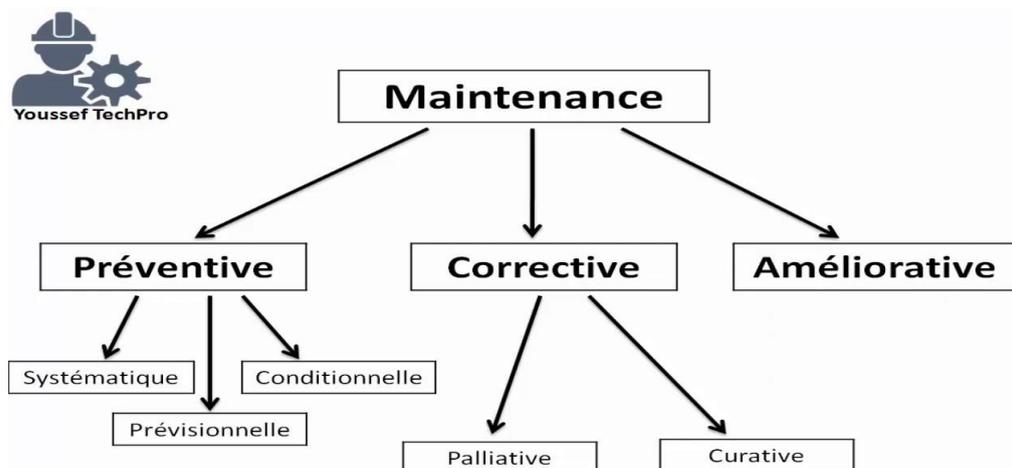


Figure 1.12 Les différents types de maintenance industrielle [25].

La maintenance préventive [25]

Ce type de maintenance s'effectue selon des critères prédéterminés, dont l'objectif est de réduire la probabilité de défaillance des matériels en cours d'utilisation, de diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne et de supprimer les causes d'accidents graves. Elle repose sur des vérifications de conformité, une surveillance périodique permettant de relever des anomalies et exécuter des réglages simples sans outillage spécifique, ni arrêt de l'outil de production.

Toute intervention de maintenance inclut un impact financier. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter. C'est aussi à ce moment que l'entreprise étudie s'il faut décider de passer à l'étape d'une maintenance corrective, plus coûteuse.

But de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.

La maintenance préventive systématique [25]

Elle suit un échéancier généralement établi selon le temps mais aussi selon la quantité de produits fabriqués, la distance parcourue lorsqu'il s'agit d'acheminer des biens, ou encore le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

Cette méthode de maintenance nécessite de connaître le comportement du matériel, les modes de dégradation et le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries.

La maintenance corrective [25]

Les opérations de maintenance corrective ont lieu une fois que la défaillance est repérée. Il s'agit en somme d'un dépannage puisque la maintenance corrective est exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

La maintenance curative [25]

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

La maintenance préventive conditionnelle [26]

Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.).

Remarque : la maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé).

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des

mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile
- Les températures et les pressions
- La tension et l'intensité des matériels électriques
- Les vibrations et les jeux mécanique

Certaines méthodes comme l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile, ... sont très riches quant aux informations recueillies. Leur compréhension autorise la prise à bon escient, de décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle.

La surveillance est soit périodique, soit continue

Avantage : la connaissance du comportement se fait en temps réel à condition de savoir interpréter les résultats. A ce niveau, l'informatique prend une place primordiale.

Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis il est rentabilisé rapidement.

Cette méthode de maintenance, pour être efficace, doit dans tous cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel.

Ces méthodes doivent être dans la mesure du possible standardisées entre les différents secteurs (production et périphériques) ; ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel.

Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être de plus en plus fiables, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée. La maintenance préventive diminuera quantitativement d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle.

1.11. Conclusion

La technologie des ventilateurs est multiple et diverse, cela dit à chaque process correspond un type de ventilateur selon l'usage et la nécessité.

Il est évident que l'emploi de ces derniers est un investissement amortissable dès leur mise en service et que ledit amortissement dépend de la taille, le design et la souplesse qu'ils permettent lors de l'exploitation.

Cependant, pour tirer le meilleur profit des ventilateurs, cela exige une maintenance préventive, systématique, prédictive et un suivi rigoureux tout en historisant tout ce qui se fait et gravite autour des ventilateurs.

Chapitre 2 : La surveillance par l'analyse vibratoire

2.1. Introduction [9]

Toute machine et ses composants en mouvement, génère un certain niveau de vibration, images des efforts dynamiques, quel que soit le soin apporté à leur fabrication. De ce fait, toute modification du processus dynamique de la machine engendre une variation des énergies vibratoires. Ces vibrations sont stables si la machine fonctionne normalement, quantifiable et reproductible, si l'environnement est le même. Ces vibrations sont caractéristiques de l'état de fonctionnement de l'équipement et constituent sa signature cinématique. Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire augmente et change radicalement avec l'apparition d'un défaut, première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne.

Les vibrations sont le résultat d'un ensemble d'efforts exercé par la machine elle-même ou le résultat de l'interaction avec l'environnement dans lequel la machine est intégrée. On peut distinguer des efforts d'origine mécanique (balourd, désalignement, roulement, engrènement, etc.), d'origine électrique (vibrations de stator, transformateurs, etc.), d'origine hydraulique (cavitation, turbulences, pulsations de pression, etc.) et de réponse du milieu (broutement des machines-outils, pompage des compresseurs, etc.).

L'analyse vibratoire permet l'élaboration d'un « bilan mécanique » complet du système, qui caractérise qualitativement et quantitativement son état à un instant donné, et ainsi d'y reconnaître d'éventuelles « maladies ».

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse vibratoire, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet d'améliorer la disponibilité et la sécurité par la détection précoce et le suivi de la dégradation des éléments critiques, ainsi localiser l'organe défectueux sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants, si possible pendant les arrêts programmés de la production ou en la perturbant le moins possible, tout en tenant compte de la disponibilité de l'équipe d'intervention et de l'approvisionnement des pièces de rechange.

2.2. Les applications industrielles [9]

Les applications industrielles de la surveillance vibratoire des équipements en fonctionnement sont diversifiées, que ce soit pour des structures mécaniques complexes (plateformes, pont, barrages, bâtiments...) ou les machines (turbo - alternateurs, système d'engrenage...) ou certains organes des machines de productions (roulements, pignons, rotors, ...etc.) contenant la signature cinématique de la machine, reliée aux conditions de fonctionnement.

2.2.1. Les techniques de l'analyse vibratoire, permettent à tout industriel qui les met en application

- De connaître à tout moment « l'état de santé » de ses machines et d'estimer la longévité potentielle des différents composants et ainsi prévenir l'usure prématurée des différentes pièces :

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

2.2.2. Les avantages suivants peuvent être perçus

- Éviter la casse des machines (dans plus de 90 des cas) ;
- Éviter les arrêts incidents de production ;
- Augmenter la durée de vie des équipements ;
- Assurer un contrôle de qualité permanent de réparation, du montage et du graissage ;
- Pratiquer l'équilibrage in situ de ces équipements ;
- Augmenter la sécurité dans les secteurs d'activités tels que le pétrole, la pétrochimie et la chimie
- Déceler s'il y'a erreur humaine lors des remises en état ;
- Améliorer la disponibilité, fiabilité des équipements et la sécurité de l'environnement.

2.3. Caractéristiques d'une vibration

2.3.1. Degré de liberté [10]

Une expression utilisée dans la mécanique vibratoire caractérisant la complexité du système ; c'est le nombre de degrés de liberté et le nombre de variables indépendantes qui décrivent l'état du système vibrant, à l'exemple des mouvements de translation, gauche / droite, la rotation, donnant ainsi, un système de six degrés de liberté.

2.3.2. La fréquence [11]

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète dans un temps donné. Lorsque la seconde est choisie comme unité de temps, la fréquence s'exprime en Hz :

$$1 \text{ hertz} = \frac{1}{1 \text{ seconde}}$$

- ✓ Hz : nombre de cycles par seconde.
- ✓ CPM : nombre de cycles par minute.
- ✓ RPM : nombre de rotations par minute.
- ✓ Ordre : nombre de cycles par révolution.

2.3.3. L'amplitude [9]

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 « pic »** : La valeur pic (ou crête) d'un signal est la valeur maximale dans une direction à partir du point zéro. La valeur réelle peut être un déplacement, une vitesse et une accélération, voir même ne tension. Dans un spectre, la valeur pic est tout simplement la valeur maximale.
- **L'amplitude « pic à pic »** : La valeur crête-à-crête est la différence entre le niveau de crête positif (Max) la plus élevée et la plus basse valeur de crête négative (Min). Le déplacement est généralement mesuré en unités de crête-a-crête.
- **L'amplitude « efficace (Aeff) »** ou RMS en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire. (**A. efficace** = $(\frac{\sqrt{2}}{2})AC$ soit **0.707 AC**)

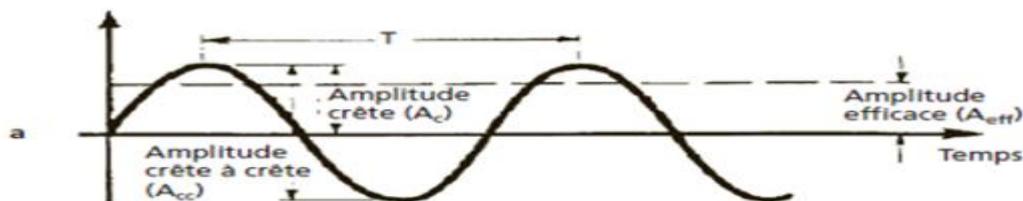


Figure 2.1 Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal sinusoïdal [27].

2.4. Les grandeurs de mesures [11]

Une vibration mécanique peut être mesurée selon les trois grandeurs suivantes :

2.4.1. Déplacement X (t)

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.

$$X(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

Avec :

- X (t) : signal temporel.
- X0 : amplitude maximale du signal.
- ω : Pulsation $\Rightarrow \omega = 2\pi f$.
- f : fréquence du signal
- ϕ : Déphasage par rapport à l'origine des temps.
- L'unité couramment utilisée est le nanomètre [nanm].

2.4.2. Vitesse V(t)

Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre :

$$V(t) = \frac{dx}{dt} = X_0 \omega \cos(\omega t + \varphi) = V_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.2)$$

L'unité couramment utilisée est le millimètre par seconde [mm/s].

2.4.3. Accélération A(t)

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.

$$A(t) = V_0 \omega \cos(\omega t + \varphi) = A_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.3)$$

Les unités couramment utilisées sont [m/S²] ou le [g].

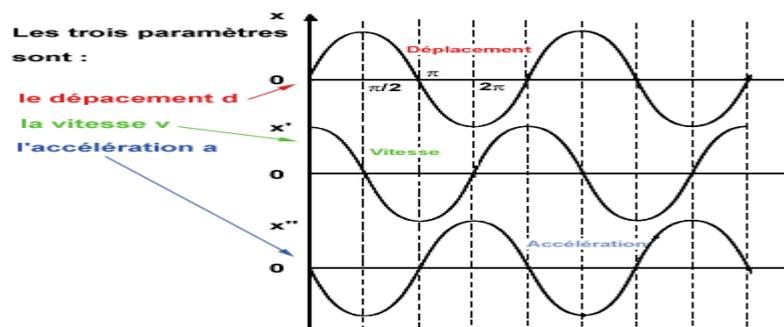


Figure 2.2 les grandeurs de mesure [22].

2.5. Les différentes formes de vibration [12]

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillatoires autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractérisent l'effort qui les génère, ils peuvent être, soit périodiques, soit apériodiques (transitoires et aléatoires) selon leur fréquence pendant une durée déterminée.

2.5.1. Les vibrations périodiques

Elles peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason ou plus généralement à un mouvement complexe périodique décomposable en sinusoïdes élémentaires plus facile à analyser.

- **Vibration harmoniques (sinusoïdales pures)**

Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés « composantes harmoniques » et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié, appelée « fréquence fondamentale » ou harmonique d'ordre 1.

- **Vibration périodique complexe**

Deux ou plusieurs vibrations périodiques peuvent se superposer et donner comme résultante un mouvement qui est la composition de tous les mouvements élémentaires. Une telle vibration est créée par une excitation, elle-même périodique ; c'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines.

Elle est décrite par :

$$x(t) = \sum_{i=1}^n [x_i \sin(\omega_i t + \theta)] \quad (2.4)$$

2.5.2. Les vibrations apériodiques

- **Vibration aléatoire**

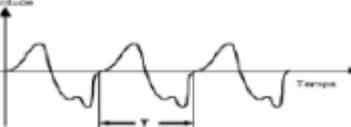
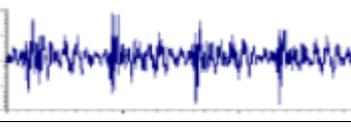
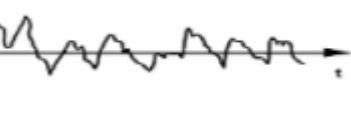
C'est une vibration continue pour laquelle, il est possible de déterminer une période de répétition. Cette vibration ne peut être représenté par une fonction mathématique, d'où l'utilisation des lois de probabilité pour la caractériser. C'est le cas des chocs des boulets que l'on enregistre sur un broyeur.

- **Vibration transitoire**

Elles sont générées par des forces discontinues (choc). Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire en revenant à la position d'équilibre après amortissement. Lorsque des oscillations existent dans une structure qui vibre après un choc dont l'amortissement est faible, on dit que cet amortissement est sub-critique et son mouvement est dit pseudopériodique ; si l'amortissement est très important et que la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur critique ainsi, le mouvement est dit apériodique.

Le tableau ci-dessous illustre la représentation temporelle des vibrations en fonction de leur nature.

Tableau 2.1 : Nature de la vibration selon les variations de son amplitude en fonction du temps [27].

Nature de vibration	Représentation temporelle des vibrations	Causes possible
Périodique de type sinusoïdal simple.		Balourd.
Périodique de type sinusoïdal complexe.		Engrenement.
Périodique de type impulsionnel.		Ecaillage des roulements
Aléatoire de type impulsionnel.		Défaut de lubrification sur des roulements cavitation

2.6. Niveaux globale [11]

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. En surveillance périodique systématique, ce suivi parfois sommaire et destiné au dépistage des défauts les plus évidents ne nécessite généralement qu'un appareillage simple et bon marché. Il est utilisé principalement pour identifier les machines d'un parc qu'il va falloir surveiller plus étroitement par des mesures rapprochées ou pour lesquelles un diagnostic plus précis s'avérera nécessaire.

Ce suivi est également souvent utilisé en surveillance continue des machines tournantes très rapidement afin de les stopper avant avarie grave ou accident. On utilise alors généralement des appareils simples installés à poste fixe à proximité de chaque machine.

NG mesurée sera égale à :

$$NG = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_i^2} \quad (2.5)$$

2.7. Principe défauts mécaniques [13]

L'analyse vibratoire enregistre les vibrations émises par une machine. Ces dernières permettent de détecter :

- Le balourd.
- Le désalignement.
- Les défauts de roulements.
- Les défauts d'arbre (fluage à chaud ou à froid, vrillage etc...)

2.7.1. Le balourd

Un balourd est un terme de mécanique classique qui caractérise une masse générant un faux rond ou voilage par rapport à son axe de révolution et entraînant un déséquilibre donnant nuisance à des vibrations. Ce déséquilibre appelé « balourd » provient généralement du défaut d'assemblage, de montage ou d'usinage.

En pratique il existe un déséquilibre mécanique sur un rotor lorsque les masses qui le composent sont réparties de façon non symétrique autour de son axe de rotation, physiquement par la non-coïncidence de l'axe de rotation et l'axe centrale d'inertie.

➤ Les différents types de balourd

Il existe trois types de balourds :

- **Balourd statique** L'axe principal d'inertie et l'axe de rotation sont parallèles, mais confondus. Ce type de balourd est surtout présent lorsque le rotor comprend un disque de rayon important par rapport à l'axe central d'inertie.
 - Symptôme : 1X radial (V&H) en phase à travers la machine $-90^\circ \pm 30^\circ$ vertical et horizontal

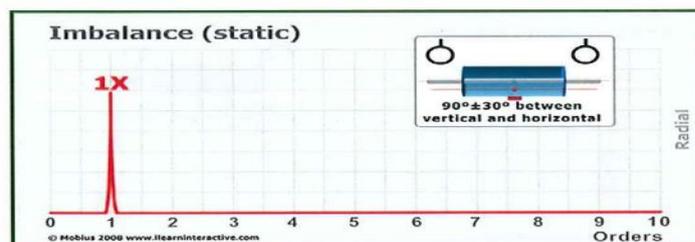
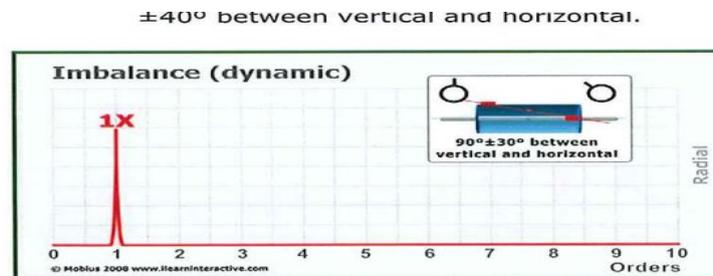


Figure 2.4 Balourd statique [10].

- **Balourd dynamique** : C'est la conjonction des deux balourds dominants, il correspond au cas réel le plus fréquent.
 - Symptôme : 1X radial (V&H)
 - Niveaux les plus élevés dans l'axe horizontal (en raison de la plus grande flexibilité)
 - 0-180° différence de phase à travers la machine. $90^\circ \pm 40^\circ$ entre horizontal et vertical



The technical way to describe unbalance is as a condition

Figure 2.5 Balourd dynamique [10].

2.7.2. Défaut d'arbre

Les défauts qui apparaissent souvent sur les arbres sont : le déséquilibre dynamique, le vrillage, le fluage, le gauchissement et fissurations.

En générale les défauts de portées apparaissent au moment de l'entretien des paliers ou changement de roulement. Hormis les effets de fatigue, les surcharges et contraintes thermomécaniques occasionnent à l'arbre des déformations temporaires qui deviennent permanentes. Aussi, les dilations et contractions impactent très fortement la structure de l'arbre qui se manifestent par un écrouissage puis microfissures et enfin en fissures qui rebutent l'arbre de son utilisation.

2.7.3. Le désalignement

Lorsque la machine est fonctionnelle, les signes suivants peuvent indiquer le désalignement :

- ✓ D'importantes oscillations des arbres.
- ✓ Des vibrations excessives.
- ✓ Une température élevée des paliers.
- ✓ Des bruits inhabituels.

Le désalignement est l'une des principales causes de réduction de la durée vie des équipements, il génère des efforts supplémentaires qui entraînent la dégradation rapide de l'accouplement et aussi, des paliers.

➤ Les différents types d'alignement

On distingue deux types de défauts d'alignement.

• Défaut d'alignement parallèle

Les axes des deux arbres sont parallèles mais décalés.

- ✓ Défaut d'alignement parallèle vertical : un arbre est plus haut que l'autre.
- ✓ Défaut d'alignement parallèle horizontal : un arbre est de côté par rapport à l'autre.

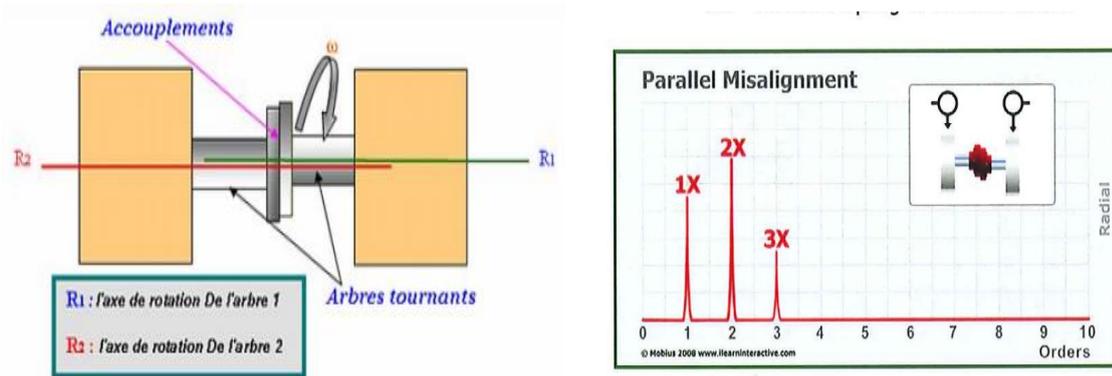


Figure 2.6 : Désalignement parallèle [10].

• **Défaut d'alignement angulaire**

Les axes des deux arbres forment un angle.

- ✓ Défaut d'alignement angulaire vertical : l'angle formé est dans le plan vertical.
- ✓ Défaut d'alignement angulaire horizontal : l'angle formé est dans le plan horizontal.

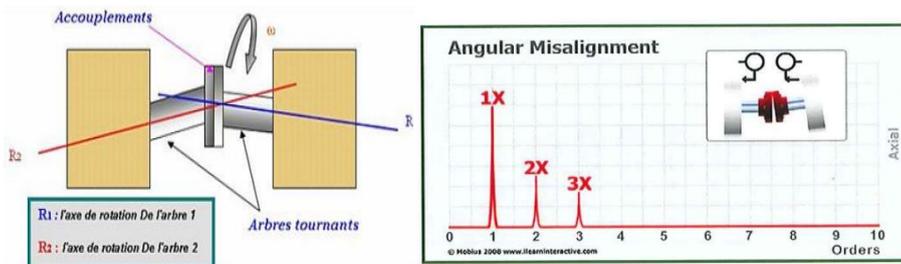


Figure 2.7 Désalignement angulaire [10].

2.7.4. Défaut de roulement

Un roulement est un organe qui assure une liaison entre deux éléments d'un mécanisme roulant l'un sur l'autre.

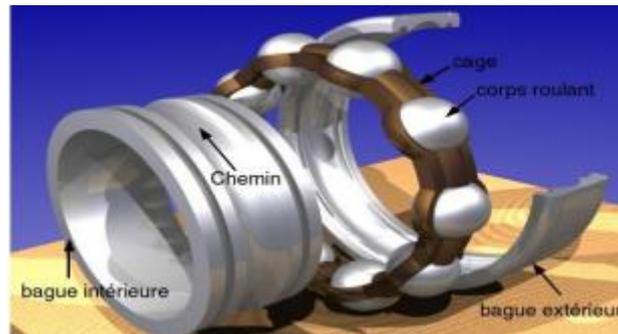


Figure 2.8 constitution générale d'un roulement [10].

➤ Défaillance des roulements

- La durée de vie est calculée selon le nombre de révolution que le roulement peut effectuer avec une vitesse constante avant l'apparition des premiers signes de fatigue sur la bague ou l'élément roulant. Elle s'exprime aussi en nombre d'heures de fonctionnement.

- La fatigue est l'effet de contraintes de cisaillement qui apparaissent de façon cyclique immédiatement sous la surface supportant la charge.

Après un certain temps, ces contraintes engendrent des fissures qui s'étendent progressivement jusqu'à la surface des fragments de matière, au niveau de la fissure, sont arrachés par le passage des éléments roulants. Ce phénomène appelé « écaillage » se développe peu à peu et finit par rendre le roulement inutilisable.

➤ Causes de défaillance

Dans la pratique, la défaillance n'est généralement pas causée par la fatigue, mais par l'usure, la corrosion, la pollution, l'erreur de montage, la mauvaise lubrification ou graissage en général un défaut d'entretien etc.

Les mauvaises conditions d'utilisations et d'entretiens ont une influence importante sur la durée de vie des roulements ; d'où la notion de durée de service qui se définit comme la durée réelle atteinte par un roulement avant qu'il ne soit hors d'usage.

➤ Pour chaque type de roulement, il existe quatre fréquences importantes utilisées pour la détection des défauts, qui sont :

Tableau 2.2 : Formules pour le calcul des fréquences des défauts [10].

Défaut piste intérieure (BPI)	$BPI = \frac{1}{2}n\left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$
Défaut piste extérieure (BPO)	$BPO = \frac{1}{2}n\left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$
Défaut de cage (FT)	$FT = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$
Défaut de billes (BS)	$BS = \frac{1}{2}\frac{D}{d}\left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\cos^2\alpha\right]$

$BPI = 0.6 \times \frac{\text{billes}}{\text{rouleaux}}$ $BPO = 0.4 \times \frac{\text{billes}}{\text{rouleaux}}$	
---	--

➤ **Les dégradations [23]**

Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- ✓ Fatigue.
- ✓ Surcharge.
- ✓ 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

Les dégradations généralisées

- Définition d'une bande de fréquences de surveillance
- Calcul de la valeur RMS du signal dans la bande
- Suivi de l'évolution de l'indicateur dans le temps
- Comparaison à des seuils prédéfinis

$$E = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{F_{Min}}^{F_{Max}} (Ni)^2} \quad (2.6)$$

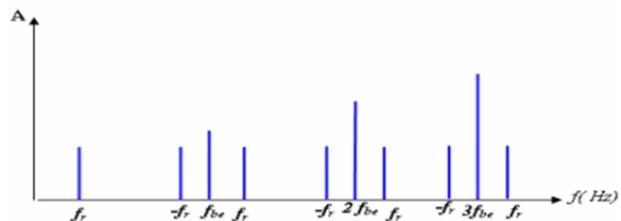
Les dégradations localisées

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

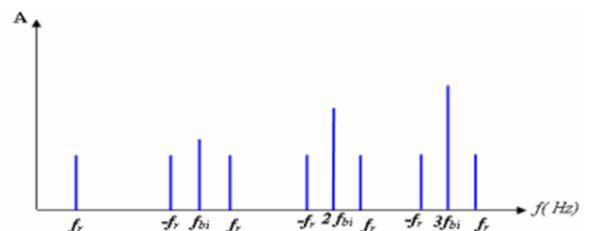
- Défaut sur bague externe = choc à FBE
- Défaut sur bague interne = choc à FBI
- Défaut sur élément roulant = choc à 2FB

➤ **Manifestation spectrale de différents défauts de roulement**

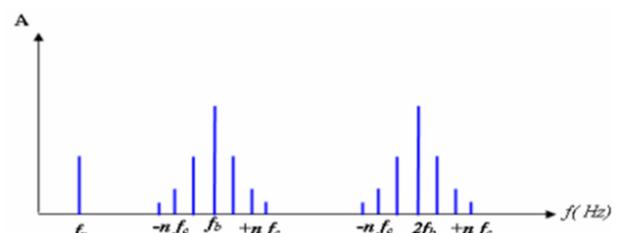
I- Défaut de bague externe



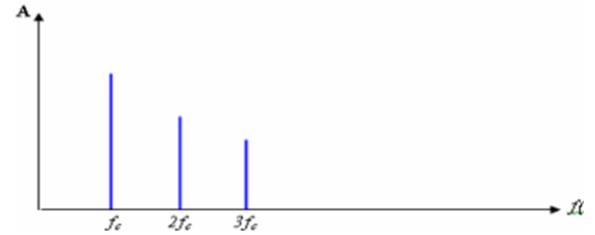
II- Défaut de bague interne



III- Défaut d'élément roulant (billes ou galets)



IV- Défaut de cage



➤ **Le Facteur défaut[23]**

Le Facteur de Défaut Roulement

Le Facteur de Défaut Roulement est un traitement spécifique du signal temporel adapté à la surveillance des roulements :

$$F_D = a * F_C + b * A_{RMS} \tag{2.7}$$

Avec $F_C = \frac{A_C}{A_{RMS}}$ Facteur de crête

Combinant les indicateurs Facteur de Crête (F C) et Valeur efficace (ARMS), il présente les avantages suivants :

- ✓ Facteur absolu.
- ✓ Détection précoce.
- ✓ Peu sensible aux conditions de fonctionnement.
- ✓ Valeur croissante sur les 3 phases de la dégradation.
- ✓ Utilisation simple et adaptée au diagnostic automatique.

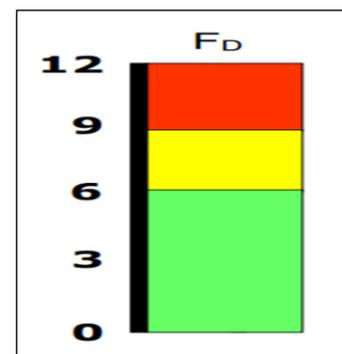
I- Le Facteur de Défaut Roulement : Evolution de l'indicateur [23]

Etape dégradation	Aspect signal	Valeur Crête	Valeur RMS	Facteur Crête	Facteur Défaut
Début Ecaillage		➔	➔	➔	➔
Dévelopmt Ecaillage		➔	➔	➔	➔
Extension Ecaillage		➔	➔	➔	➔

II- Le Facteur de Défaut Roulement : Utilisation [23]

Pour les machines de 600 à 6000 RPM les niveaux d'alarme recommandés sont :

- Alerte à 6
- Danger à 9



Remarque :

- Ces niveaux d'alarme donnent une surveillance correcte qui peut être optimisée avec l'expérience.

- En dehors des limites 600 - 6000 RPM, le FD peut aussi être utilisé. Les seuils vont alors dépendre de la configuration machine.

- Aussi, en l'absence d'historique d'évolution, on procédera à un test de graissage du roulement : Le Facteur de Défaut chute généralement de manière importante de façon instantanée.

Si le niveau du F.D reste stable à cette valeur dans les heures qui suivent l'opération, il s'agit sans doute d'un problème de graissage.

Le Facteur de Défaut Roulement et le défaut de graissage L'augmentation du niveau du Facteur de Défaut peut être liée à un défaut de graissage du roulement.

- Dans le cas contraire, il s'agit vraisemblablement d'une usure du roulement.

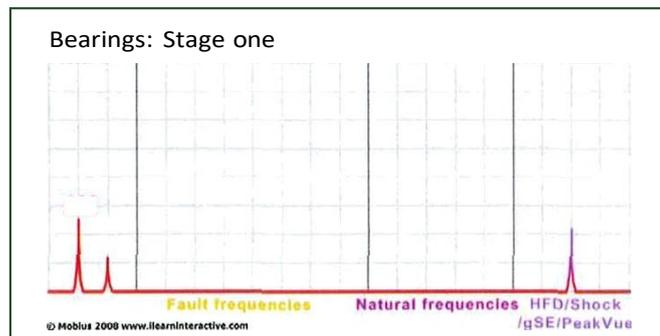
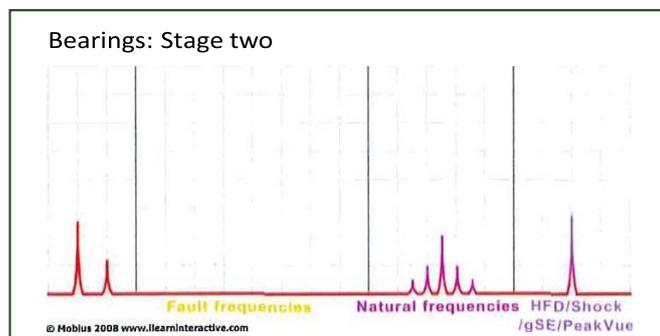
➤ **Évolution de défauts du roulement** [10].

Symptômes : Pic (avec harmoniques) à des fréquences non synchrones.

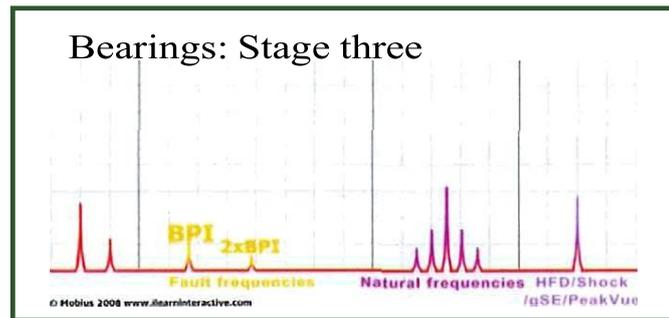
Les défauts associés aux roulements suivent un schéma classique, commençant par une "sonnerie" haute fréquence du roulement. Des outils tels que HFD, Spike Energy, SEE et autres détectent le roulement à ce stade. La démodulation (détection d'enveloppe) et "Peakvue" peuvent également être utilisés pour détecter les défauts de roulement.

Stage 1 :

Au fur et à mesure que le défaut progresse, le spectre change de manière caractéristique. Il y aura des pics aux fréquences non synchrones (par exemple 3,9X, 6,45X, etc.), généralement avec des harmoniques, et souvent avec des bandes latérales de la vitesse de rotation (1X) ou de la fréquence de la cage

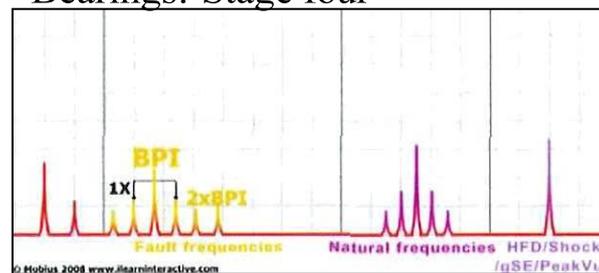
**Stage 2 :**

Stage 3 :



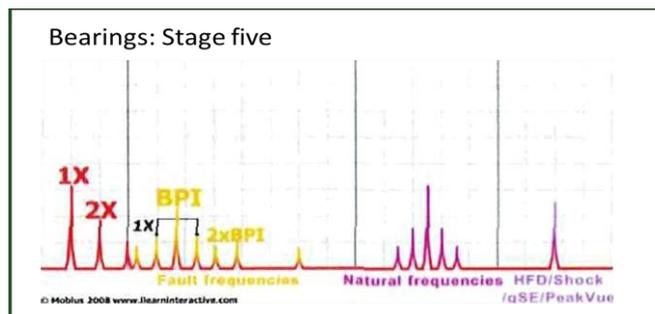
Stage 4

Bearings: Stage four



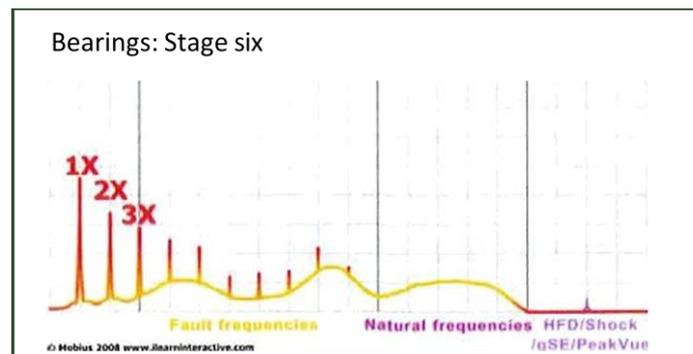
Stage 5 :

Bearings: Stage five



Stage 6 :

Bearings: Stage six



2.8. Technique d'analyse

➤ Analyse par niveau global

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie

à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

➤ **Analyse fréquentielle (spectrale)**

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité.

Ex :

- Ecaillage à un stade précoce :
- Chocs durs (durée faible) :
- Spectre de raies très large.
- Faible intensité des chocs.

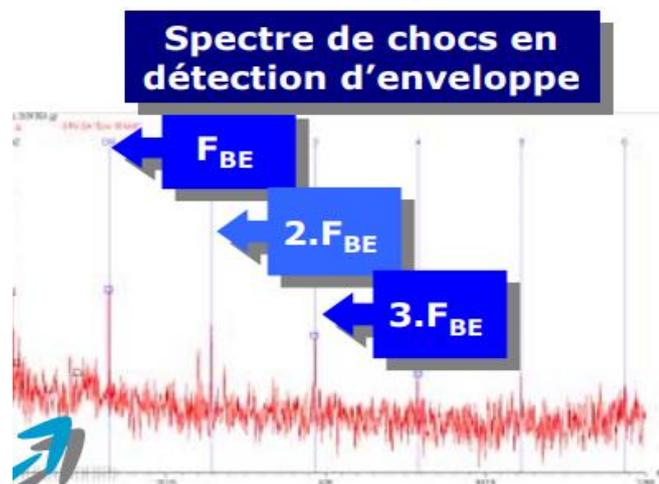


Figure 2.9 spectre de chocs en détection d'enveloppe [23].

Marquage important localisé :

- Un choc dur par tour.
- Intensité des chocs élevée.

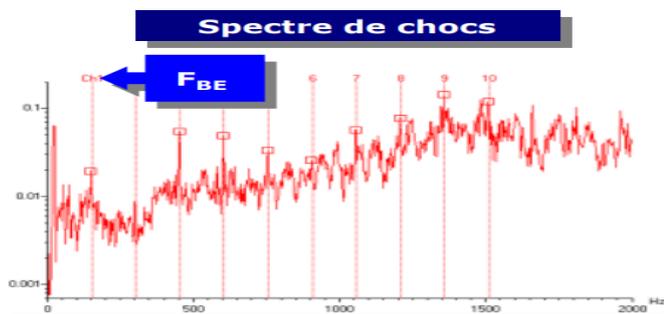


Figure 2.10 : spectre de chocs [23].

Remarque : Dans ce cas, le choc peut être directement observable sur le spectre.

➤ **Analyse temporelle**

Cette analyse consiste à suivre, au cours du temps, le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ses paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de son

accélération ou sa décélération). Ce type de suivi est facile à exploiter lorsque le signal est simple mais il devient inexploitable lorsque celui-ci a pour origine des sollicitations multiples.

Intérêt de l'analyse temporelle :

- Analyse des phénomènes lents : Faibles vitesses "
- Caractérisation de phénomènes non périodiques.
- Conservation de la chronologie Des événements.
- Chocs aléatoires.
- Chocs répétitifs mais vitesse (ou charge) machine Fluctuante "

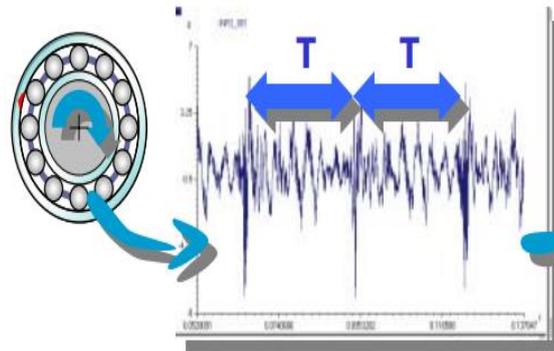
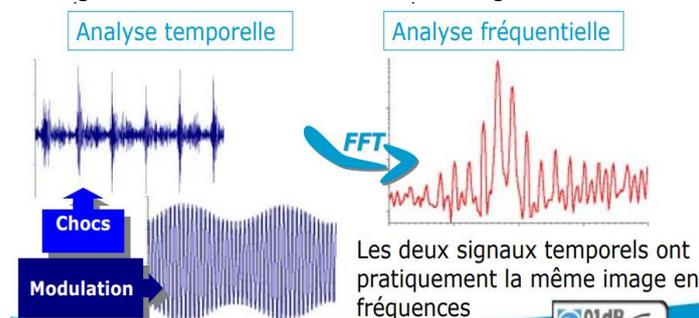


Figure 2.11 spectre temporelle d'un choc[23].

Distinction des phénomènes. En complément

De l'analyse spectrale et de l'analyse d'enveloppe, elle permet de faire la distinction entre un phénomène de chocs et un phénomène de modulation d'amplitude.



➤ Nos objectives :

Nous devons prendre des mesures qui reflètent l'État de la machine

-état du balourd

-état du roulement

-plusieurs autres défauts peuvent être détectés

Si nous ne faisons pas attention, les données que nous enregistrons ne nous fournissent pas les informations dont nous avons besoin - c'est une perte de temps.

2.9. Capteurs

Le rôle d'un capteur est de capter un signal émis par une machine de façon reproductible. La mesure du signal varie en fonction de son intensité, fréquence dans le temps. Généralement les capteurs sont connectés à des transducteurs de signaux ou boîte noire fonctionnant avec des progiciels ou logiciels qui traitent une analyse fonctionnelle préétablie. Il existe deux grandes familles de capteurs :

- Les absolus (accéléromètres, vélocimétrie).
- Les relatifs (prosimètres).

On distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- ✓ Déplacement : principe des courants de Foucault.
- ✓ Vitesse : principe électrodynamique.
- ✓ Accélération : principe piézo-électrique.

I- Accéléromètre (capteur d'accélération) [14]

Il est constitué principalement d'un matériau piézo-électrique (habituellement une céramique ferroélectrique artificiellement polarisé). Lorsque ce matériau subit une contrainte mécanique en extension compression ou cisaillement, il engendre une charge électrique proportionnelle à la force appliquée. Les capteurs piézo-électriques ou les accéléromètres sont les plus utilisés en raison de leur gamme de fréquence d'utilisation.

Les différents types d'accéléromètres sont destinés :

- ✓ Aux mesures axiales.
- ✓ A la surveillance continue.
- ✓ A l'utilisation à haute température.
- ✓ A la mesure de chocs de fortes intensités.

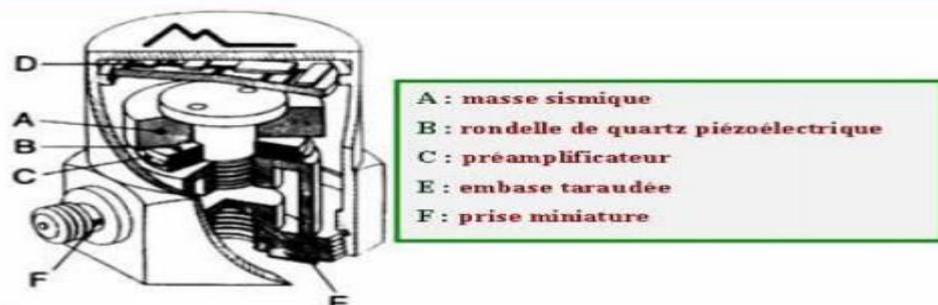


Figure 2.12 Accéléromètre fonctionnant sur le principe piézo-électrique [14].

➤ Les avantages des accéléromètres :

- ✓ Facile à installer.
- ✓ Excellente linéarité sur une vaste gamme dynamique.
- ✓ Excellente fiabilité dans le temps puisque aucun élément n'est mobile.
- ✓ Excellente précision pour un large éventail de conditions environnementales.
- ✓ Possibilité d'intégrer le signal d'accélération pour donner l'information en mode vitesse ou en mode déplacement.

➤ **Plage de fréquence** : La plage de fréquence utilisable linéairement est égale à environ un tiers de la fréquence de résonance du capteur. En général, la plage de linéarité typique est 0 à 13000 Hz.

L'examen de la courbe de réponse en fréquence d'un accéléromètre piézoélectrique montre l'existence de deux zones :

Une zone linéaire qui correspond à une plage de fréquences où la réponse du capteur permettra une mesure directement proportionnelle à l'amplitude des efforts générateurs de la vibration, avec une tolérance définie par le constructeur ($\pm 10\%$ par exemple). Cette zone définit ce que l'on a coutume d'appeler improprement la bande passante du capteur. Cette bande passante, dont la borne supérieure correspond généralement à moins d'un tiers de la fréquence de résonance du capteur, dépend des caractéristiques intrinsèques du capteur mais peut être aussi fortement

influencée par son mode de fixation (embase collée, embase aimantée, pointe de touche...)

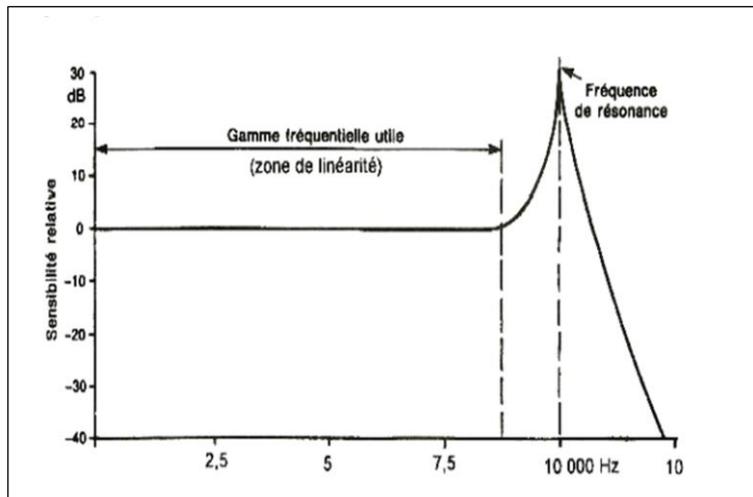


Figure 2.13 La plage de fréquence d'accéléromètre [14].

➤ Choix d'un capteur [11]

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

- par sa bande passante qui doit être en adéquation avec la cinématique de l'installation surveillée et qui devra de ce fait s'étendre, si possible, de 0,3 fois la fréquence de rotation de la plus basse à au moins 200 fois la fréquence de rotation la plus élevée,
- par sa sensibilité qui devra être en adéquation avec la typologie vibratoire susceptible d'être induite par chaque machine, quel que soit le défaut qui l'affecte. L'amplitude efficace et crête de l'accélération dépendent fortement de la vitesse de rotation et de la nature du défaut. Pour une sensibilité 1 mV/g, l'amplitude crête maximale admissible se situe autour de 5 000 g ; elle est de 500 g pour une sensibilité de 10 mV/g et seulement de 50 g pour un capteur de sensibilité de 100 mV/g. L'étendue des amplitudes.

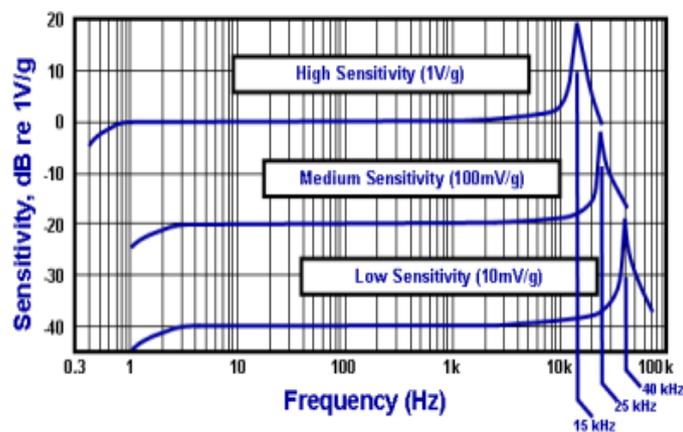


Figure 2.14 courbes de réponses en fréquence des accéléromètres à sensibilité différent [10].

➤ L'influence de montage

- Le mode de fixation de l'accéléromètre sur la structure a une influence considérable sur la réponse du capteur : Plus la fixation est rigide, plus la réponse s'élargit vers les hautes fréquences.

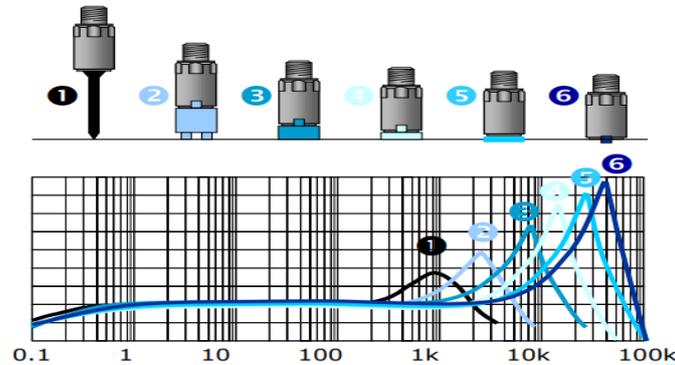


Figure 2.15 courbes de réponses en fréquence des accéléromètres [10].

II- Vélocimétrie (capteur de vitesse) [14]

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

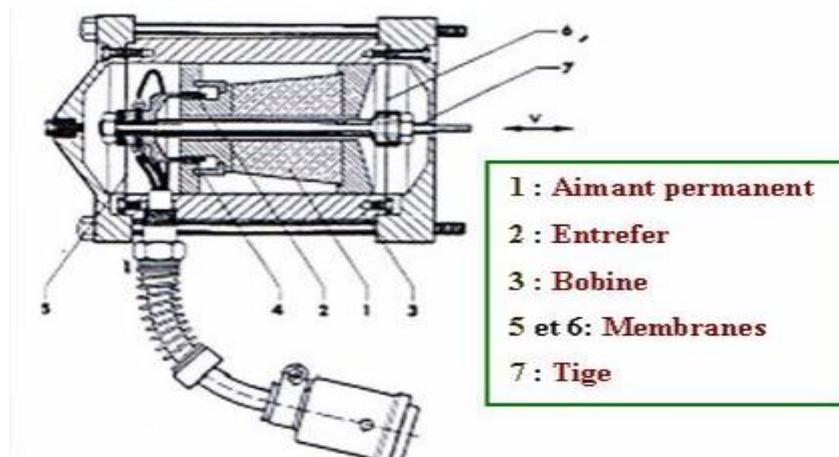


Figure 2.16 Vélocimétrie fonctionnant selon le principe électrodynamique [14].

➤ Les avantages des vélocimétries :

- ✓ Pas d'amplificateur à haute impédance.
- ✓ Signal de sortie de haut niveau et de faible impédance.

➤ Les inconvénients :

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

- **Plage de fréquence :** Les plages de travail en fréquences des différents capteurs sont fonction de leurs caractéristiques. Les plages typiques sans linéarisation sont : 8 à 2000 Hz et 20 à 2000 Hz.

III- Proximètre (capteur de déplacement) [13]

Les capteurs de déplacement (ou proximètres) mesurent la distance entre la surface surveillée et l'élément détecteur du capteur ; aujourd'hui le Proximètre le plus utilisé pour la surveillance des machines est un capteur inductif à courant de Foucault, qui mesure le déplacement d'après le principe de courant de Foucault est constitué d'une bobine et d'un câble de raccordement.

➤ **Les avantages des proximètres :**

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

➤ **Inconvénients :**

- ✓ Sensible aux hautes fréquences.
- ✓ Qualité de mesure dépendant de la qualité de surface.
- ✓ Phase relative des vibrations de l'arbre et du palier influençant la mesure.
- ✓ Implantation difficile.

➤ **Plage de fréquence :** Le principe de mesure à courant de Foucault présente généralement une plage de réponse en fréquence allant de 0 à 1000 Hz.

2.10. Conclusion

L'avènement de l'informatique et les avancées technologiques permettent et facilitent la mesure, l'analyse et l'historisation des événements de la vie d'une machine, l'enregistrement des données, l'analyse statistique et graphique du comportement de celle-ci, ainsi que l'analyse fréquentielle et l'établissement de rapports techniques de diagnostics et comptes rendus.

Il est évident que l'analyse graphique des capteurs conduit à la compréhension du fonctionnement de la machine suivant les consignes fixées et les seuils minimum et maximum prédéfinis pour sécuriser la machine de toute avarie ou endommagement.

Chapitre 3 : Étude de cas du ventilateur de fumées

3.1. Introduction

Le capteur de vibration est un instrument physique qui mesure et converti les effets mécaniques en un signal électrique avec un préalable pré amplification sous forme de sinusoïde. Ce signal est reçu par un mesureur qui donne des valeurs de niveau global ou fréquentielle.

3.2. Historiques

Ce tableau représente l'historique de suivi vibratoire de ventilateur de la fumée de **04/02/2018 au 20/05/2022**.

Tableau 3.1 : historique d'intervention sur ventilateur de la fumée.

<p>04/02/2018 au 14/10/2018</p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un balourd d'une intensité de 3.52mm/s il été 0.57 mm/s, est jugé tolérable. • Un défaut de roulement de type graissage sur les deux paliers moteur N°1.N°2 ». • Un choc très marqué à la vitesse de rotation sur les paliers « N°03&N°04 » supportant la roue du ventilateur, • Un désalignement entre l'arbre moteur et l'arbre supportant la roue du ventilateur. <p>Les actions à entreprendre :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nettoyage la roue du ventilateur. • graissage les deux roulements Moteur « N°1.N°2 ». • Contrôle la portée du roulement sur les deux paliers« N°03&N°04 ». • L'alignement les deux arbres « Moteur/Turbine ». <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Persistant toujours un choc à la vitesse de rotation sur les deux paliers supportant la roue du ventilateur.
<p>Le 20/12/2018</p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un choc très marqué à la vitesse de rotation sur les paliers « N°03&N°04 » supportant la roue du ventilateur. • Un désalignement entre l'arbre moteur et l'arbre supportant la roue du ventilateur. <p>Les actions à entreprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation du «BELZONA» sur l'arbre de la portée du roulement des deux paliers« N°03&N°04 ». • L'alignement les deux arbres « Moteur/Turbine ». <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'amélioration des niveaux vibratoires en vitesse et en accélération sur tous les paliers de la chaîne cinématique, en particulier les deux paliers supportant la roue du ventilateur « N°03&N°04 ».
<p>20/12/2018 au 14/12/2021</p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un comportement vibratoire demeure satisfaisant sur tous les paliers de la chaîne cinématique. <p>Travaux effectués :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Graissage systématique des paliers du ventilateur. <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les niveaux vibratoires sur le ventilateur demeurent tolérables.
<p>10/01/2022</p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evolution des niveaux vibratoire sur tous les paliers du ventilateur. <p>Les actions à entreprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Changement le roulement des deux paliers supportant la roue du ventilateur. <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les niveaux vibratoires sur les deux paliers « N°03&N°04 », supportant la roue du ventilateur sont demeurent alarmant.

3.3. Surveillance (on ligne) [15]

Un système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel (SCADA) (anglais : Supervisory Control And Data Acquisition, sigle : SCADA) est un système de télégestion à grande échelle permettant de traiter en temps réel un grand nombre de télémessures et de contrôler à distance des installations techniques. Dans ce système on peut programmer une fenêtre qui le surnomme WINCC ce Derrien nous permet de surveillé tous les organes de notre entreprise.

Le WINCC permet

- Surveillance en ligne de tous les organes (à distance).
- Détection des défauts.
- Capacité de manipule (démarré arrête) mon organe et lui donner des consigne (augmentation de vitesse température).
- Il permet de nous donner des informations (vitesse température)
- Nous donner le diagnostic durent l'arête programme

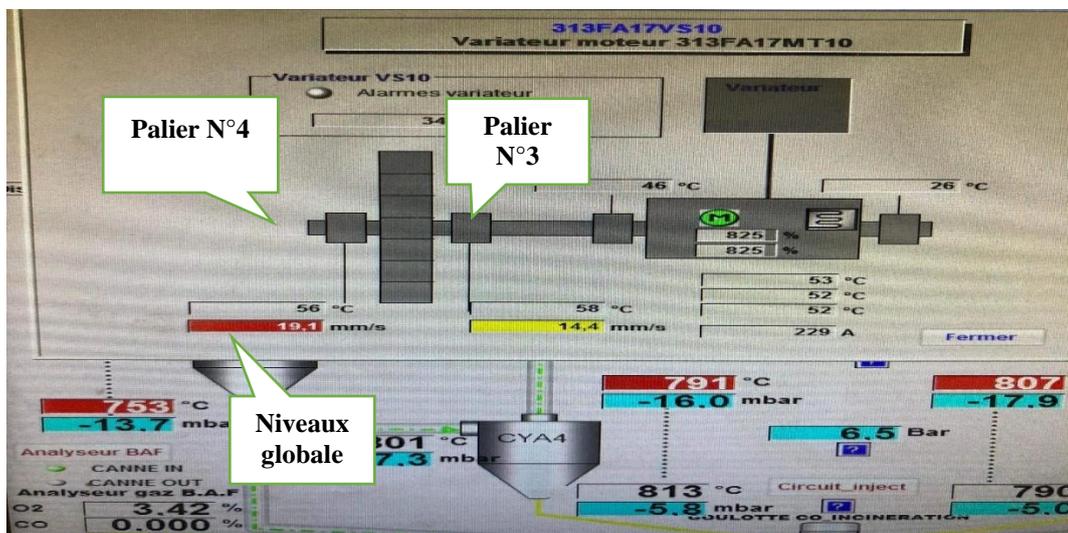
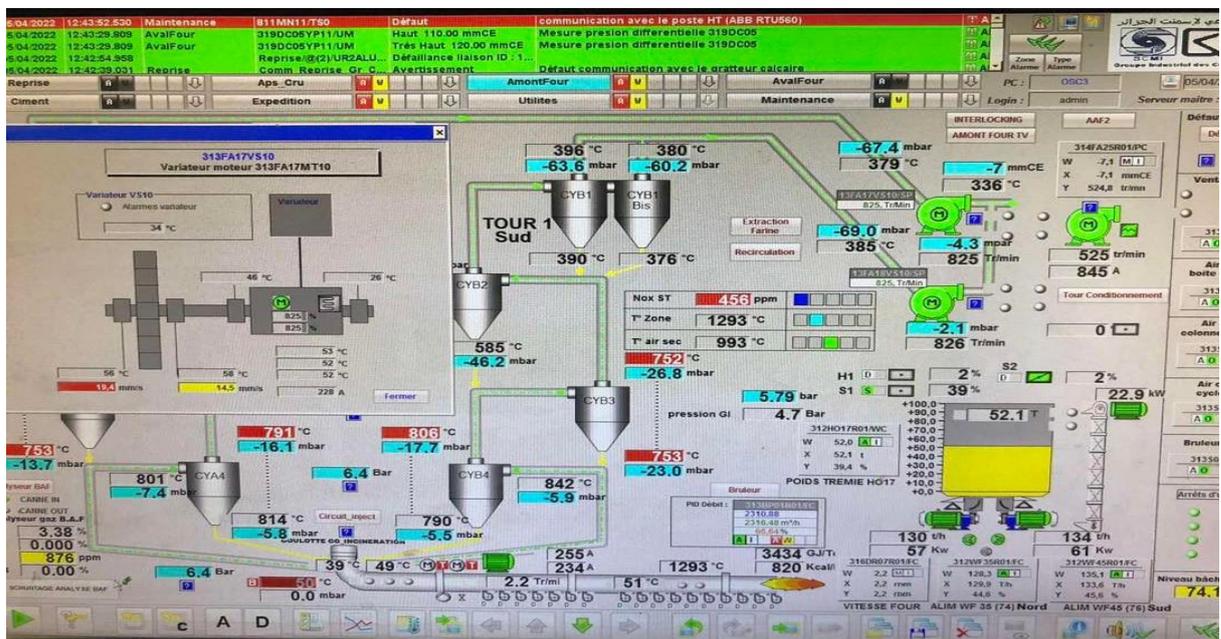


Figure 3.1 Niveaux globale on ligne affiche à salle de contrôle.

3.4. Surveillance off ligne

(Off ligne) de l'évolution des paramètres vibratoires, ce type de suivi nous permet de détecter l'apparition de défauts à évolutions lentes. Les mesure doivent être prendre à chaque fois de la même manier.

Si ce n'est pas le cas comment pourront nous interpréter les changements de niveaux ?

- Vous pouvez ne pas réaliser que vos mesures ne sont pas rétablies
- Tous les changements ne devraient dépendre que des changent d'Etat de la machine

3.5. Matériel utilise

3.5.1. Introduction

Dans cette tâche on va étudier les comportements vibratoires de tout le shama cinématique de notre ventilateur (moteur, turbine, palier) donc leurs états mécaniques et la mise en marche des appareils de diagnostic. Tout cela ont utilisent le matériel pour notre mesure.

3.5.2. Présentation du Collecteur analyseur [16]

Le système d'analyse vibratoire à quatre canaux Commtest VB8 de **Bently Nevada** est un instrument unique, sophistiqué et doté de nombreuses fonctions, qui reste intuitif dans son utilisation et suffisamment flexible pour convenir à tous les niveaux d'analyse vibratoire, du novice à l'expert. Le logiciel Ascent® inclus contient l'expérience collective de plus de 25 ans d'analyse approfondie des défauts des machines par des experts.



Figure 3.2 collecteur analyseur (VB8).

Caractéristiques principales

- Logiciel Ascent® Niveau 2.
- Paramètres de mesure et alarmes entièrement automatisés et des alarmes, basées sur la méthode éprouvée de Technique Associates.
- Les normes ISO 10816 (Voir tableau....).
- Enregistrements simultanés sur 4 canaux.
- Résolution FFT de 12 800 lignes.
- Prise en charge d80 kHz f max.
- Test d'impact modal et spectre transverse Spectre (ODS).
- Acquisition simultanée - équilibrage sur 2 plans avec jusqu'à 4 capteurs.
- Système d'enregistrement unique Commtest 6 Pack™ (6 spectre en même temps).

3.5.3. Capteur de Vibration "Accéléromètre 100 mv/g" [17]

On utilise comme type de capteur de genre piézoélectrique accéléromètre (**Wilcoxon-model 780A-D2**) car ce type fourni plus d'avantages, on peut extraire l'accélération, la vitesse et le déplacement au même temps. C'est un accéléromètre de type piézoélectrique raccordé au collecteur analyseur **COMMTEST VB8**.



Figure 3.3 accéléromètre de type piézoélectrique.

Tableau 3.2 : Caractéristiques d'accéléromètre.

PARAMÈTRE	VALEUR
Sortie du capteur	Vibration dynamique (IEPE)
Sensibilité	100 mV/g
Tolérance de sensibilité	±5 %.
Réponse en fréquence	0,4 Hz - 14 000 Hz
Filetage de montage	Trou taraudé 1/4-28 UNF
Style de connecteur	MIL-C-5015, 2 broches
Orientation du connecteur	Sortie par le haut
Plage de pleine échelle	80 g crête
Fréquence de résonance	30 kHz
Plage de température	-55°C à +120°C
Poids	62 grammes
Homologations pour les zones dangereuses	Classe I, Div 2, Zone 2 ; ATEX II 3G Ex Na

3.5.4. Logiciel d'analyse "SYSTEME 1" [18]

Le logiciel "System 1* Basic" est le logiciel d'entrée de gamme de GE Bently Nevada dans la suite logicielle System 1. Il fournit une vue simple des données de vibration et de surveillance qui vous permet de prendre des décisions éclairées et d'éviter les pannes coûteuses, imprévues et les temps d'arrêt coûteux et non planifiés.

System 1 Basic est équipé d'un ensemble d'outils permettant la surveillance de base de vos systèmes de protection RACK 3500 et ADAPT. Cela comprend :

- Des données de tendance à court terme pour permettre un accès immédiat aux informations sur l'état de la machine.
- Des listes d'alarmes et d'événements pour comprendre les événements identifiés par le système de protection.
- Des outils de traçage de base pour visualiser les données relatives aux événements, les données historiques et les valeurs actuelles. Le system 1 Basic est un modèle de navigation intuitif, basé sur des instruments. .

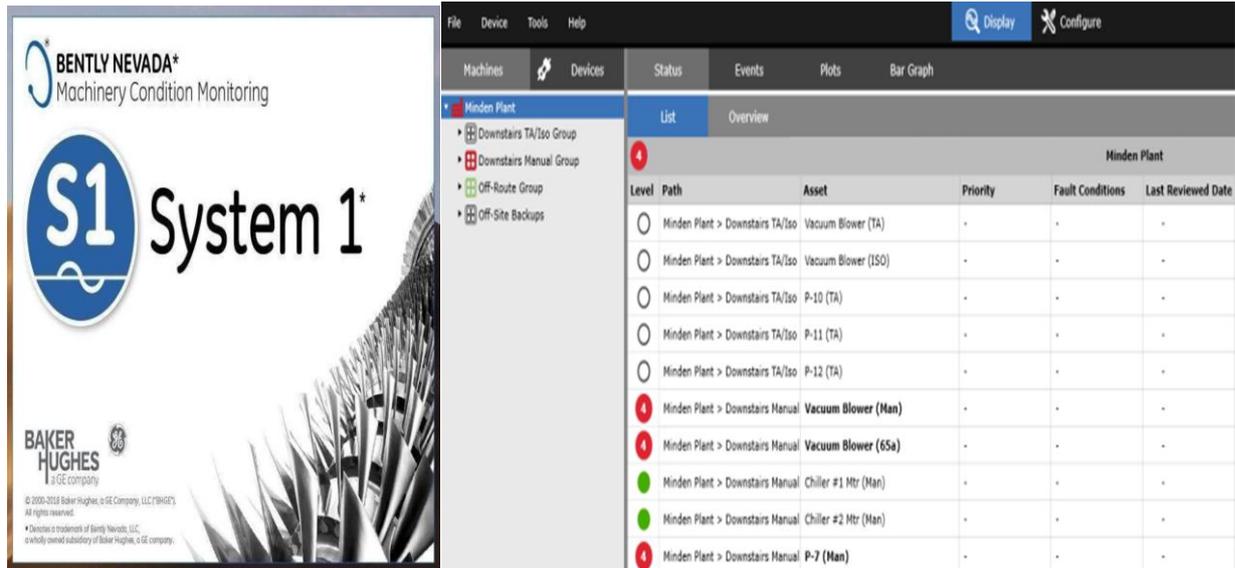


Figure 3.4 image du logiciel system 1.

3.6. Normes utilisées [19]

Les niveaux vibratoires des machines tournantes ou alternatives sont soumis à des normes qui définissent la sévérité de ces vibrations en fonction de leur amplitude.

Pour les machines tournantes en fonctionnement sur leur site d'exploitation, on retrouve les normes suivantes :

- Norme ISO 10816

Qui remplace les normes :

- Norme ISO 2372
- Norme AFNOR E90-300

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) Bande passante: 10 – 1000 Hz si > 600 trs/mn 2 – 1000 Hz si < 600 trs/mn	Support rigide			Support souple		
	µm	mm/s	Zone	µm	mm/s	Zone
			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 3.5 La Norme ISO 10816.

La Norme ISO 10816 classifie les machines en fonction des paramètres suivants :

- **Groupe 1** : Machines de grande dimension – Puissance > 300 kW
- **Groupe 2** : Machines de taille moyenne – Puissance de 15 kW à 300 kW.
Hauteur d'axe de 160 mm à 315 mm
- **Groupe 3** : Pompes à roue ailette (centrifuge, hélicoïdale ou axiale).
Avec entraînement séparé - Puissance > 15 kW
- **Groupe 4** : Pompes à roue ailette (centrifuge, hélicoïdale ou axiale).
Avec entraînement intégré - Puissance > 15 kW

Classification :

- **Zone A** : Les vibrations des machines récemment mises en service doivent normalement se situer dans cette zone.
- **Zone B** : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme acceptables pour un service de longue durée sans la moindre restriction.
- **Zone C** : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme non satisfaisantes pour un service de longue durée en continu. En général, la machine peut fonctionner dans ces conditions pendant une durée limitée, jusqu'à ce que l'occasion se présente pour prendre les mesures correctives qui s'imposent.
- **Zone D** : Les valeurs de vibrations constatées dans cette zone sont normalement considérées comme suffisamment importantes pour provoquer des détériorations de la machine.

3.7. Etude expérimentale

3.7.1. Points de mesure

Le nombre de points de mesure sur une machine dépend du nombre de paliers, le ventilateur de fumée contient quatre paliers (deux pour le moteur et deux pour la turbine). La mesure de l'amplitude de vibration s'effectue selon deux direction radiales ((horizontale et verticale) et direction axiale.

- Sur le moteur : Sur le palier 1 on effectuera une mesure radiale ; horizontale et verticale et sur le palier 2 on effectuera une radiale ; horizontale et verticale ; et axiale.
- Sur le turbine : Sur les paliers 3 et 4 on effectuera une mesure radiale ; horizontale et verticale ; et axiale.

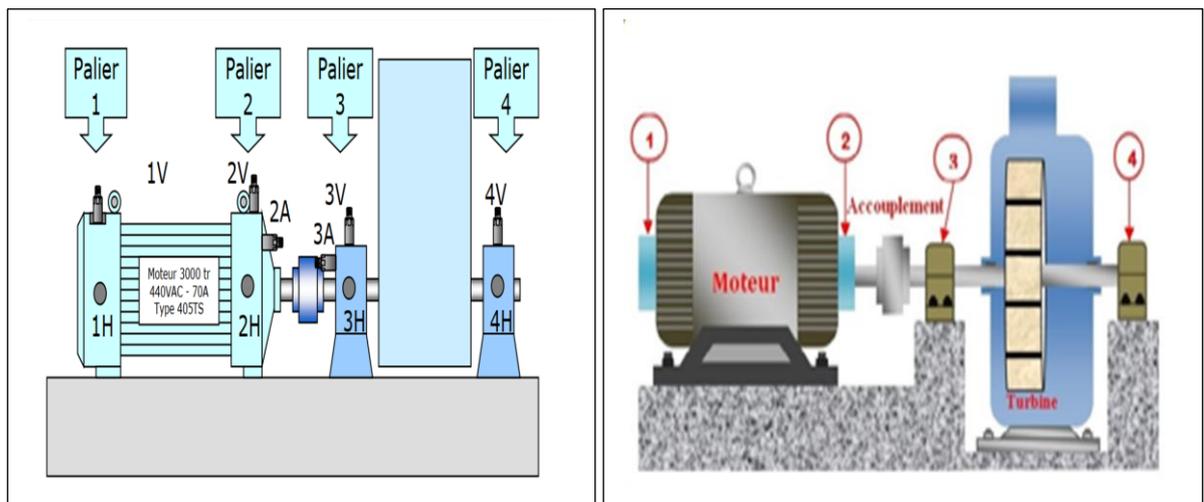


Figure 3.6 Schéma cinématique et points de mesures de la machine.

3.7.2. Configuration de machine sur logiciel

- Création de data base
 - Les propriétés de la machine (ventilateur):
 - Vitesse du fonctionnement (825 rad /s).
 - Puissance (1600kw).
 - Fondation (support rigide "charpente métallique").
 - Type de roulement (Roulements à rotule sur rouleaux cylindrique 22232 CC/W33).
 - Nombre de pales (11 pales), avec une fréquence de passage de pales = $825 \text{ t/min} (13.75\text{Hz}) \times 11(\text{pales}) = (151.25\text{Hz})$
 - Programmer la gamme des fréquences :
 - Basses fréquences < 200 Hz.
 - 200 Hz < Moyennes fréquences < 2000 Hz.
 - 2000 Hz < Hautes fréquences.
 - Spectre temporelle.
 - Spectre démodulation.

3.7.3. Acquisition sur site

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est elle aussi très importante. Chaque campagne de mesures doit être effectuée en des points précis et toujours les mêmes. En effet, un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction du point de mesure.

Pour cela vous devez prendre de bonnes données, donc gardez vos yeux et vos oreilles ouvertes et enregistrez vos observations (vos observations sont extrêmement).



Figure 3.7 Acquisition sur site.

3.7.4. Mesure avant la maintenance (avant l'arrêt programmé)

I- 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 (mm/s) RMS	Diagnostic	Mes (g) RMS	Diagnostic	Facture De défaut de roulement	Diagnostic
Moteur	P1_H	5 avril 2022	4.158	Alarme	1.038	Alarme	4.860	Bon
	P1_V	5 avril 2022	3.107	Alarme	1.962	Danger	4.404	Bon
	P2_H	5 avril 2022	4.363	Alarme	0.427	Bon	5.333	Bon
	P2_V	5 avril 2022	4.367	Alarme	0.910	Alarme	6.361	Alarme
	P2_A	5 avril 2022	6.998	Danger	0.479	Bon	3.849	Bon
Turbine	P3_H	5 avril 2022	15.15	Danger	0.609	Bon	5.118	Bon
	P3_V	5 avril 2022	14.73	Danger	0.782	Bon	4.459	Bon
	P3_A	5 avril 2022	12.97	Danger	0.666	Bon	3.964	Bon
	P4_H	5 avril 2022	22.60	Danger	2.025	Danger	4.955	Bon
	P4_V	5 avril 2022	11.97	Danger	2.354	Danger	7.411	Alarme
	P4_A	5 avril 2022	11.98	Danger	1.507	Danger	7.411	Alarme

D'après les résultats mentionnés sur le tableau ci-dessus et en comparaison avec la norme **ISO 10816-3**, nous constatons ce qui suit :

- Le niveau vibratoire en vitesse « mm/s » et en accélération « G » relevés sur les paliers (N°3 et N°4 du ventilateur, sont au seuil de **danger** faisant référence aux normes vibratoires des machines tournantes (**10816-3**).

- Nous remarquons aussi que le facteur défaut de roulement est élevé (le seuil d’alarme du facteur défaut roulement est 6 et danger est fixé à 9), donc l’état de roulements est inacceptable.

III- Analyse de spectrale

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

• Sur le palier N°3 :

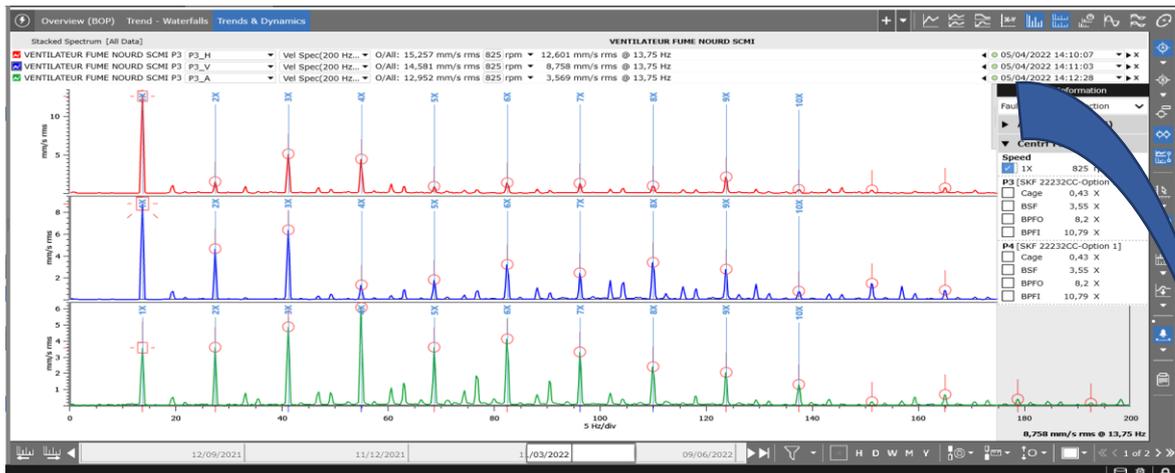


Figure 3.8 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A).

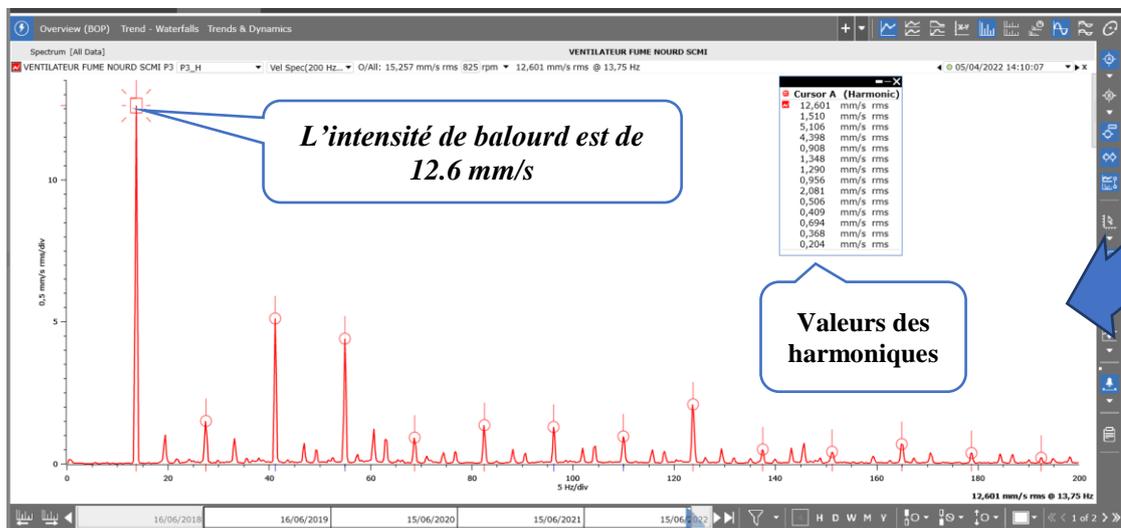


Figure 3.9 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en direction horizontale, illustre un balourd important sur lui.

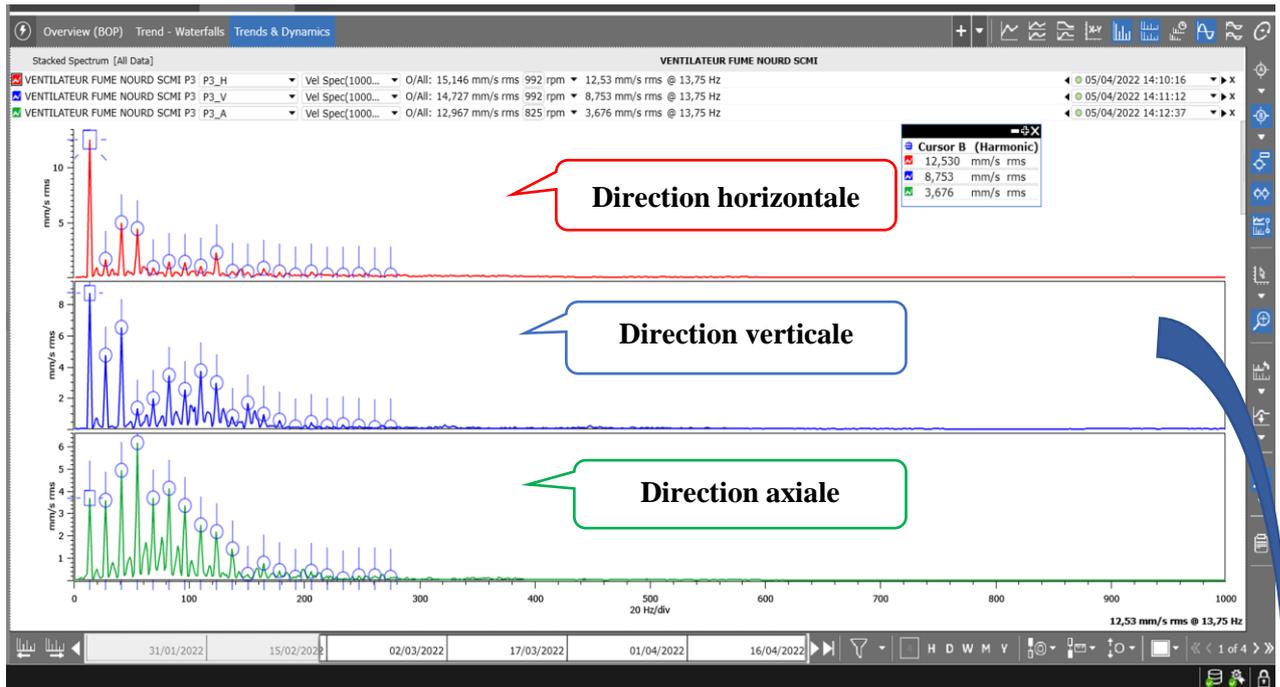


Figure 3.10 : Spectrale linéaire ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A).

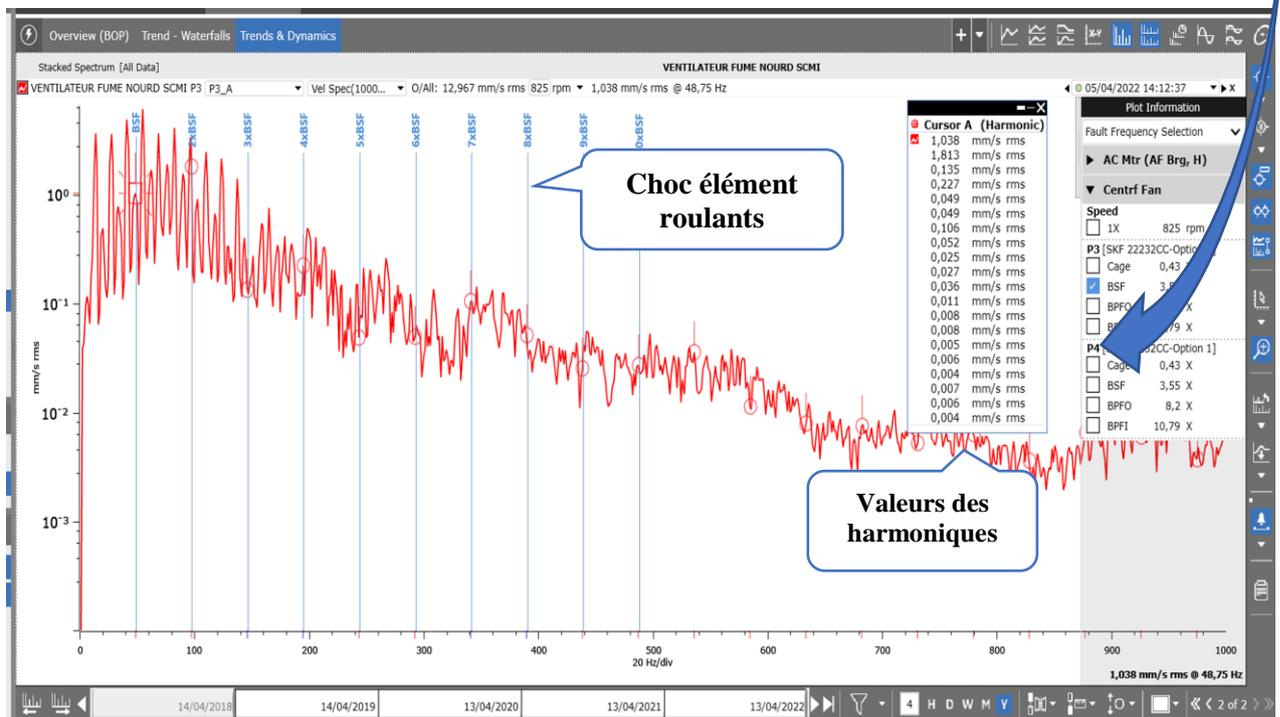


Figure 3.11 : Spectrale logarithmique ((moyen fréquence (2.5-1000) Hz) prise sur le palier N°3, met en évidence le défaut de roulement sur lui.

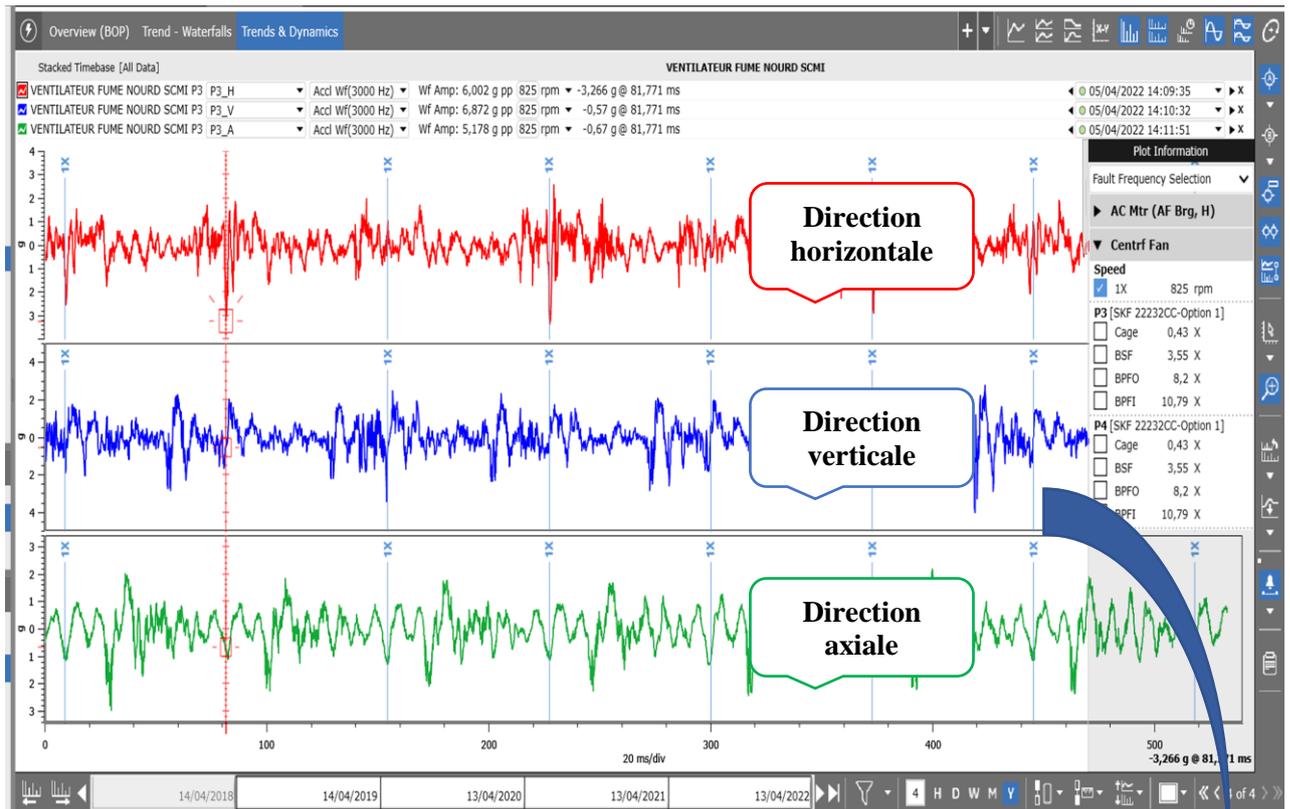


Figure 3.12 Spectrale temporelles prise sur le palier N°3, de la turbine en trois directions (H, V, A).

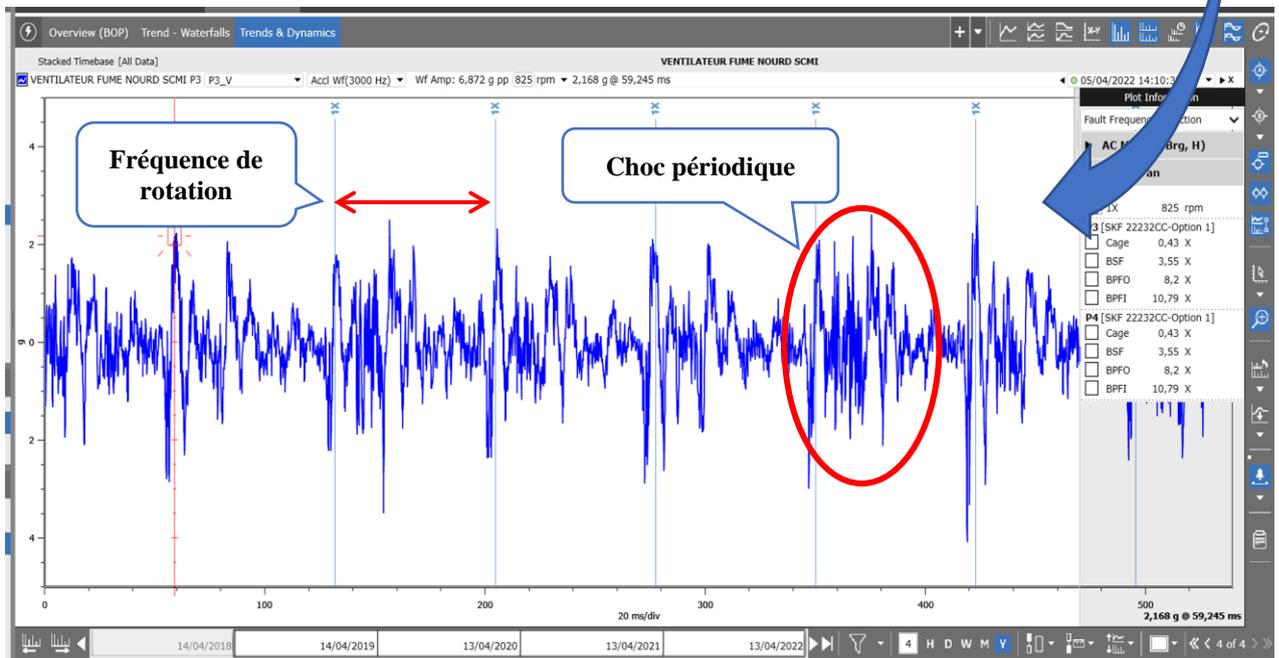


Figure 3.13 Spectrale temporelles prise sur le palier N°3 dans la direction verticale, illustre le choc important sur lui.

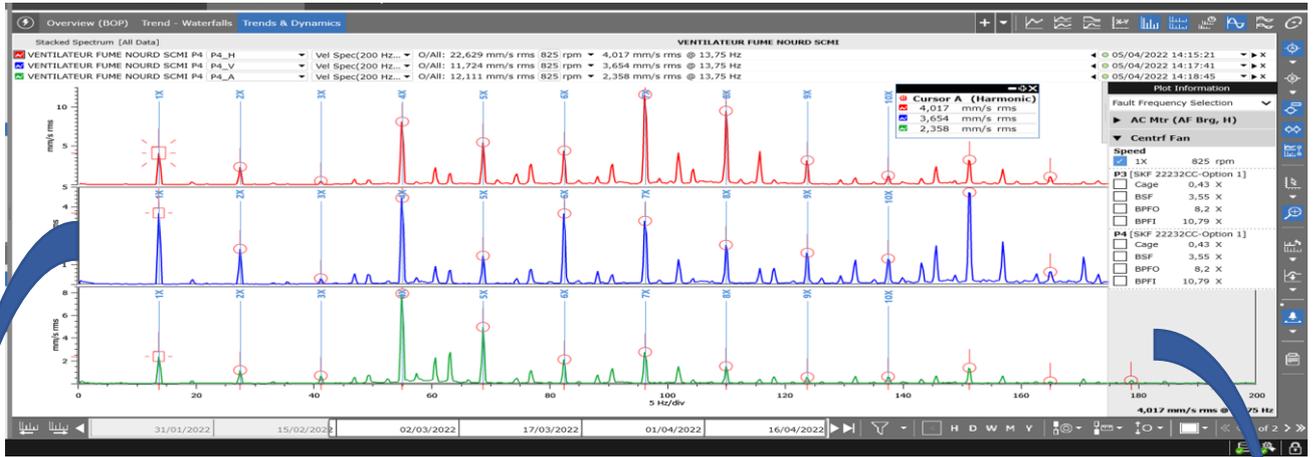


Figure 3.14 : Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A).

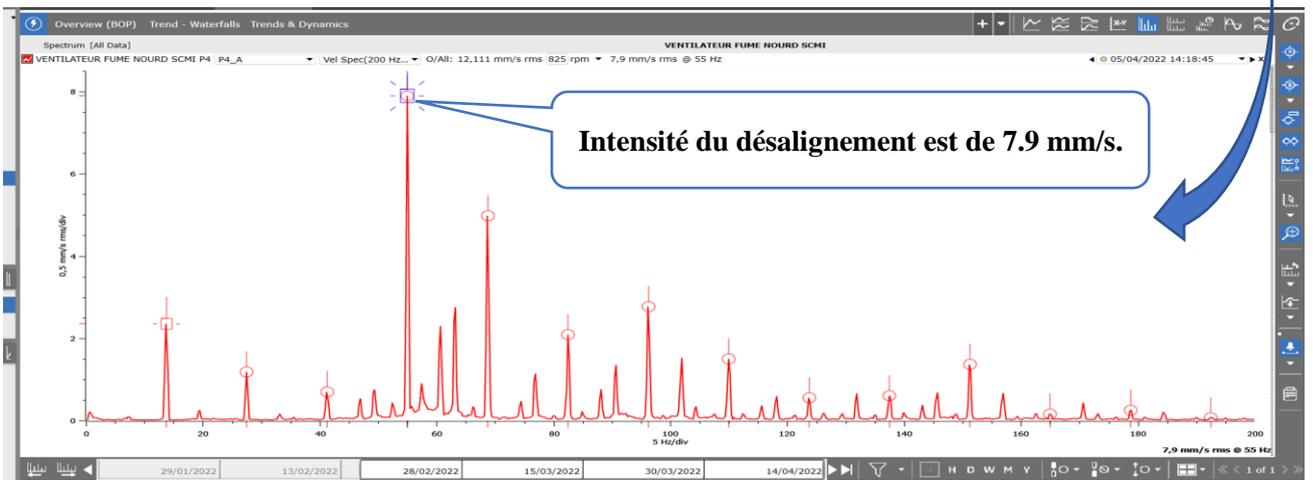


Figure 3.15 : Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en direction axiale, démontre l'intensité de désalignement

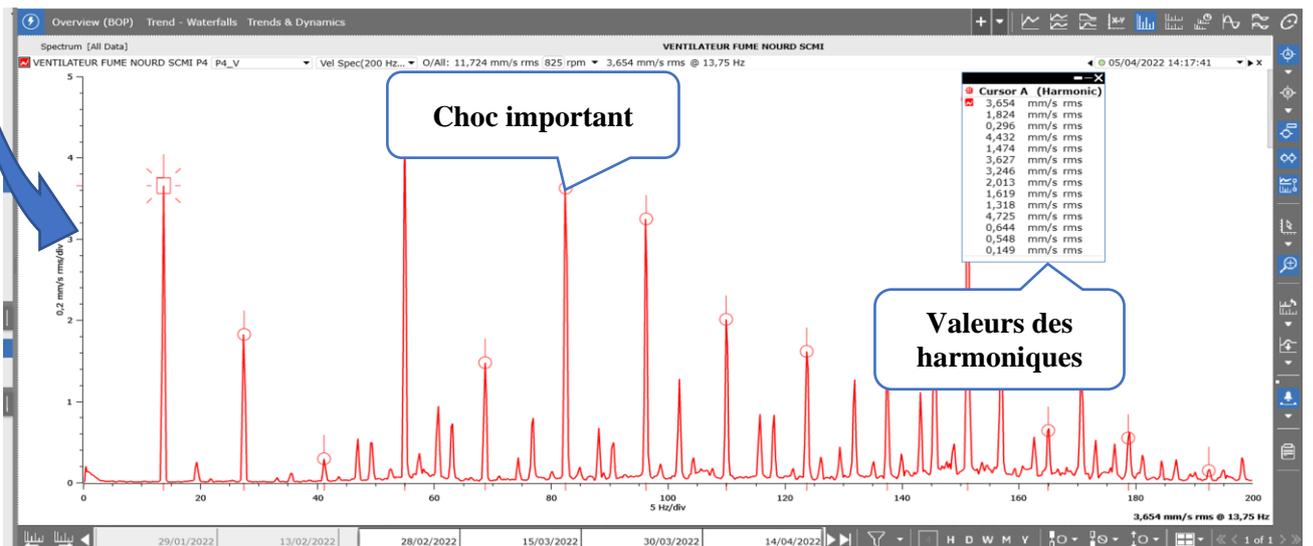


Figure 3.16 Spectrale linéaire (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 en direction verticale, illustre un choc important à 1/2 la fréquence de rotation lui.

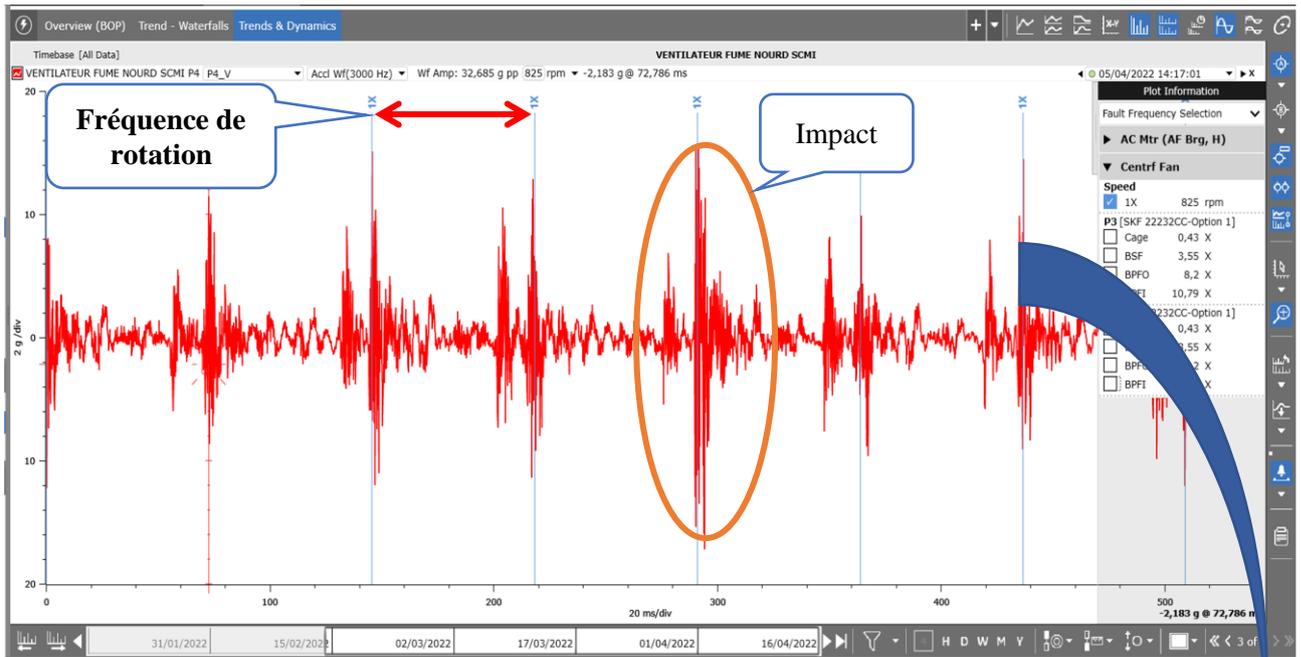


Figure 3.17 : Spectrale temporaires prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre l'écaillage de la bague interne de son roulement.

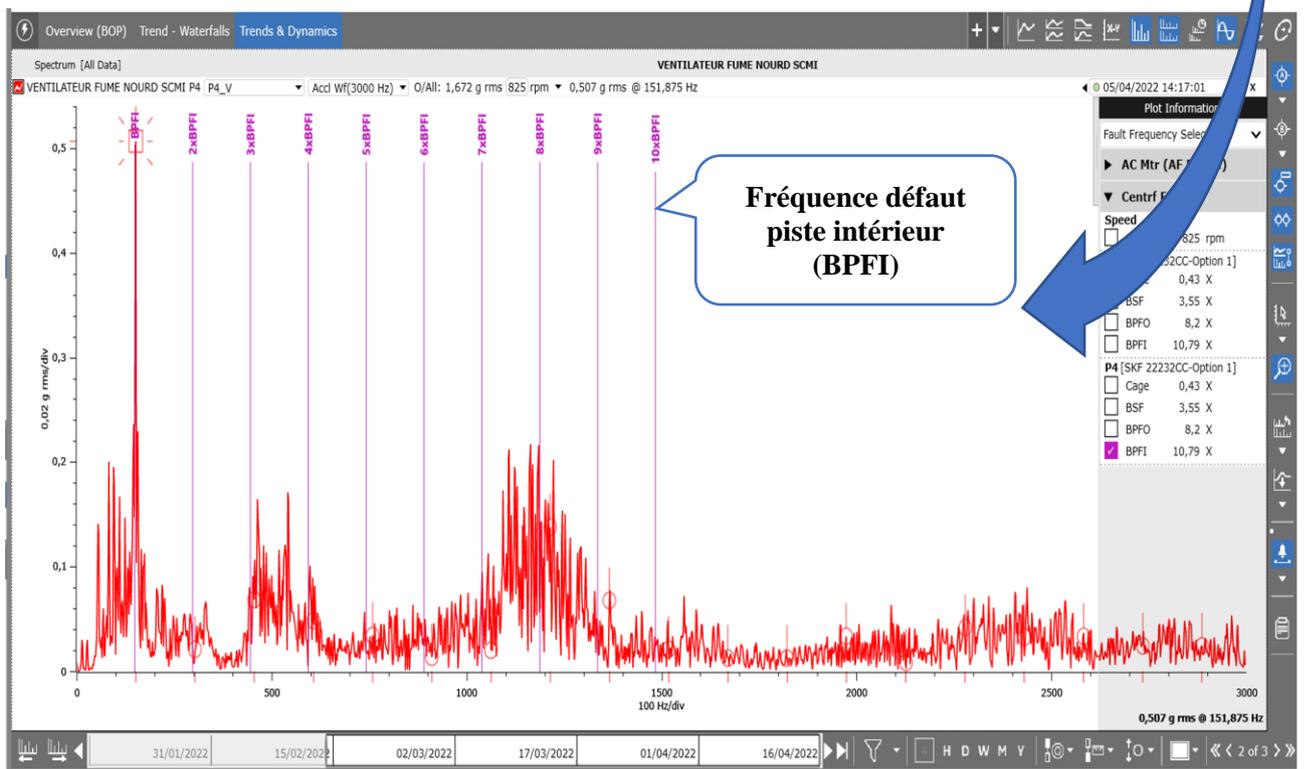


Figure 3.18 : Spectrale linéaire prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre l'écaillage de la bague interne de son roulement.

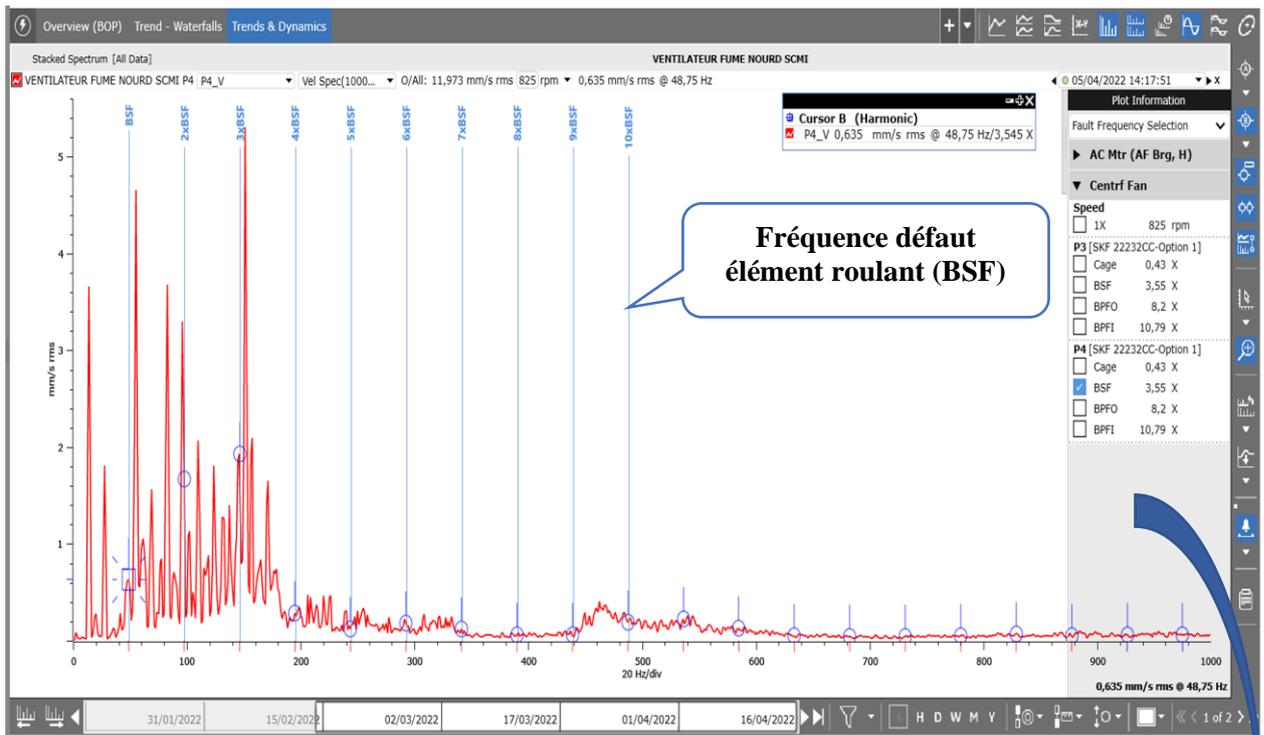


Figure 3.19 : Spectrale linéaire (basse fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°4 démontre un défaut sur élément roulant de son roulement.

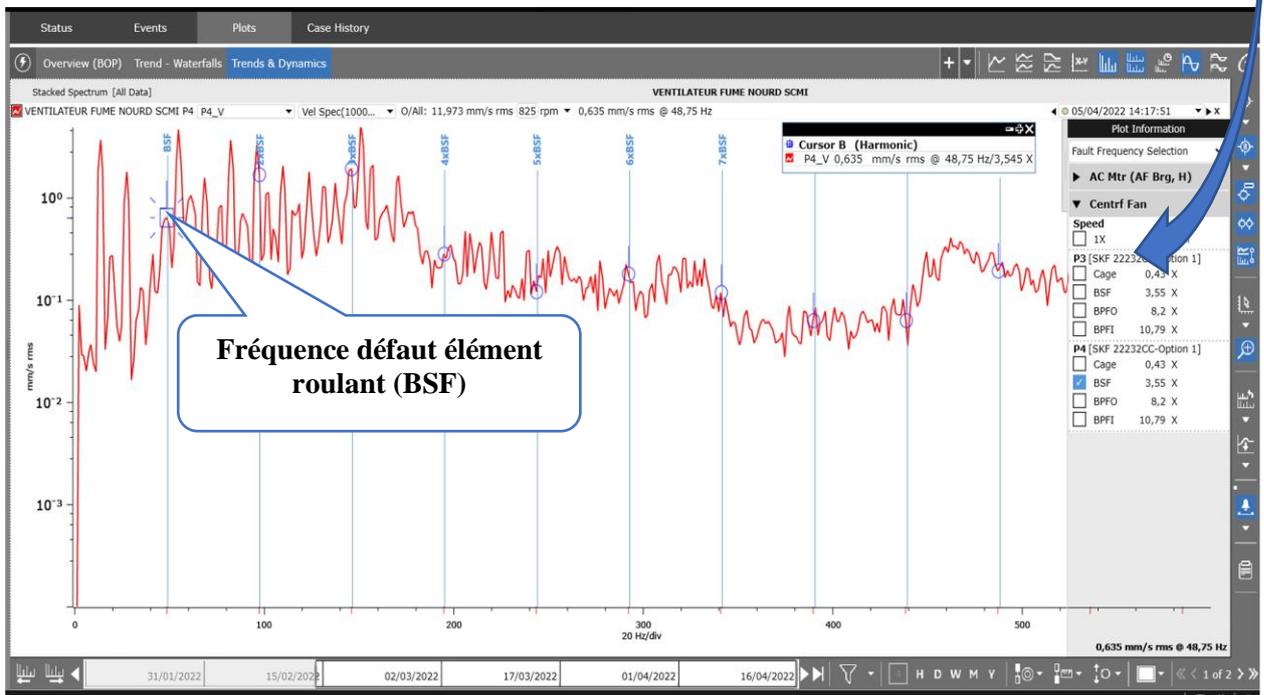


Figure 3.20 Spectrale logarithmique (basse fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°4 démontre un défaut sur élément roulant de son roulement.

IV- Résultats d'analyse

Le diagnostic vibratoire des spectres mesurés sur tous les paliers de la cinématique du ventilateur, nous a permis de constater des niveaux vibratoires en vitesse «**mm/s**» et en accélération «**g**» **intolérable** sur tous les paliers, Cette quantité vibratoire est due des défauts sur le palier N°4 qui s'est manifesté sur toute la cinématique de ventilateur (moteur et turbine).

L'analyse spectrale nous a permis de détecter la présence des anomalies suivantes :

- Un balourd important sur le palier N°3 d'une valeur de « **12.9 mm/s** »
- Un choc important à la fréquence de rotation sur le palier N°3.
- Un défaut de roulement sur le palier N°3.
- Un désalignement enregistré sur le palier rotor N°04 dans la direction axiale d'une valeur de « **11.98mm/s** » suivi d'un choc.
- Un choc important (ce choc se manifeste jusqu'au moteur) à la fréquence de rotation sur le palier N°4. (jeu important entre le roulement et l'arbre).
- Un défaut de roulement important sur le palier N°4.

Ceci s'explique par : le choc sur les deux paliers (N°3 et N°4) de la turbine probablement à l'usure (enlèvement de matière) de l'arbre portant la turbine au emplacement de roulement de palier N°4. Ce problème provoque un défaut de roulement important.

a. Mesures à entreprendre

Nous vous recommandons de procéder aux actions suivantes :

- Changement des deux roulements (roulement de palier N°3 et roulement de palier N°4).
- Changement des deux paliers.
- Changement de l'arbre portant la turbine.
- Vérification de l'état de l'accouplement entre le moteur et la turbine.
- Inspection des deux roulements du moteur.

Vu l'état vibratoire insatisfaisant du ventilateur, nous vous suggérons, et ce, dans les meilleurs délais, de faire le changement des composants de ventilateur (turbine, roulements, paliers et arbre) et programmer un arrêt technique dans le meilleur délai.

3.7.5. Travaux programmés durant l'arrêt

I- Les travaux réalisés :

- Changement des deux roulements (roulement du palier N°3 & roulement du palier N°4).
- Changement des deux paliers (palier N°3 & palier N°4).
- Changement de l'arbre et la turbine.

- Changement d'accouplement entre le moteur et la turbine.

II- Sécurité et Préparation du chantier :

- Préparation du chantier :

1. Préparer l'aire de travail
2. Nettoyer l'aire d'interventions.
3. Poser les nouvelles pièces de rechange à côté.
4. Respecter la procédure de gestion des déchets solides et liquides.
5. Préparer l'outillage nécessaire (voir la liste d'outillages ci-jointe).

- Sécurité :

1. Faire l'analyse de risques avec les intervenants.
2. Respecter la distance sécurité envers les engins (la grue et clark).
3. Le port des équipements EPI est obligatoire.
4. Baliser l'aire de travail.
5. Agir avec précaution
6. Consigner électriquement (LOTO).
7. S'assurer que tous les intervenants ont mis leurs cadenas de consignation.

III- Démontage :

- Démontez le capot du palier
- Nettoyez la graisse
- Dévissez les boulons de fixation des paliers
- Démontez les paliers
- Ouverture des 2 portes visites.
- Enlever le pineau d'accouplement.
- Démontez les boulons de fixation du palier (coté cde +coté libre).
- Utilisez la grue pour la manutention.
- Enlever les 2 capots.
- Élinguez la turbine de 2cotés.
- Avec la grue faire sortir la turbine.

- **Palier :**



Figure 3.21 palier remplace.

Note : Les paliers ont été endommagés à cause d'un écaillage : (le jeu d'arbre causé par le frottement du roulement avec le palier a créé un enlèvement de matière)

➤ **Roulement :**



Figure 3.22 roulement remplacée.

Note : Endommagement du roulement (la bague interne – rouleaux)

➤ **Arbre :**



Figure 3.23 : la pâte belzona sur l'arbre.

Note : la pâte belzona est utilisée pour le remplissage de l'arbre.

➤ **Turbine :**



Figure 3.24 Colmatage de la turbine.

Note : la matière a été colle sur la turbine est créé un balourd

IV- Montage :

- Ouverture des 2 portes visites.
- Enlever le panneau d'accouplement.
- Démontez les boulons de fixation du palier (coté cde +coté libre).
- Utiliser la grue pour la manutention.

- Enlever les 2 capots.
- Élingué la turbine de 2cotés.
- Avec la grue faire sortir la turbine.
- Monter le nouveau roulement (bien placé sur sa portée)
- Placer le nouveau palier à sa place
- Placer le manchon de serrage
- Serrer le manchon de serrage (contrôler le jeu de roulement au fur et à mesure du serrage manchon)
- Bloquer le manchon de serrage
- Mettre les boulons de fixation palier

V- Les pièces remplacent

Tableau 3.4 : les pièces remplacent.

Pièce	photo
Roulement	
Palier souple	
Palier fixe	
Turbine et arbre	

3.7.6. Mesure Après la maintenance (Après l'intervention) :

I- Analyse de Niveau globale :

Les résultats obtenus par des mesures effectuées après intervention sont résumées dans les tableaux suivants :

Tableau 3.5 : des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération.

Sev.	Point	Date	Mes-1 (mm/s) RMS	Mes (mm/s) RMS	Diagnostic	Mes-1 (g) RMS	Mes (g) RMS	Diagnostic
Moteur	P1_H	29 May 2022	4.158	0,917	Bon	1.038	3.402	Dander
	P1_V	29 May 2022	3.107	0,425	Bon	1.962	5.285	Danger
	P2_H	29 May 2022	4.363	1,088	Bon	0.427	1.361	Alarme
	P2_V	29 May 2022	4.367	0,529	Bon	0.910	2.124	Danger
	P2_A	29 May 2022	6.998	0,877	Bon	0,479	0.660	Bon
Turbine	P3_H	29 May 2022	15.15	2,205	Bon	0,609	0,100	Bon
	P3_V	29 May 2022	14.73	1,039	Bon	0,782	0,082	Bon
	P3_A	29 May 2022	12.97	3,515	Bon	0,666	0,099	Bon
	P4_H	29 May 2022	22.60	1,420	Bon	2,025	0,107	Bon
	P4_V	29 May 2022	11.97	1,471	Bon	2,354	0,093	Bon
	P4_A	29 May 2022	11.98	3,874	Bon	1.507	0,083	Bon

II- Résultats d'analyse

D'après les résultats mentionnés sur le tableau (5) et en comparaison avec la norme **ISO 10816-3** ; Nous constatons ce qui ce suit :

Les niveaux vibratoires recueillis sur l'ensemble des paliers de la chaine cinématique du ventilateur de fumée sont jugés **BONS** et **Admissibles** en vitesse « mm/s » et en accélération «G» selon la norme vibratoire des machines tournantes **ISO 10816-3**.

III- Analyse spectrale :

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

• Sur le palier N°3 :

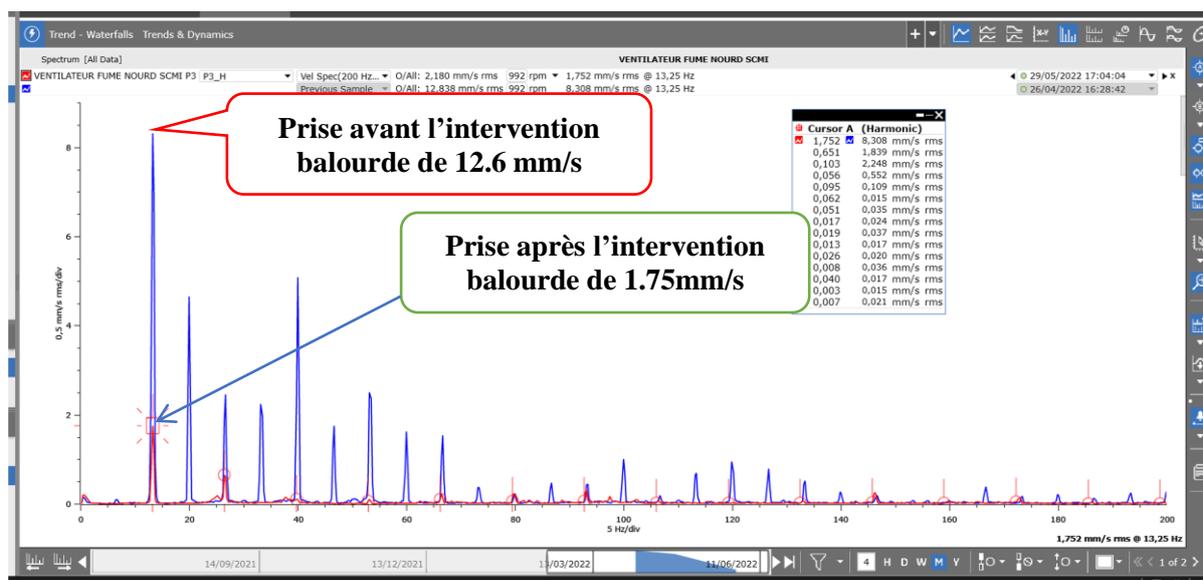


Figure 3.25 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°03, démontre la diminution de l'intensité du balourd du choc sur la bande moyenne fréquence.

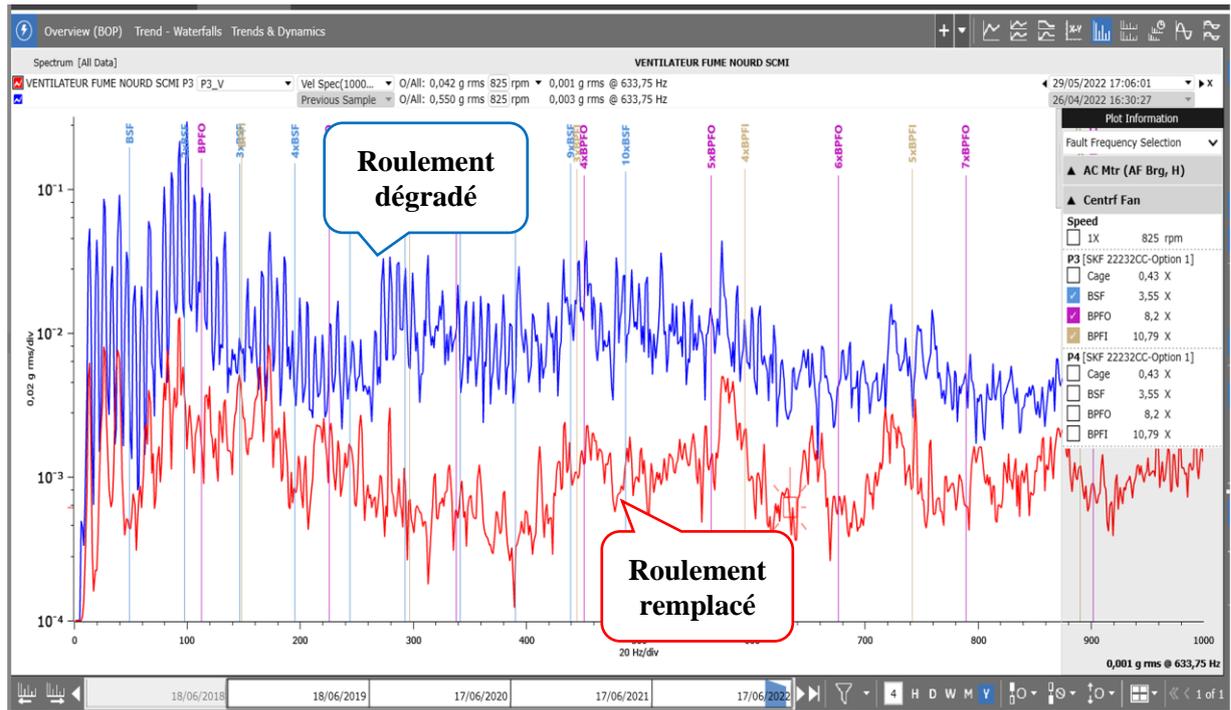


Figure 3.26 : Spectrale logarithmique superposé prise sur le palier N°3, démontre la disparition du défaut roulement sur lui après l'intervention.

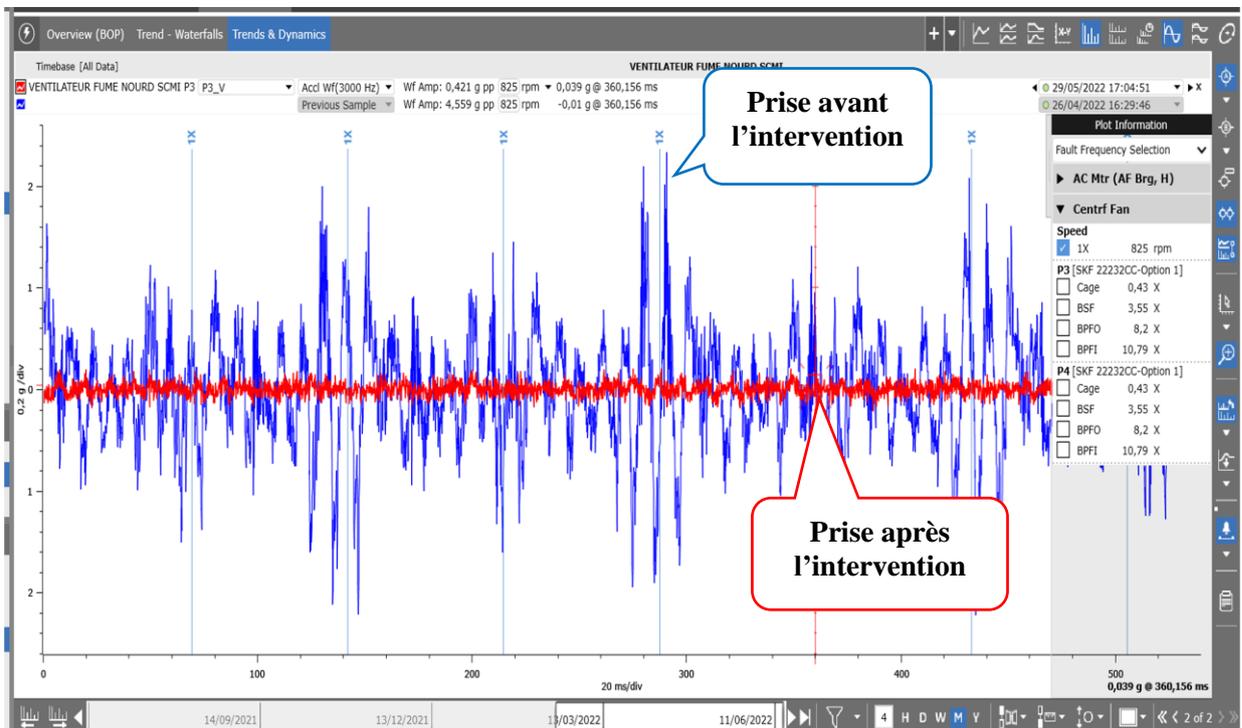


Figure 3.27 : Image spectrale temporaire superposé prise sur le palier N°03, démontre la disparition du choc.

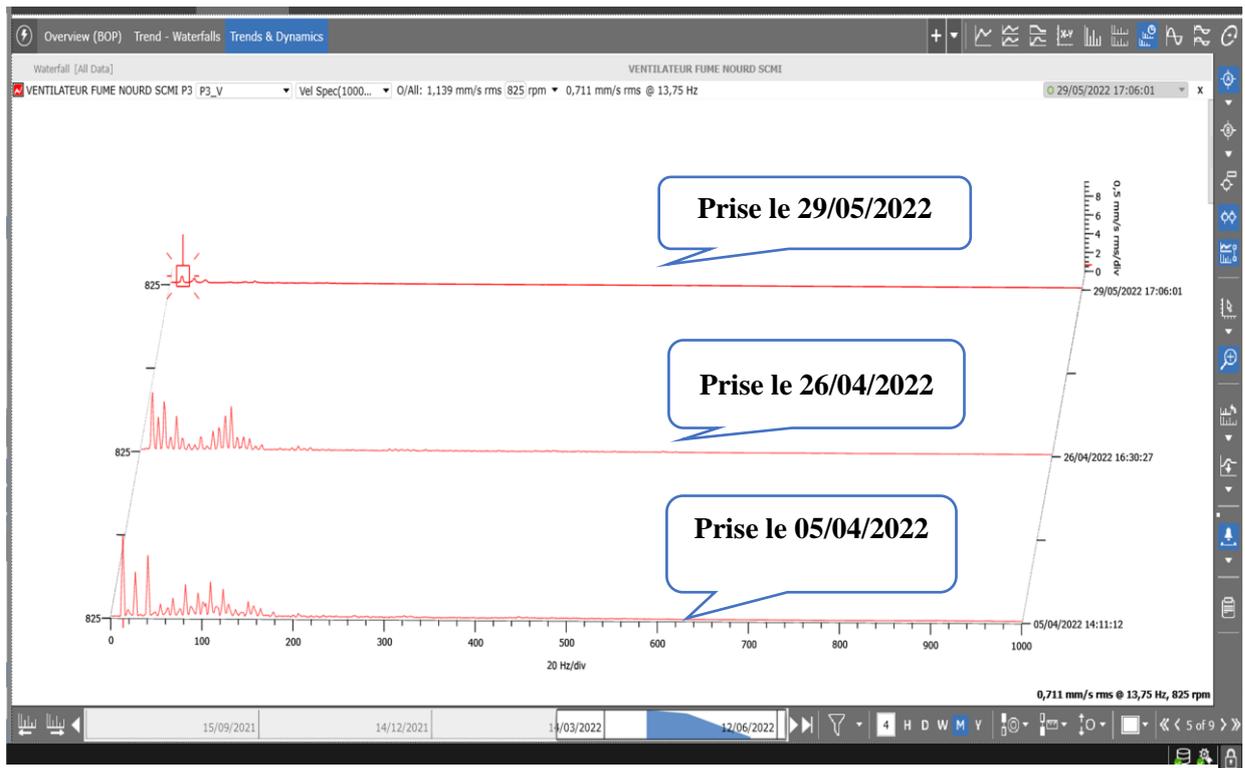


Figure 3.28 : Spectrale linéaire en cascade (moyen fréquence (0-1000) Hz) prise sur le palier N°3 de la turbine en directions verticale.

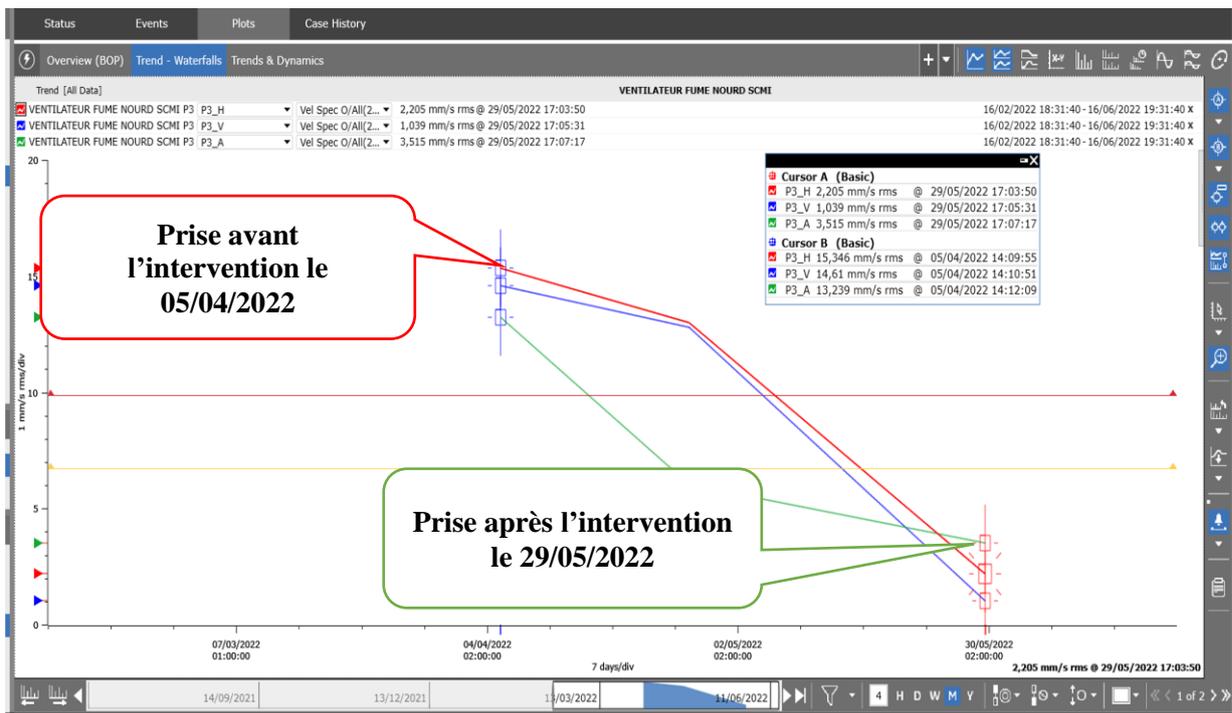


Figure 3.29 Courbe de tendance sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en vitesse « mm/s ».

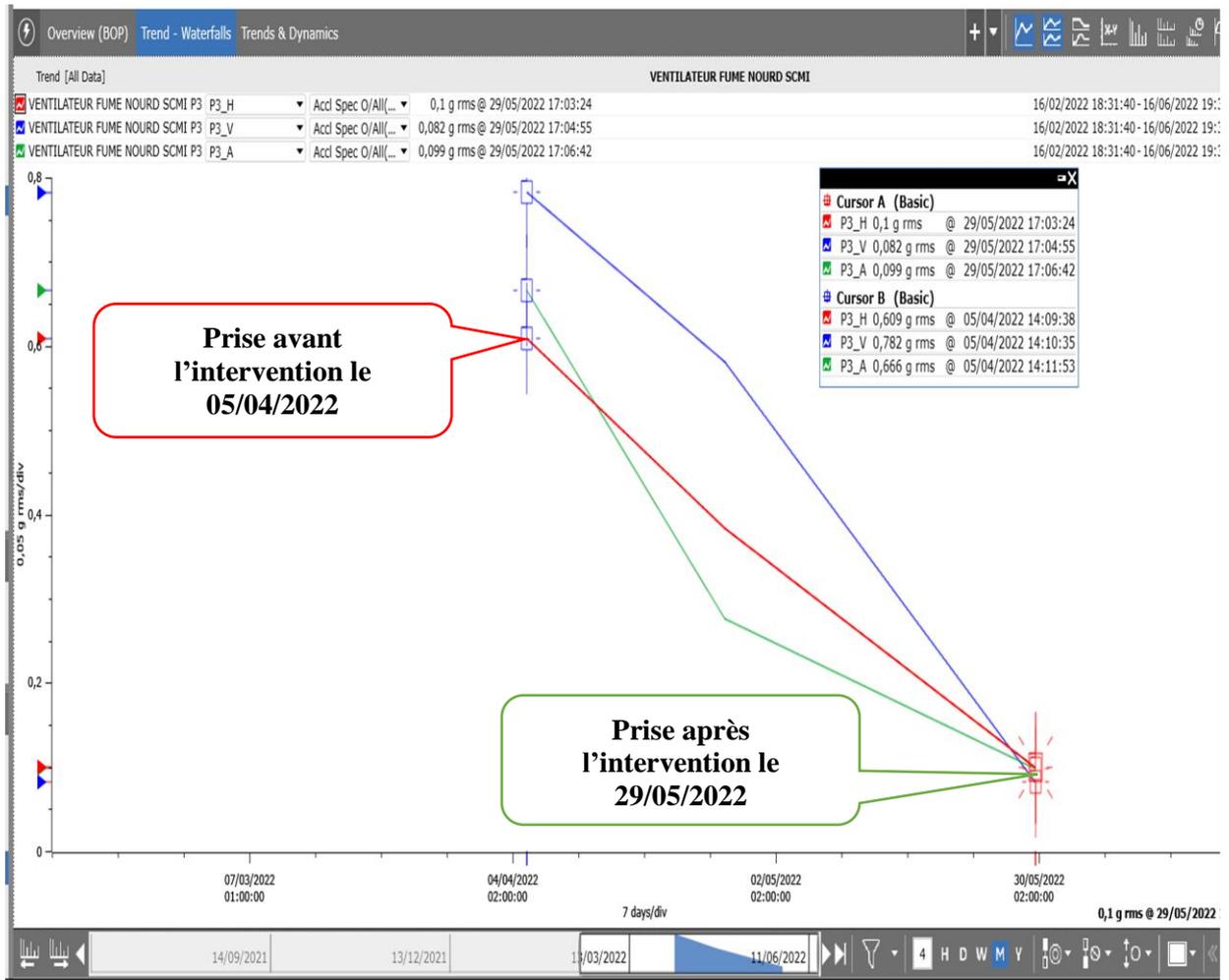


Figure 3.30 Courbe de tendance sur le palier N°3 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en accélération «g ».

Analyse spectrale :

• Sur le palier N° 4 :

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

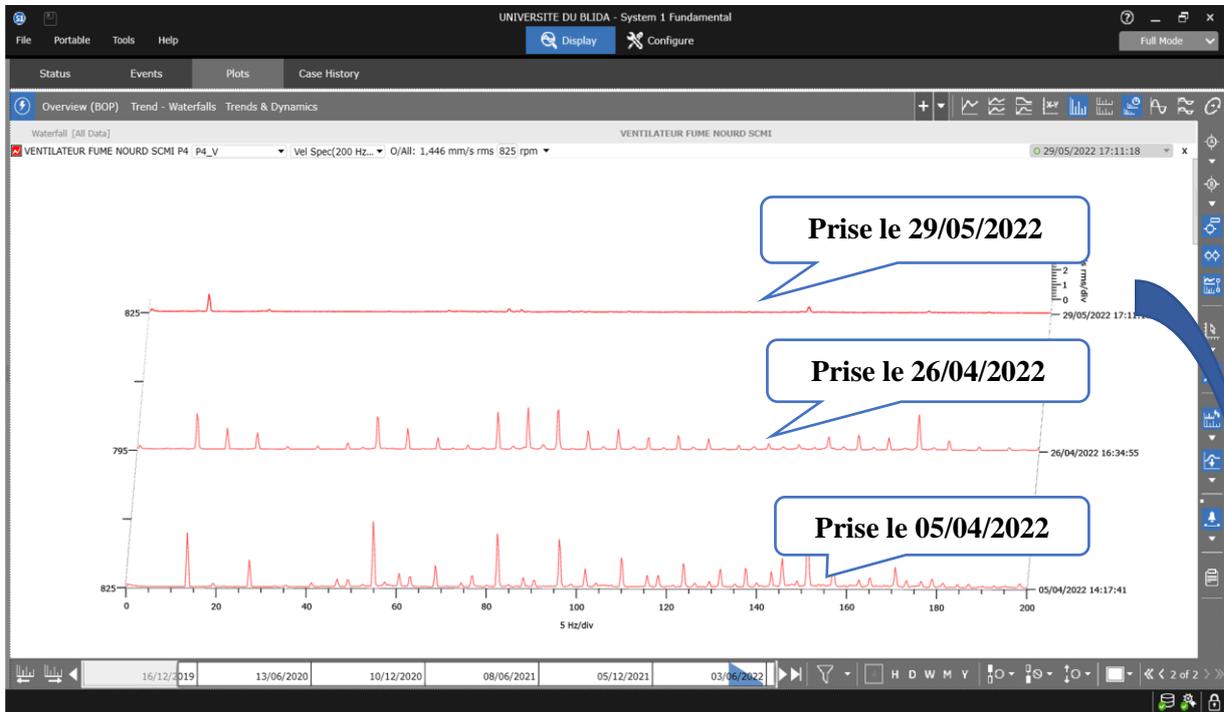


Figure 3.31 Spectrale linéaire en cascade (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°4 de la turbine en directions verticale.

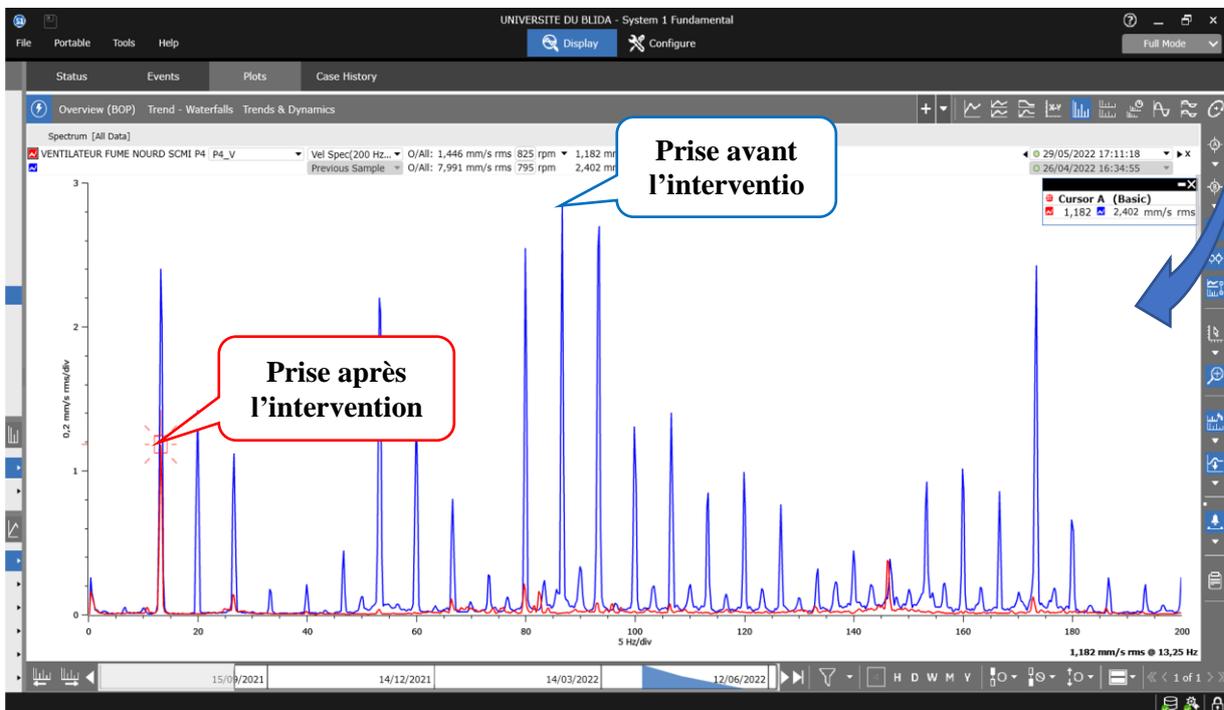


Figure 3.32 Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°04, démontre la disparition du choc.

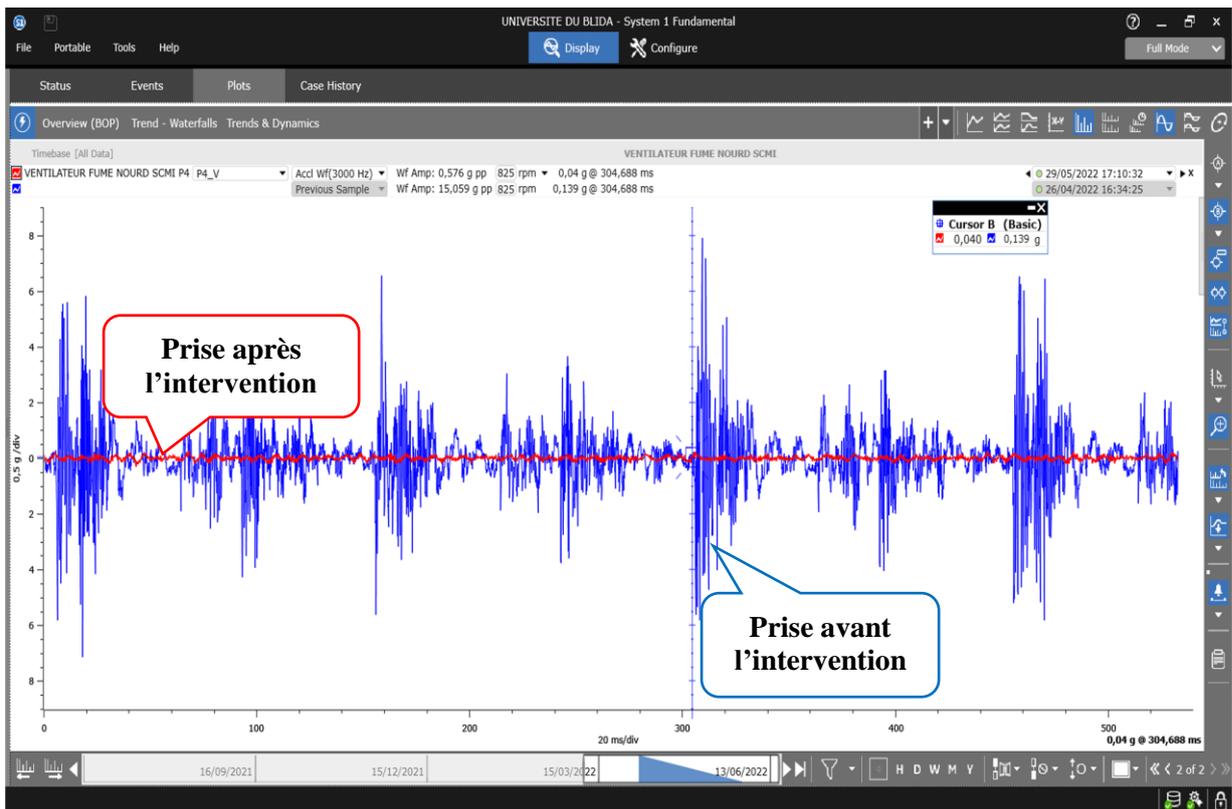


Figure 3.33 Spectrale temporaires superposé prise sur le palier N°4 dans la direction verticale, démontre la disparition de défaut de roulement (l'écaillage de la bague



Figure 3.34 Spectrale logarithmique superposé prise sur le palier N°4, démontre la disparition du défaut roulement sur lui après l'intervention réalisé.

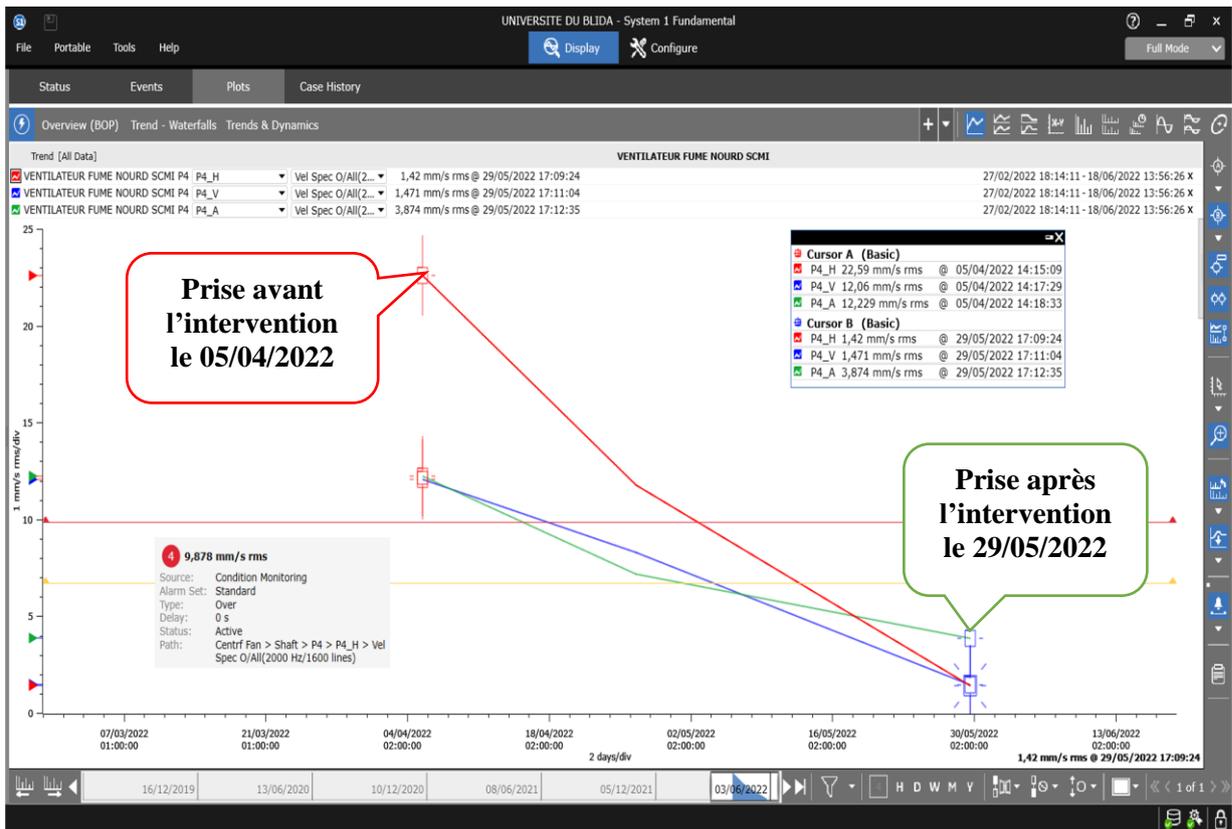


Figure 3.35 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en vitesse « mm/s ».

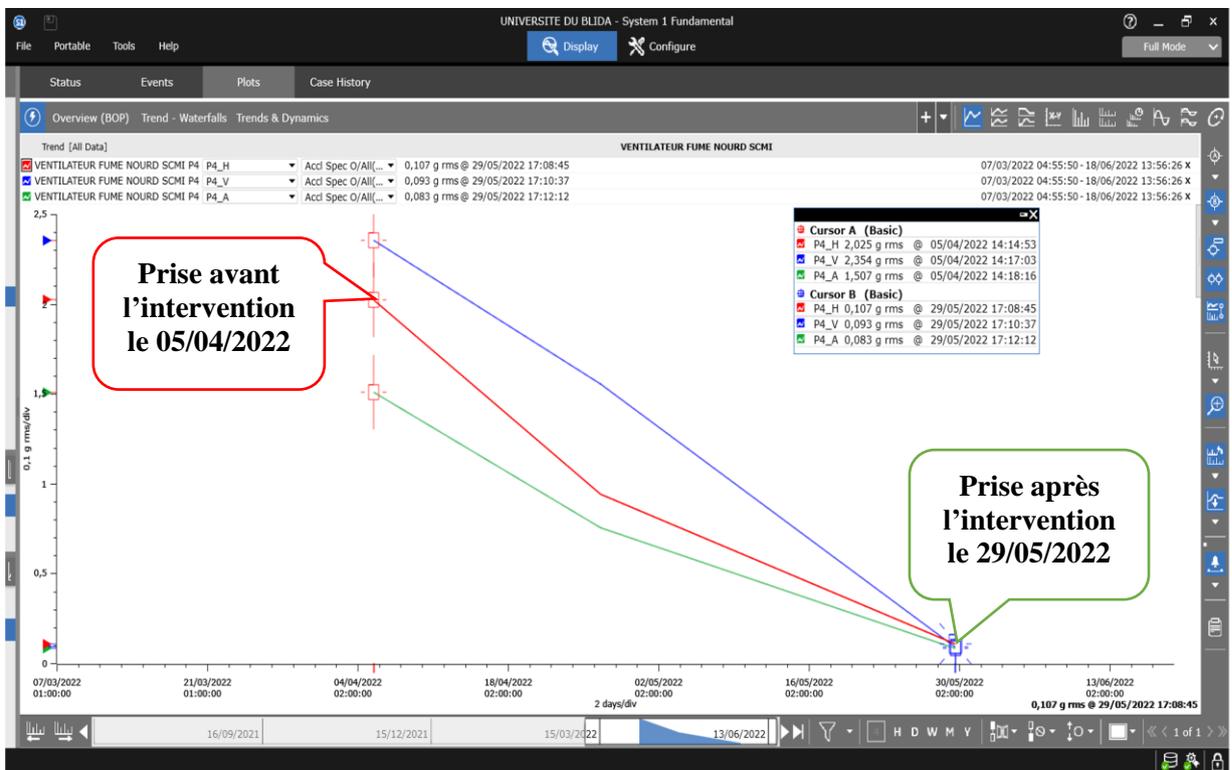


Figure 3.36 Courbe de tendance sur le palier N°4 de la turbine en trois directions (H, V, A), illustrant le décroissantes du niveau vibratoire en accélération « g ».

Résultats d'analyse

Après l'intervention réalisée sur le ventilateur ; une nette diminution du niveau vibratoire en vitesse (**mm/s**) et en accélération (**g**) sur tous les paliers du ventilateur ou il s'inscrit dans le domaine de **l'admissible et bon** faisant référence aux normes vibratoires des machine tournantes **ISO10816-63**.

3.8. Conclusion

L'analyse spectrale de ces mesures nous a permis de constater la **disparition** de tous les défauts signalés précédemment et n'a révélé **aucune anomalie** susceptible d'être citée, mais à part un léger défaut sur moteur d'une intensité admissible.

Chapitre 4 : Modélisation par ANSYS

4.1. Introduction [20]

ANSYS est un logiciel de simulation numérique leader dans son utilisation dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à la simulation : des traitements géométriques, maillages, résolution, le traitement de résultats et optimisation des données. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides, les structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation des systèmes et circuits.

Les exploitants du logiciel ANSYS sont issus de tous les domaines industriels tel que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de service et de consommation.

4.2. Analyse modale [21]

Tout vibre ! C'est une réalité de la vie, l'analyse modale est la technique utilisée pour caractériser le comportement dynamique des structures.

Elle donne un aperçu général sur les limites de réponses d'un système ; à titre d'exemple, une réponse globale à la connaissance des limites de réponse du système tel que le moment et l'amplitude d'un déplacement maximal ou l'amplitude et fréquence d'une charge appliquée. Chaque objet a une fréquence naturelle ou de résonance à laquelle il peut vibrer. Cette fréquence est également la fréquence à laquelle l'objet permet le transfert d'énergie d'une forme à une autre «ici de la vibration à la cinétique » avec une perte minimale. Lorsque la fréquence est proche de la fréquence de résonance, l'amplitude de la réponse du système augmente de façon asymptotique à l'infini. Cela dit, la fréquence à laquelle l'amplitude passe à l'infini est calculée avec l'analyse modale.

L'objectif de l'analyse modale

- Définir les fréquences propres et les formes de mode du système.
- Vérifier les connexions entre les composants, s'il existe des modes rigides dans le système.
- Déterminer si les contraintes sont correctes dans le système.
- Déterminer le comportement du système sous des charges dynamiques.

4.2.1. Modélisation de l'arbre (Annexe)

On a établi une analyse modale numérique de l'arbre du ventilateur à travers une conception et simulation numérique du système avec le logiciel ANSYS, puis nous avons déterminé les modes et fréquences propre du système. La simulation est faite sur l'arbre sans turbine :

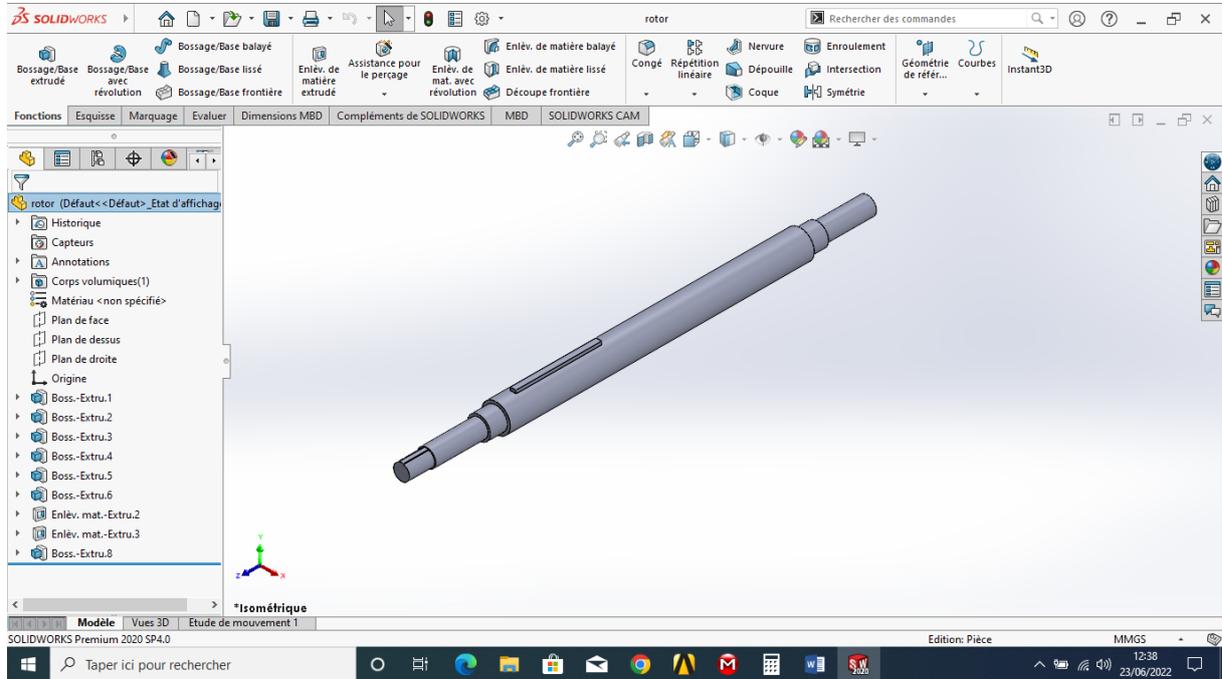


Figure 4.1 l'arbre en SolidWorks.

Tableau 4.1 : Modélisation et caractéristiques physiques de l'arbre

Matériaux	Acier standard
Module de Young	210000 N/mm²
Masse	1274,6 kg
Volume	0,16237 m³
Résistance élastique	235 MPa

4.2.2 Résultats et interprétation :

Analyse modale de l'arbre : à vitesse de rotation = 0 tr/min

Tableau 4.2 : Fréquence propre de l'arbre.

En mode stationnaire, les fréquences propres de l'arbre, ont été déterminées comme suit :

N° du mode	1	2	3	4	5	6
Fréquence (HZ)	105,03	106,06	142,82	297,1	297,75	576,63

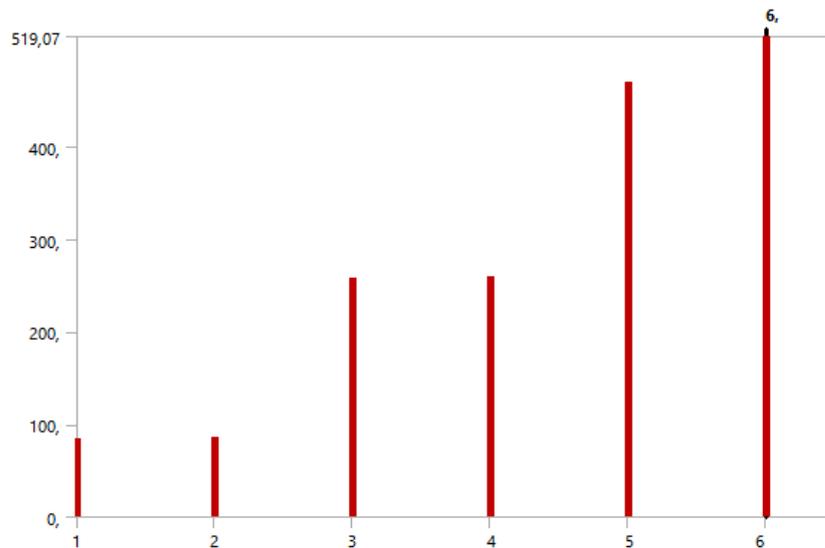


Figure 4.2 Graphe fréquence propre de l'arbre.

Ces déformations de Von mises, sont analysées en mode fréquences propres comme mentionnées dans le tableau précédent et illustré dans les figures suivantes :

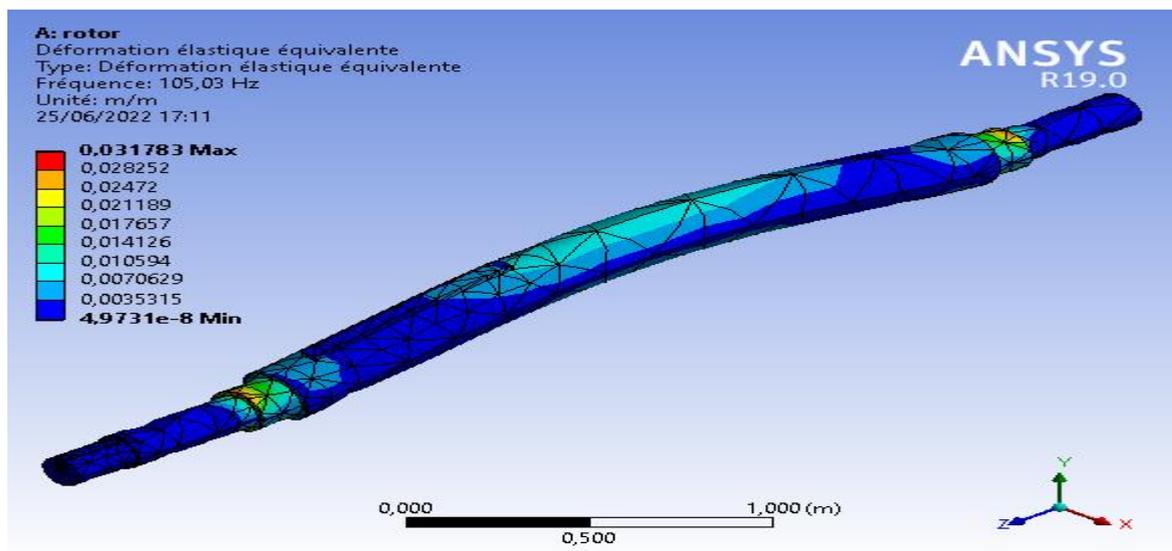


Figure 4.3 mode 1 la déformation de Von mises, analysée à vitesse de rotation = 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_1 = 2 \times \pi \times 105.03 = 659,59 rad/s$
- Contrainte minimale SMN= 5272,5 Pa
- Contrainte maximale SMX= 6,3367 GPa

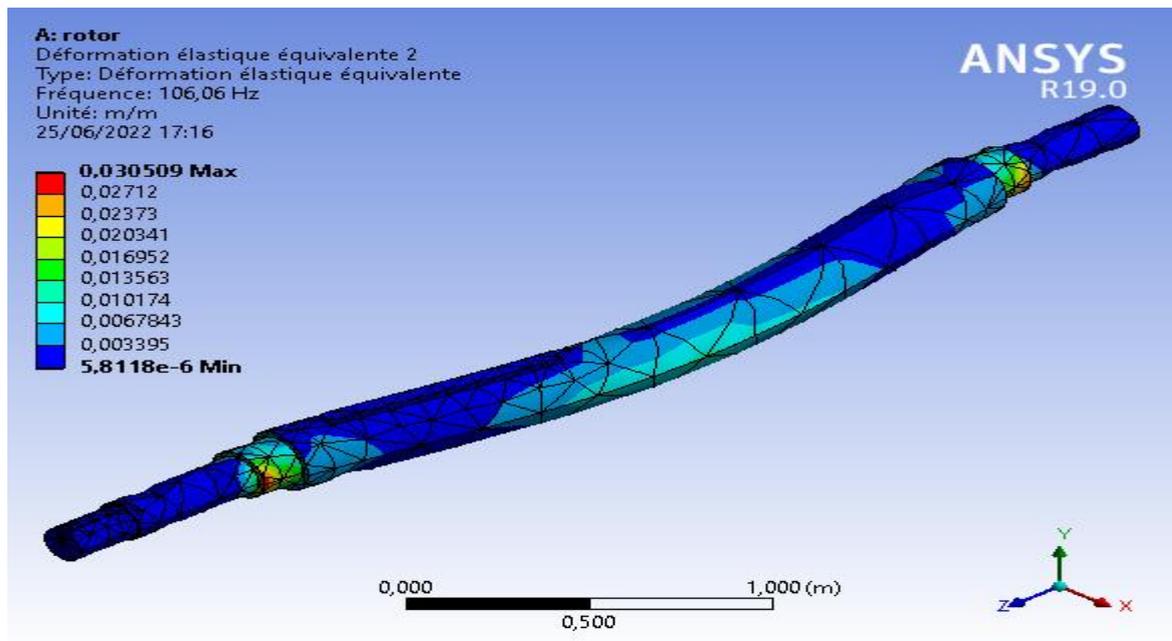


Figure 4.4 mode 2 déformation de Von mises à vitesse de rotation = 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_2 = 2 \times \pi \times 106.06 = 666,06 \text{ rad/s}$
- Contrainte minimale SMN= 0,32813 MPa
- Contrainte maximale SMX= 6,0913GPa

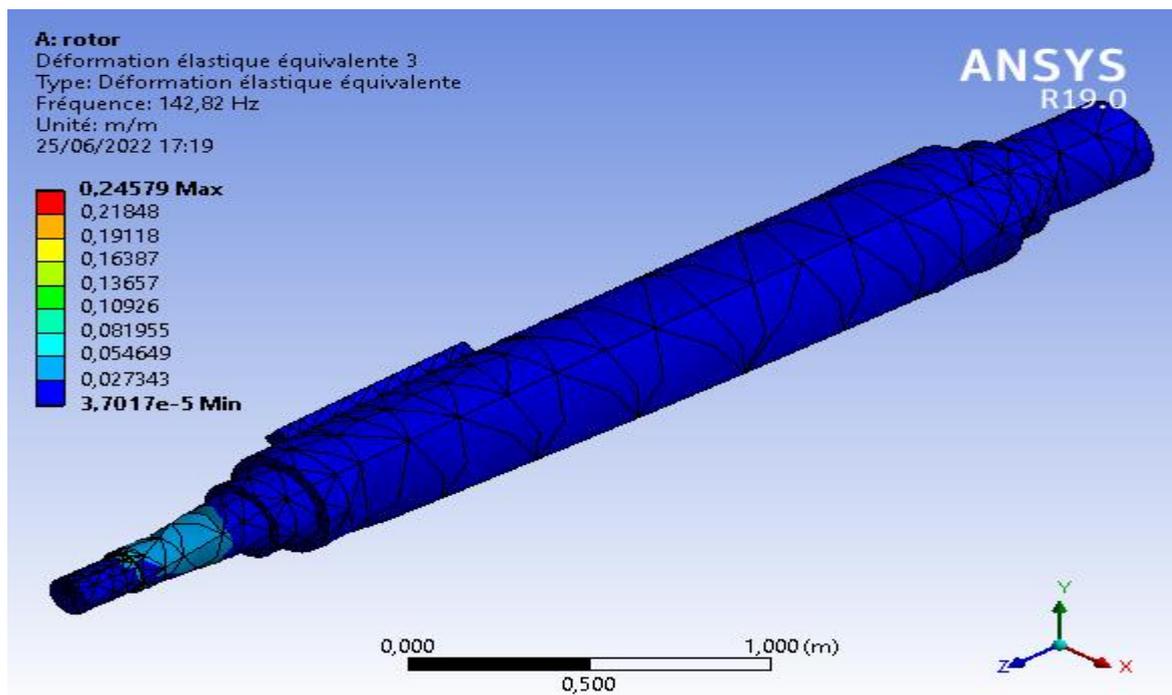


Figure 4.5 mode 3 déformation de Von mises à vitesse de rotation = 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_3 = 2 \times \pi \times 142.82 = 896,91 \text{ rad/s}$
- Contrainte minimale SMN= 2,8798 MPa
- Contrainte maximale SMX= 36,201GPa

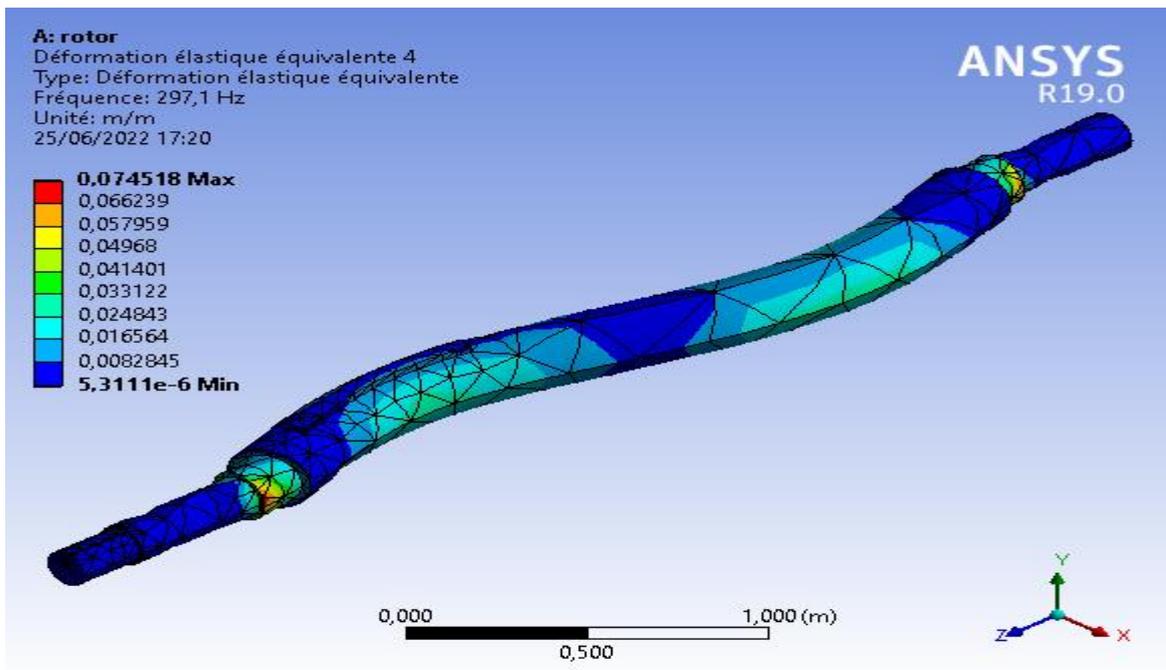


Figure 4.6 mode 4 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_4 = 2 \times \pi \times 297.1 = 1\,865,79 \text{ rad/s}$
- Contrainte minimale SMN= 0,51892 MPa
- Contrainte maximale SMX= 14,832 GPa

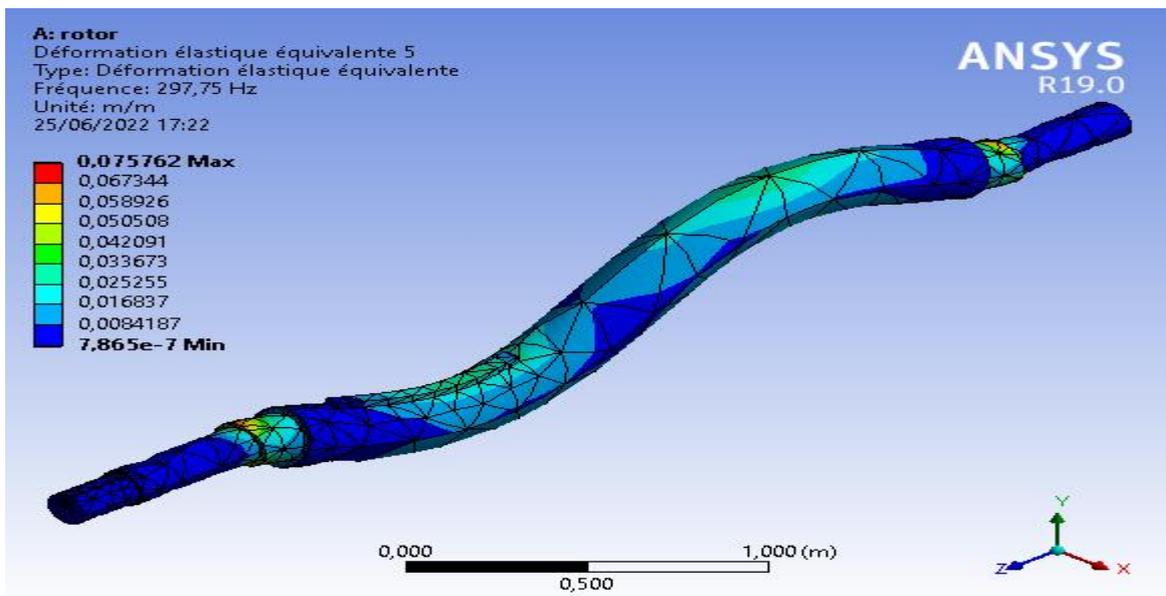


Figure 4.7 mode 5 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_5 = 2 \times \pi \times 297.75 = 1\,869,87 \text{ rad/s}$
- Contrainte minimale SMN= 77726 Pa
- Contrainte maximale SMX= 15,116 GPa

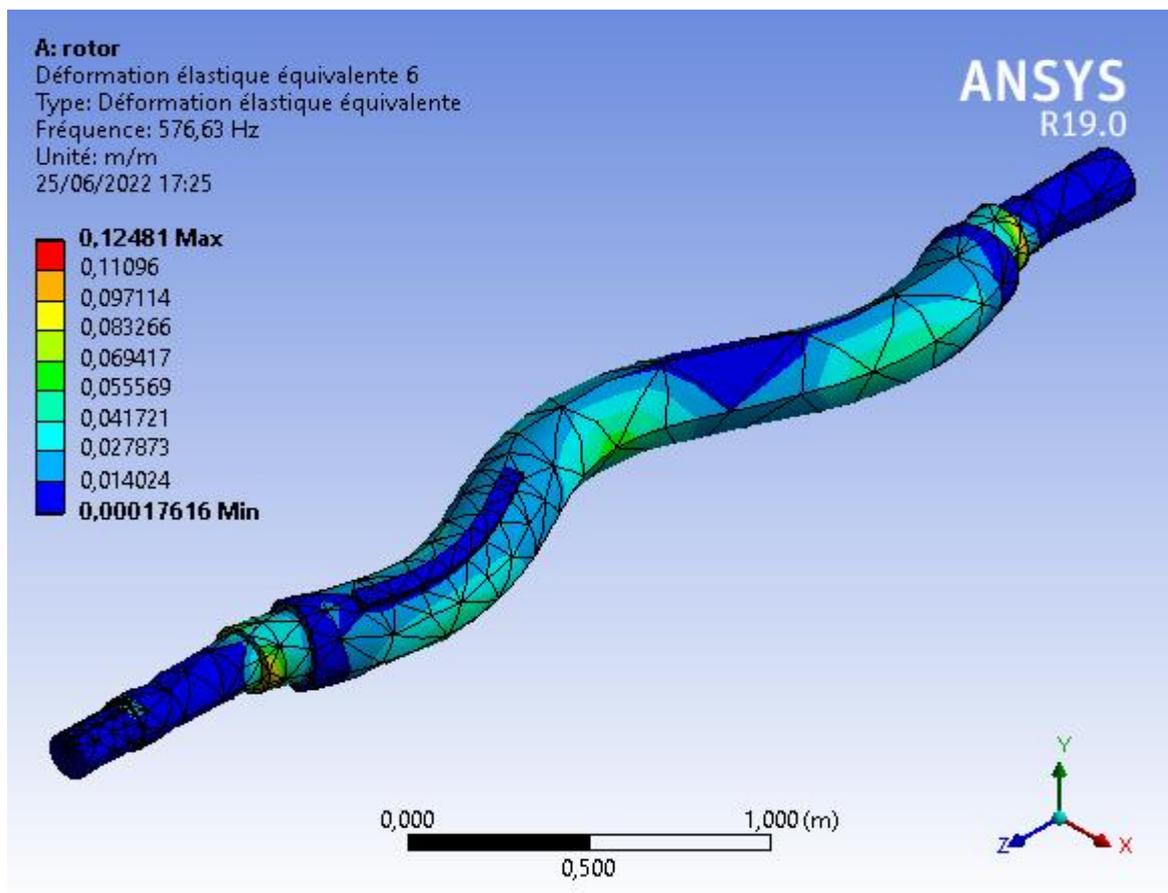


Figure 4.8 mode 6 de déformation Von mises à vitesse de rotation 0 tr/min.

- La pulsation propre $\omega_6 = 2 \times \pi \times 576.63 = 3\,621,24 \text{ rad/s}$
- Contrainte minimale SMN= 9,6541 MPa
- Contrainte maximale SMX= 24,914 GPa

4.3. Analyse structurale statique [22]

Une analyse structurale détermine les déplacements, les contraintes, les déformations et les forces de structures. Les conditions de charge et de réponse sont supposées stables, c'est-à-dire que les charges et la réponse de la structure sont supposées à variations douces et en fonction du temps. Une charge structurale statique peut être effectuée à l'aide du solveur ANSYS, Samcef ou ABAQUS. Les types de chargements qui peuvent être appliqués dans une analyse statique intègrent

- Les forces et pressions appliquées de l'extérieur.
- Forces inertielles en régime permanent (telle que la gravité ou la vitesse de rotation).
- Déplacements imposés (non nuls).
- Températures (pour la déformation thermique).

4.3.1. Modélisation de l'arbre et la turbine (Annexe)

Après avoir dessiné le ventilateur avec SolidWorks (arbre. turbine)

On a établi une analyse structurale à travers une conception et la simulation numérique du système par ANSYS, pour déterminer le déplacement, les contraintes de Von mises et le coefficient de sécurité.

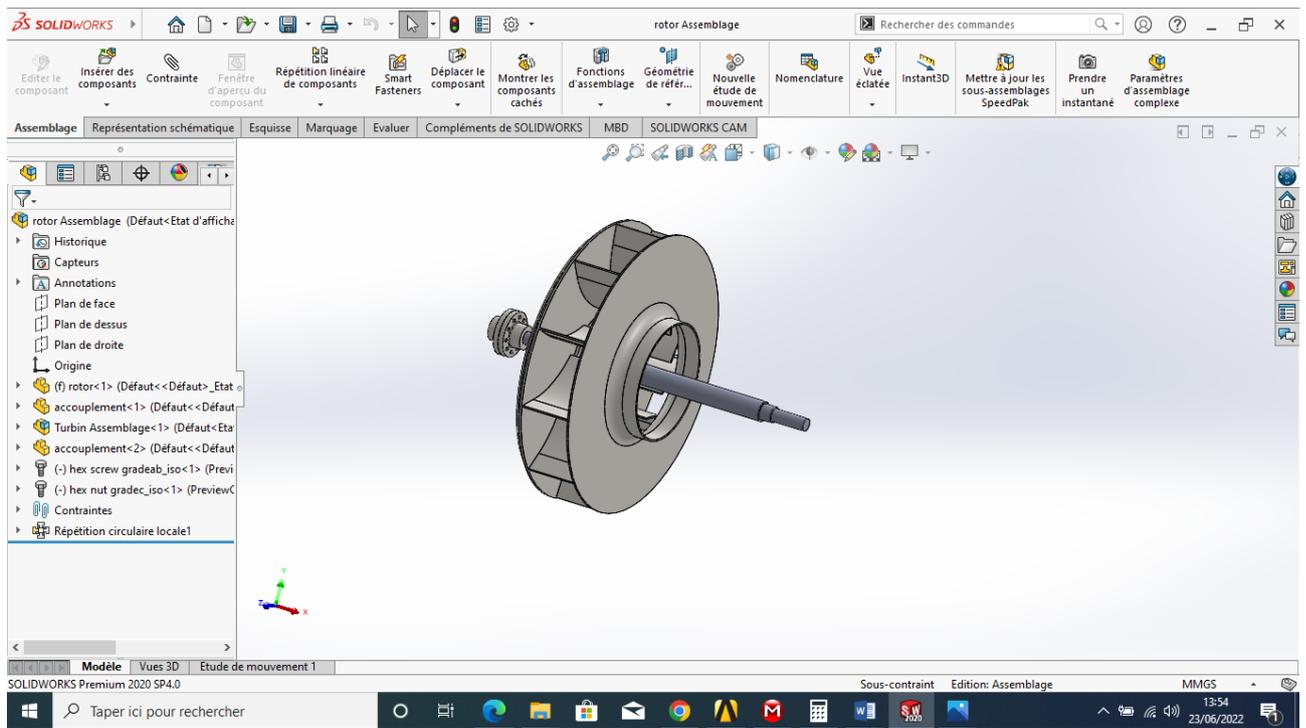


Figure 4.9 l’arbre et turbin en SolidWorks.

On a modélisé l’arbre et turbin, les caractéristiques physiques de l’arbresignalé dans le tableau :

Tableau 4.3 : Propriété physique de l’arbre et turbin.

Matériaux	Acier standard
Module de Young	210000 N/mm²
Masse	13727 kg
Volume	1,7486 m³
Temperature de fusion	1400-1500 °C
Résistance élastique	235 MPa

4.3.2. Résultat et interprétation :

Analyse structure statique de l'arbre et turbin : Avec vitesse de rotation = 825 tr/min

- les deux paliers :

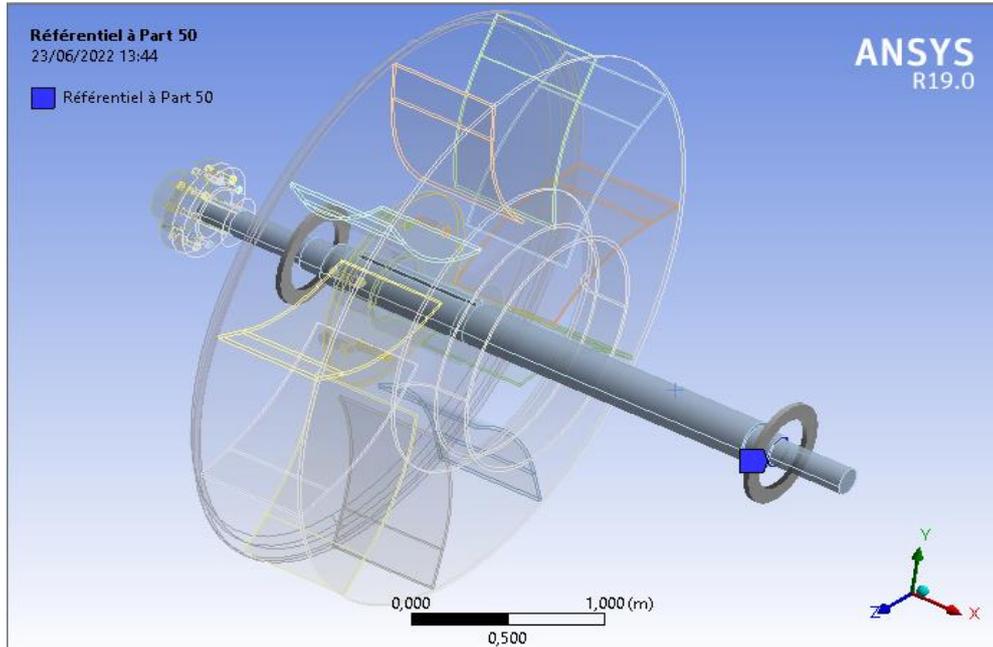


Figure 4.10 Arbre-Turbine avec paliers.

- Condition thermique (température 385 c) :

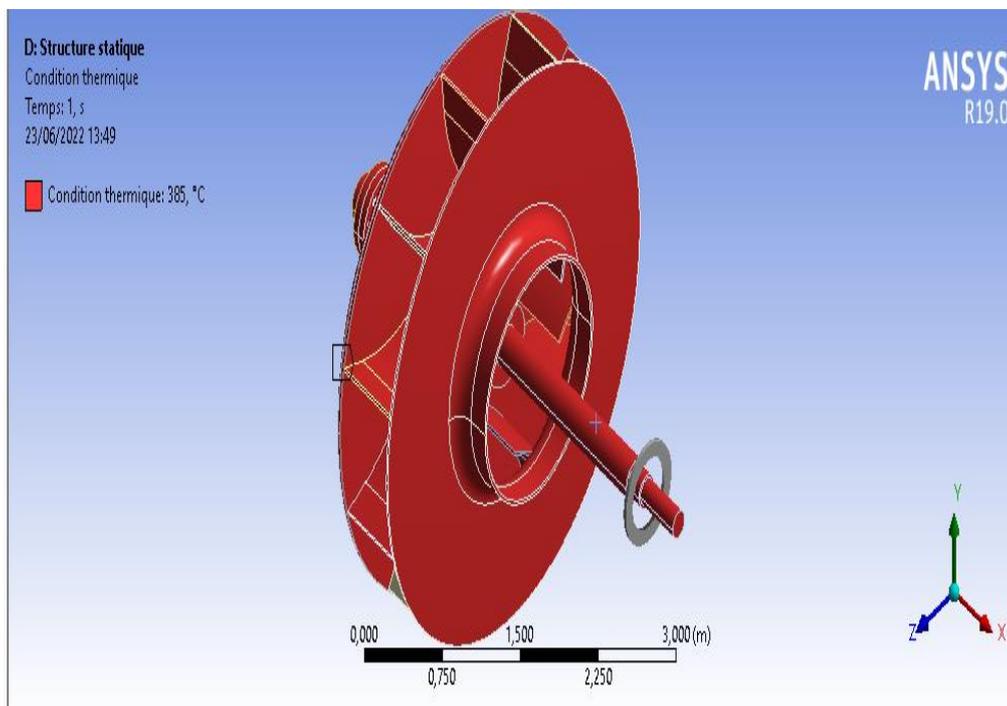


Figure 4.11 Température 385 c.

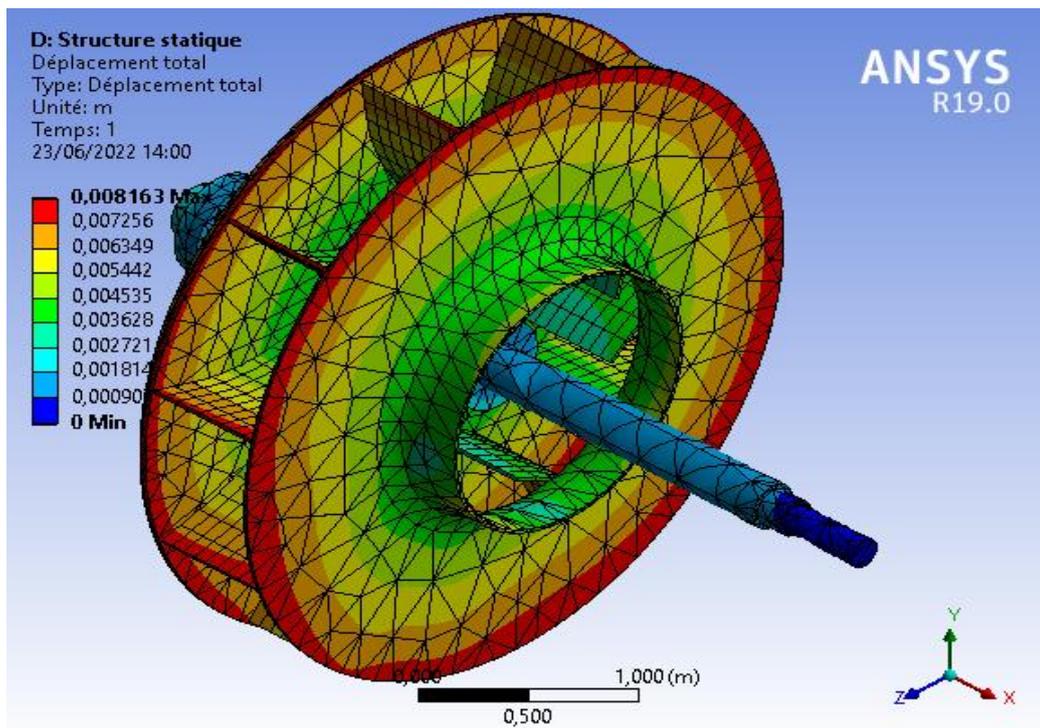
Résultat :

Figure 4.12 déplacement total a vitesse de rotation 825 tr/min.

Résultat est interprétation :

Nous remarquons que la vitesse est maximale sur la circonférence extérieure de la turbine.

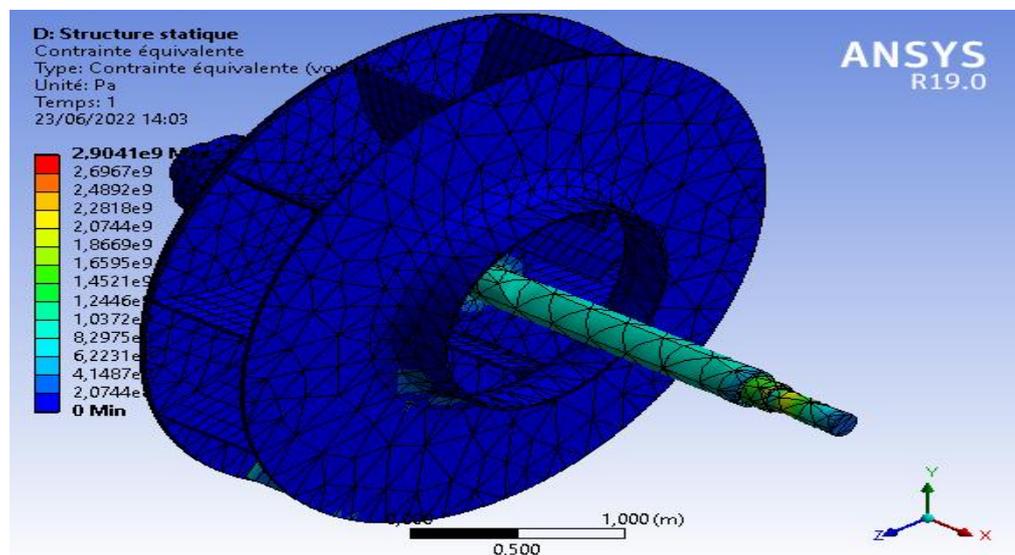


Figure 4.13 contrainte équivalente Von mises.

- Contrainte minimale SMN= 0 Pa
- Contrainte maximale SMX= 6,2791 GPa

Résultat est interprétation :

D'après la figure ci-dessus, la contrainte est maximale sur la zone de contact Turbine-Arbre.

4.4. Conclusion

L'analyse modale et structurale de l'arbre et Arbre –Turbine nous a permis de connaître, les valeurs et les modes propres, le champ de déplacements et de contraintes.

Conclusion générale

Les ventilateurs process centrifuges conçus pour l'industrie du ciment sont le produit d'une expérience unique à l'échelle mondiale, et d'investissements continus dans la recherche.

Chaque ventilateur acheté par une cimenterie, doit être conçu sur mesure selon des conceptions qui sont confirmées par une longue expérience terrain et soutenues par des demandes d'amélioration continue.

Le ventilateur de fumées VF2 de la cimenterie de Mefath pose un sérieux problème de vibrations telles que d'importantes pertes de production sont occasionnées par les divers déclenchements intempestifs du VF2 par vibrations max, les arrêts par échauffement des paliers et pour réparations d'avaries mécaniques sur les organes de celui-ci.

Notre étude a porté sur le terrain en des mesures de vibrations avec un accéléromètre, le diagnostic physique et analyse de l'environnement de travail du ventilateur entre autre l'aération, l'encombrement et la position sur son châssis et massif en béton. Puis nous avons compulsé les dossiers techniques et historiques de la machine avec des analyses fines des données chiffrées et graphiques du comportement du VF2.

Cependant, le tracking Tools instauré au niveau de la salle de commande à distance câblée et gérée par la supervision contrôle de dernière génération le STEP 7. Par ailleurs toutes les données d'entrées, de sortie et consignes de marche sont gérées par le système **expert ADPT**, collecteur, enregistreur en line de données à quatre canaux, piloté par le progiciel **WINCC** avec une connective de l'application système one (1) "**commtest VB8 Bentley Nevada**"; un package formant un monitoring SCADA "**Supervisory and data acquisition**". Ainsi, tous les défauts liés au ventilateur parviennent à la salle de commande sous un verrouillage à trois niveaux d'alarme à savoir :

- Sonore, attire l'attention de l'opérateur
- Clignotante, max1, l'opérateur doit faire des actions de réajustement ou un réglage des paramètres
- Sonore, clignotante avec un délai de 30 secondes, si l'opérateur n'arrête pas la machine par le biais de l'accès en mode supervision individuel ou manuel, le niveau supérieur du système expert ADAPT arrête intempestivement la machine pour éviter tout éventuel endommagement qui en général est très onéreux.

Il en est ressorti de notre étude de cas les recommandations suivantes :

Il est possible d'analyser les graphes, l'énergie, la composition chimique et les différentes tailles des particules de matières et poussières pour concevoir des déflecteurs en mesure de modifier la trajectoire de ces particules pour minimiser leurs effets d'abrasion.

Aussi, il est possible de concevoir des mécanismes de nettoyage visant à éliminer les dépôts de poussière de manière très efficace. Afin de protéger la roue, l'arbre, la volute et le

boulonnage et, également badigeonner ces derniers d'un revêtement anti-usure sélectionné en fonction du degré d'abrasion que subie le ventilateur.

Par ailleurs, la solution idoine est, demander dès à l'achat au fabricant concepteur du ventilateur d'augmenter la rigidité des rotors pour limiter les vibrations dues aux phénomènes de colmatage et, pallier aux contraintes liées à la température qui génère de manière significative les effets de fatigue et rupture des liaisons mécaniques ainsi que les organes du ventilateur. Aussi, sélectionné des matériaux capables de résister à toutes les contraintes thermomécaniques élevées ; nous citons en exemple les matériaux composites.

Il y a lieu aussi, d'incorporer des arbres forgés conçus pour des environnements de température élevée en s'appuyant sur l'analyse des structures par la méthode des Éléments Finis pour optimiser la structure mécanique. Cela gagnerait à réduire les interventions, le coût de maintenance et les pertes de productions dues aux arrêts récurrents qui peuvent engendrer la dégradation prématurée des briques réfractaires qui protègent les viroles du four.

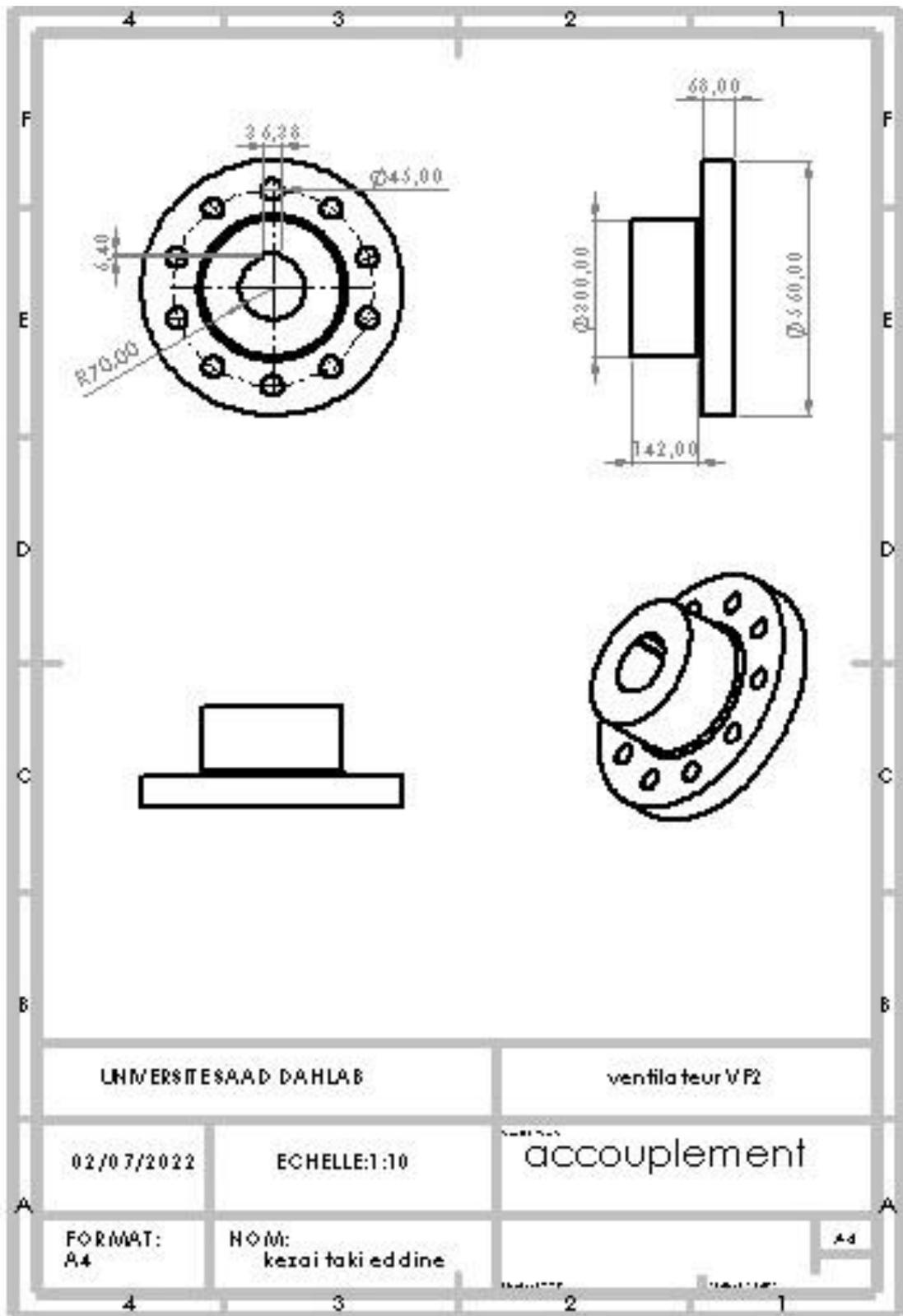
Également, opter pour des systèmes de lubrification des paliers à billes ou à rouleaux ainsi que les coussinets par des lubrifiants de qualité, tout comme appliquer des additifs performants de refroidissement.

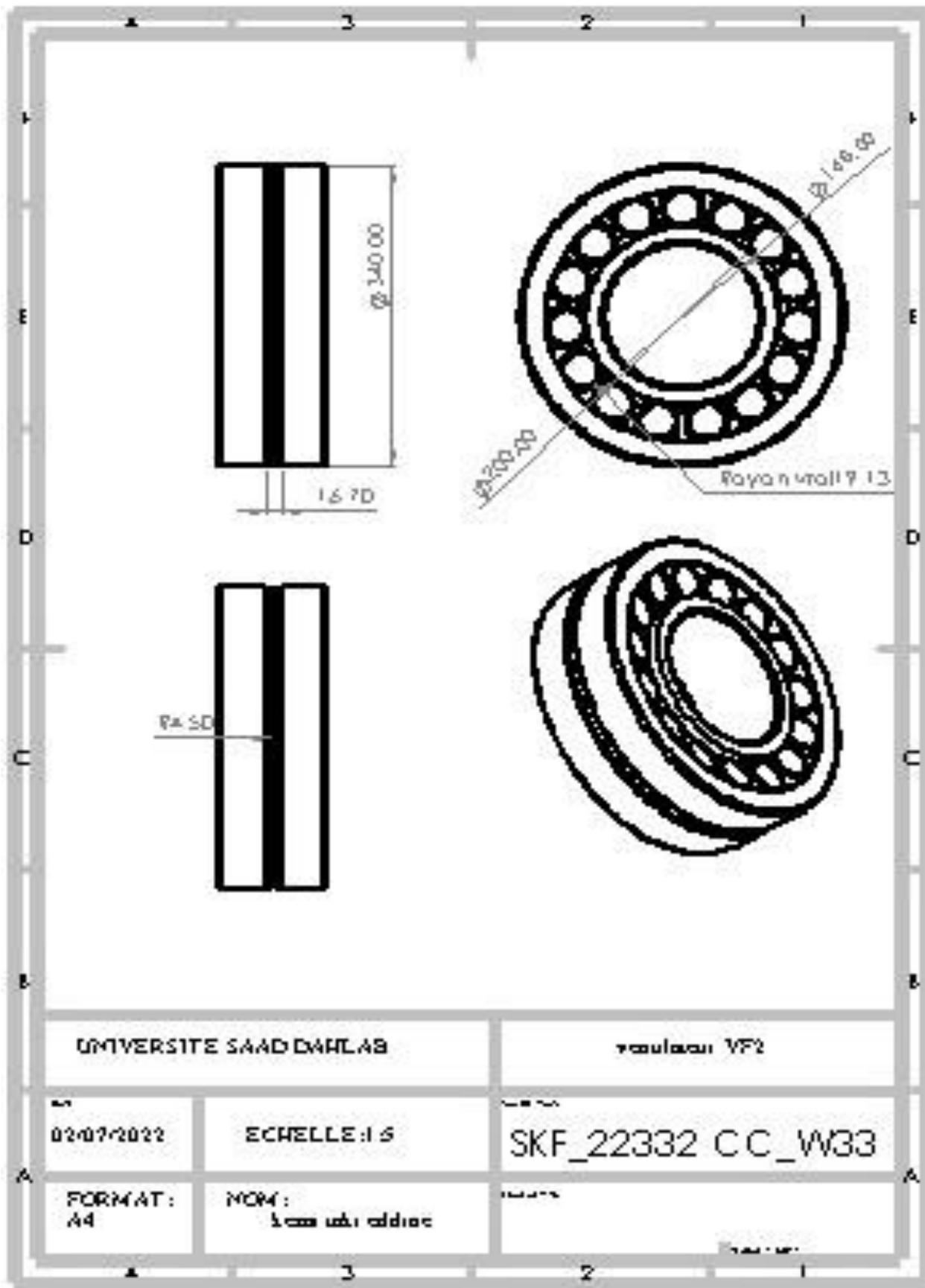
Références bibliographique

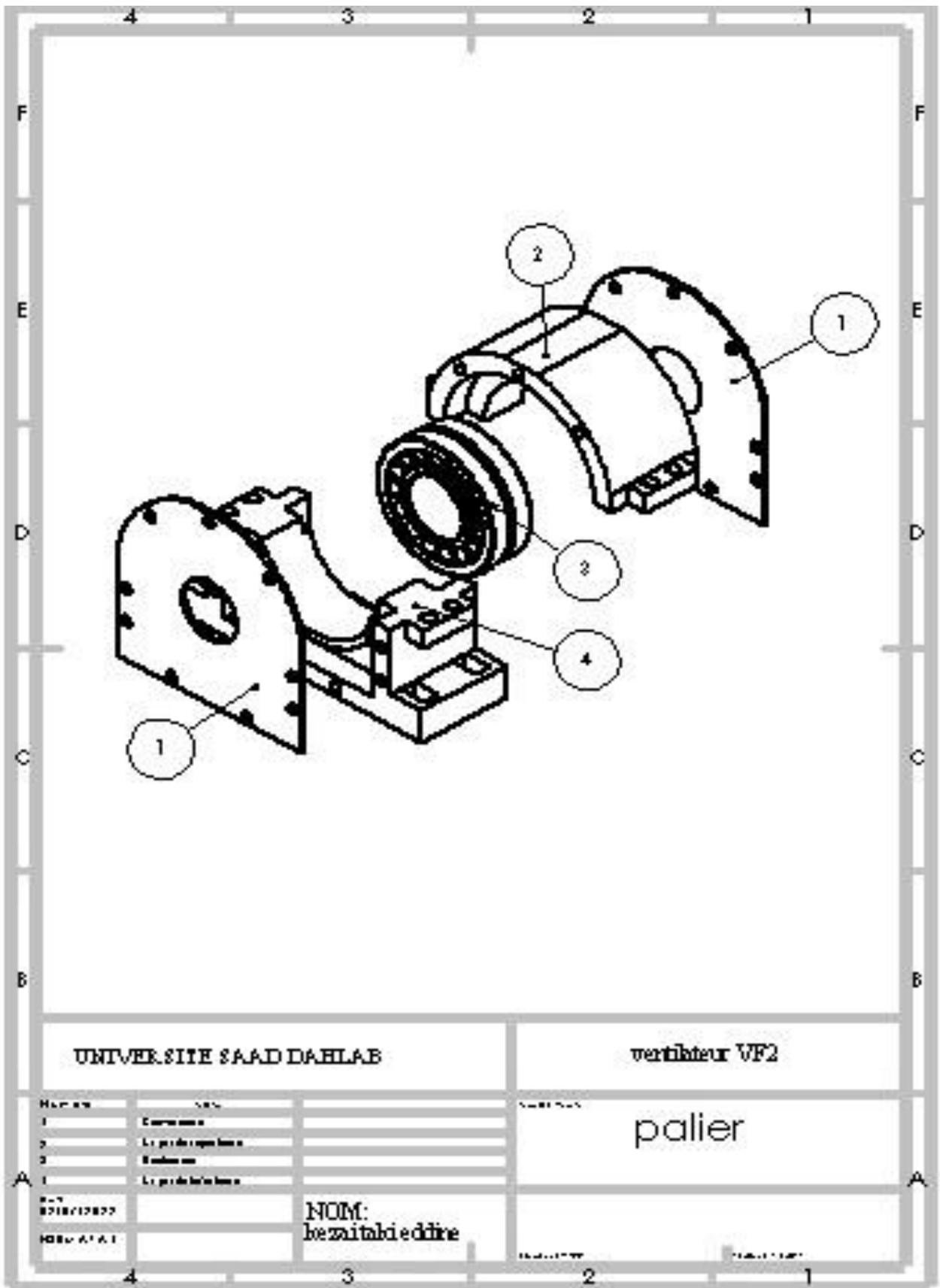
- [1] http://jltimin.free.fr/STI2D/doc/EE3_1/EE_3_2_Technologie_Regulation_Ventilateur_s.pdf?fbclid=IwAR0f9wLxZG4jEAUpY6Pz6vEYaEH2hnyhhy3r-WyVJS2PHMRfOCRwvDmuUaY
- [2] https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/composants-de-la-ventilation/ventilateurs/#Types_de_ventilateur
- [3] <https://www.cincinnati.com/centrifugal-fans-blowers.htm>
- [4] <https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/ventilateurs-industriels-machines-et-applications-738>
- [5] <http://www.ventilation-industrie.fr/1les-differentes-technologies-de-ventilateurs>
- [6] <https://www.skf.com/group/support/splash>
- [7] <https://www.flender.com/fr/Produits/Accouplements/Accouplement-%C3%A0-boulons- RUPEX/p/ATN03101>
- [8] <https://www.techno-science.net/definition/3186.html>
- [9] CHAIB RACHID, thèse de doctorat, Université de Mentouri de Constantine, « Contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire »
- [10] www.mobiuslstitute.com.
- [11] Alain Boulenger, Christian Pachaud, Aide-mémoire, surveillance des machines par analyses des vibrations, Edition Dunod
- [12] Z.Sari-Hassoun, A. Hadjoui, A. Hamidou, S. Bouzidi, « La maintenance prédictive pour les machines tournantes », Symposium International : Qualité et Maintenance au Service de l'Entreprise, Université de Tlemcen 2004.
- [13] SCHENCK, Vibration – Equilibrage sur site – Application à la maintenance conditionnelle, Lioux, France, 1994.
- [14] MOREL, JACQUES, vibration des machines et diagnostic de leur état mécanique, Eyrolles –Paris, 1992
- [15] <https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software-platform/visualisation-controle/qu-est-ce-qu-un-scada-supervisory-control-and-data-acquisition-copa-data/>
- [16] www.bakerhughesds.com
- [17] <https://www.telematic.com/Product/DRVbR/Model-780A-D2-Class-I-Division-2-CertifiedAccelerometer>
- [18] System 1 Machinery Management User Guide
- [19] <https://www.cadfem-an.com/produits/ansys.html>
- [20] <https://www.mechead.com/ansys-modal-analysis/>
- [21] Help ansys
- [22] Brevets de technicien supérieur «Maintenance industrielle chapitre 24 analyse vibratoire » session 2010, source : ministère de l'Éducation nationale.
- [23] Brüel & Kjør vibro (analyses vibratoire) .
- [24] <https://www.picomto.com/5-types-de-maintenance-a-connaître-absolument/>

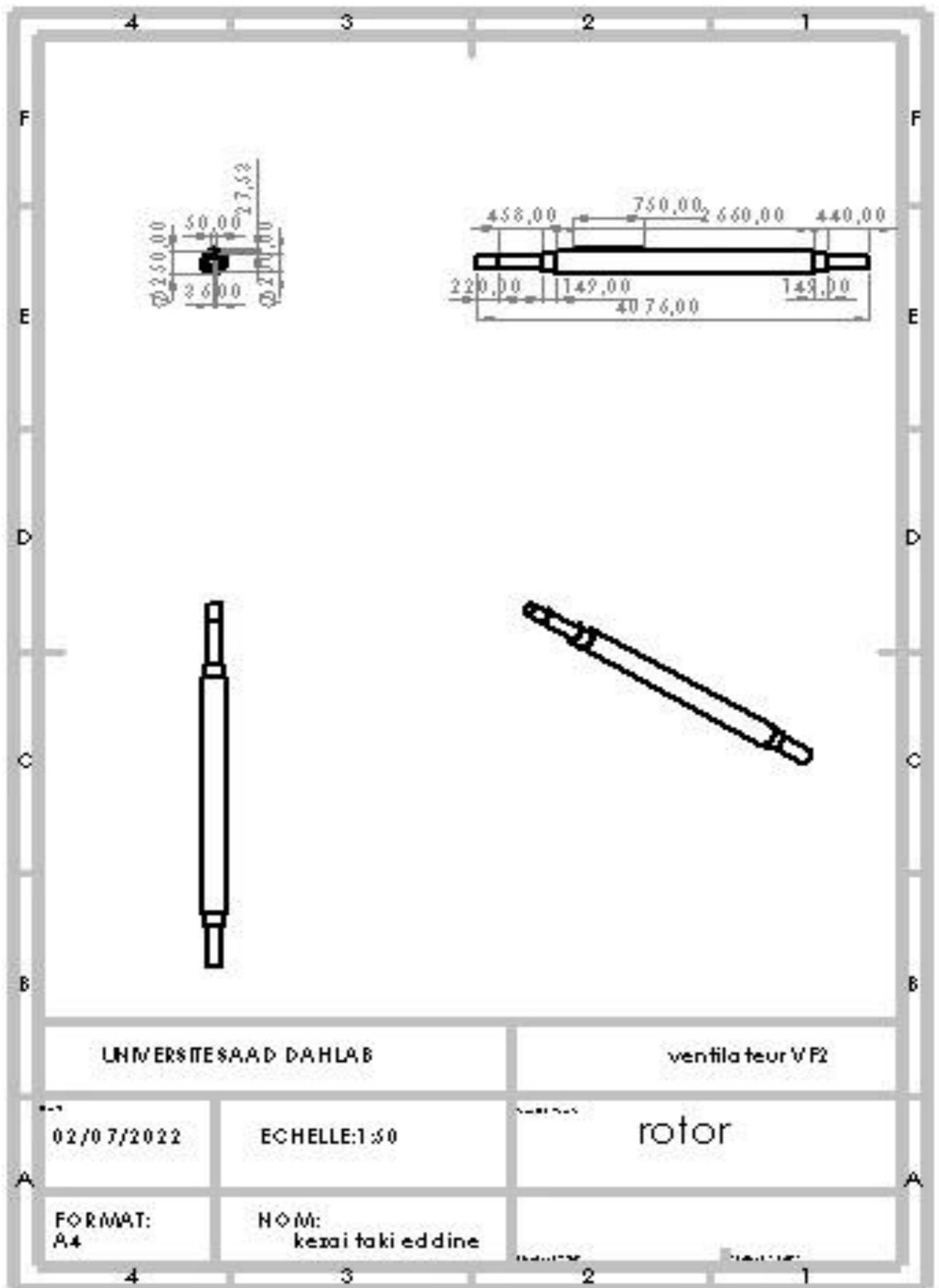
- [25] https://www.estrieplus.com/contenu-fabricant_produits_anticorrosion_paraffine-1555-40336.html
- [26] <http://tpmattitude.fr/methodes.html>
- [27] Philippe. E « Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes » Thèse de doctorat, Université de Reims, 2004, France.

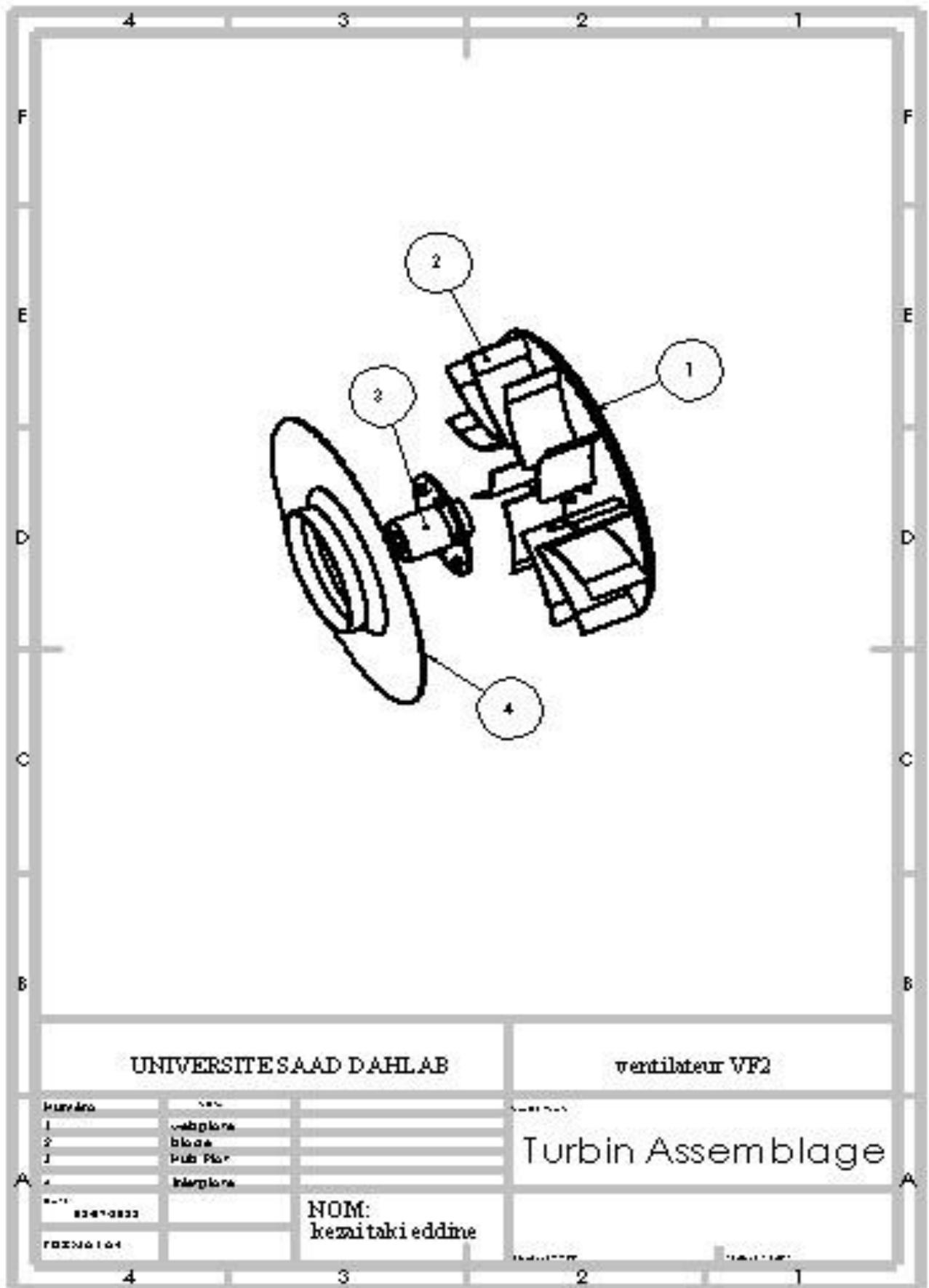
Annexe











UNIVERSITE SAAD DAHLAB

ventilateur VF2

Numéro	Description	Quantité
1	Assemblage	
2	bloca	
3	Disq	
4	Assemblage	

Date: 2024-08-22
 Matière: 104

Turbin Assemblage

NOM:
kezaitaki eddine