

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Génie Mécanique

Option : Mécatronique

THEME

Maintenance conditionnelle des machines tournantes
Par analyse vibratoire

Présenté par :

MANDI Abdellah

ZEMOUR Zakaria

Promoteur : Mr. CHELLIL Ahmed

Co-promoteur : Mr. CHIKH Nour eddine

Encadreur : Mr. LAOUBI abdelmalek

Promotion 2017- 2018

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots,

*Que je dédie ce modeste travail de fin d'étude à ma tendre mère et
à mon chère père qui nous a quitter récemment*

« Que dieu est pitié de lui »,

*qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite et m'ont éclairé le
chemin par leurs conseils judicieux.*

J'espère qu'un jour,

Je pourrai leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi,

Que dieu prête honneur et longue vie à ma très chère mère.

*Je dédie aussi ce travail à mes frères, mes sœurs et leurs très
chères maris qui m'ont soutenu jusqu'à la fin,*

*J'espère que ce travail soit un exemple pour vous de
persévérance, de courage et de générosité.*

*Je tiens à dédier ce travail à toute ma famille ainsi mes ami(e)s
et à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce
modeste travail.*

ZAKARIJA.

Dédicaces

Chaleureusement je dédie ce modeste travail :

*À la lumière de ma vie, mes chers
parents En témoignage pour leur amour et leur
sacrifice Sans limites qui je souhaite la bonne santé
et que
Dieu me les garde.*

À mes frères

À mes sœurs

À toute la famille

À tous mes amis sans exception

M.A.D. Abdallah.

Remercîments

Nous exprimons toute notre gratitude à Mr CHELLIL Ahmed, notre promoteur pour ses efforts, ses conseils, sa persévérance dans le suivi et ses encouragements qui nous ont permis de mener à bien ce projet.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à notre parrain de stage Mr LAOUBI Abdelmalek, pour ses conseils et orientations durant la période du stage, et pour l'intérêt et le soutien dont il a toujours fait preuve.

Nous remercions aussi très sincèrement, les membres du jury de s'être intéressé à ce travail et d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission d'examineurs pour juger la qualité de notre projet.

Nous adressons également nos remerciements, aux professeurs du département MECA7RONIQUE.

Un merci pudique à ma famille, surtout mes parents, pour leur soutien et leur bienveillance.

Merci à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.

Zakaria et Abdallah.

DEDICACES

REMERCEMENTS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

ABREVIATIONS

RESUME

Introduction Générale 1

CHAPITRE 1 : Présentation de l'unité de RAS-DJINET

1. Introduction	3
2. Historique	3
3. implantation	4
4. Caractéristiques techniques de la centrale	4
4.1. Générateur de vapeur	4
4.2. Description du GTA	5
4.2.1. Description de la turbine à vapeur	5
4.2.2. Introduction	5
4.2.3. Turbine à vapeur de la centrale	5
4.3. Alternateur	9
4.3.1. Description de l'alternateur	9
4.2.2. L'inducteur	9
4.3.3. L'induit	10
4.4. Poste d'eau	11
4.4.1. Condenseur	11
4.4.2. Bâche alimentaire	11
4.4.3. Les Pompes	12
4.5. Auxiliaires électrique	13
4.6. Transformateur principal d'évacuation d'énergie	13
4.7. Station de filtrage et de pompage d'eau de mer	14
4.8. Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer	14
4.8.1. Dessalement d'eau de mer	14
4.8.2. Déminéralisation	15

4.8.3. Electro chloration	15
5. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djenet	15
6. Conclusion	17

CHAPITRE 2 : Maintenance conditionnelle et Analyse vibratoire

1. Introduction	18
2. Définition de Maintenance	18
3. Objectif de maintenance	19
4. Philosophie de maintenance	20
5. Type de maintenance	21
5.1. Maintenance corrective	21
5.2. Maintenance préventive	21
5.2.1. Types de maintenance préventive	21
6. Techniques d'analyse	23
6.1. L'analyse d'huile	24
6.2. Thermographie infrarouge	25
6.3. Analyse vibratoire	25
6.3.1. Objectifs d'analyse vibratoire	26
7. Mécanique vibratoire	27
8. Définition d'une vibration	28
8.1. Les caractéristiques d'une vibration	28
8.1.1. Le déplacement	28
8.1.2. La vitesse	29
8.1.3. Accélération	29
8.1.4. Amplitude	29
8.1.5. Fréquence	29
8.2. Les type de vibrations	30
8.2.1. vibrations périodiques	30
8.2.2. Vibrations harmoniques (sinusoïdal pur)	30
8.2.3. Les vibrations aléatoires	31
8.2.4. Les vibrations transitoires	32
8.3. Applications des vibrations	33

8.3.1. Analyse structurale	34
8.3.2. Test de vibration	34
8.3.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts	34
8.3.4. Mesure des vibrations appliquées à l'homme	34
9. Origine des vibrations	35
9.1. Vibration des machines voisines	35
9.2. Vibration d'origine électrique	35
9.3. Résonance de la structure ou du rotor	35
10. Principale activité de l'analyse vibratoire	35
10.1. La surveillance	35
10.2. Le diagnostic	35
11. Mesure pratique d'une vibration	36
11.1. Chaîne de mesure vibratoire	36
11.2. Les capteur de vibration	36
11.2.1. Les proximètres	36
11.2.2. Vélocimétrie	37
11.2.3. Les accéléromètres	37
11.2.4. Analyseur portatif de vibration	40
12. Conclusion	41

CHAPITRE 3 : les défauts des machines tournantes

1. Introduction	42
2. Défaut de balourd	42
2.1. Les types de balourd	43
2.1.2. Balourd évolutif	44
2.2. Ambiguïtés de diagnostic	45
3. Défaut d'alignement	45
3.1. Les types de désalignement	46
3.3. Ambiguïtés de diagnostic	47
4. Défauts de roulements	48
5. Défaut de paliers lisses hydrodynamique	50
5.1. Instabilités de paliers	50

5.2. Types d'instabilités	51
5.3. Origine des instabilités	51
6. Défaut de Cavitation	51
6.1. Types de cavitation	52
7. Défauts d'excentricité	53

CHAPITRE 4 : Etude expérimentale

1. Introduction	55
2. But du travail	55
3. Les outils de mesures	55
3.1. Description du système VIBROCAM 4000	55
a) Fonctionnement « « ON-LINE » »	56
b) Fonctionnement « « OFF-LINE » »	57
3.2. Le VIBROTEST 60	57
3.3. Capteur de vibrations (Accéléromètre)	59
3.4. Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire « VIBROEXPERT CM-400 »	59
4. Partie manipulation	61
4.1. Les points de mesures	61
4.2. Matériel utilisé dans l'équilibrage	62
a) OROS séries 3.....	62
b) Avantage et Inconvénient de ce système	63
c) Logiciel associé avec OROS est le NVGate.....	63
4.3. Normes des vibrations	63
4.4. Les opérations et les résultats	64
5. Comportement vibratoire de GTA avant l'intervention	65
5.1. Démarrage 06/09/2016 sans masse d'essai (comme démarrage d'essai)	65
6. Comportement vibratoire de GTA après l'intervention	67
6.1. Démarrage 25/03/2018 avec 14 masses des deux cotés du corps MP en opposé	67
6.2. Démarrage 02/04/2018 avec une masse de correction	69
7. Conclusion	71

CONCLUSION GENERALE 72

ANNEXES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. 1. Les types des vibrations	33
Tableau 3. 1. Formules simplifiées pour le calcul des fréquences caractéristiques de défauts	50
Tableau 4. 1. Représentation des principaux avantages et inconvénients de l'OROS.....	63
Tableau 4. 2. Les valeurs d'alarme et déclenchement pour cette turbine	63
Tableau 4. 3. Classement des vibrations selon le danger d'après la norme ISO.	64
Tableau 4. 4. Les résultats de premières mesures à 80 MW.	65
Tableau 4. 5. Les mesures effectués sans masse d'essai.....	66
Tableau 4. 6. Les mesures effectués après les 14 masses a différents régimes	68
Tableau 4. 7. Les mesures effectués après les masses de correction a différents régimes	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1. Position de la centrale RAS DJINET.....	4
Figure 1. 2. Chaudière de la centrale de Cap Djinet	5
Figure 1. 3. Corps haut pression (HP).....	7
Figure 1. 4. Corps moyenne pression (MP)	8
Figure 1. 5. Corps à base pression (BP)	8
Figure 1. 6. Partie mobile de la machine (l'inducteur).....	9
Figure 1. 7. Partie fixe de l'alternateur (l'induit)	10
Figure 1. 8. Vue de bêche alimentaire de la centrale	12
Figure 1. 9. Transformateur principal	14
Figure 2. 1. Différentes philosophies de la maintenance	20
Figure 2. 2. Technique d'analyse	24
Figure 2. 3. Exemple de la thermographie infrarouge.....	25
Figure 2. 4. Mouvement d'une masse suspendue à un ressort	27
Figure 2. 5. Rotor Disque+ Arbre	28
Figure 2. 6. Représentation de déplacement, vitesse, l'accélération.....	30
Figure 2. 7. Vibration périodique	30
Figure 2. 8. Vibration harmonique	31
Figure 2. 9. Vibration apériodique	32
Figure 2. 10. Vibration transitoire.....	32
Figure 2. 11. Proximètre monte sur un palier.....	36
Figure 2. 12. Schéma de principe d'un velocimètre.....	37
Figure 2. 13. Schéma de principe d'un accéléromètre	38
Figure 2. 14. Mode de fixation de l'accéléromètre	38
Figure 2. 15. Points de mesure	39
Figure 2. 16. Les points de mesure pour les accéléromètres.....	40
Figure 3. 1. Présentation d'un balourd.....	42
Figure 3. 2. Différents types de balourd.....	43
Figure 3. 3. Défaut d'alignement	46
Figure 3. 4. Délignage parallèle.	46

Figure 3. 5. Délignage angulaire	47
Figure 3. 6. Roulement à billes.	48
Figure 3. 7. Géométrie de roulement.....	48
Figure 3. 8. Schéma du palier hydrodynamique.....	50
Figure 3. 9. Cavitation dans une pompe hydraulique.....	52
Figure 3. 10. Défauts d'excentricité statique et dynamique.....	53
Figure 4. 1. Organigramme de VIBROCAM 4000.....	56
Figure 4. 2. Photo de système de control ON-LINE	57
Figure 4. 3. Appareil de mesure de vibration VIBROTEST 60.....	58
Figure 4. 4. Accéléromètre	59
Figure 4. 5. VIBROEXPERT CM-400	60
Figure 4. 6. Les positions des mesures	62
Figure 4. 7. Les différentes capacités de matériel OROS (2 à 32 voies).....	62
Figure 4. 8. Représentation des sept paliers de GTA	64
Figure 4. 9. Emplacement Des Capteurs	64
Figure 4. 10. Spectre axial de défaut.....	66
Figure 4. 11. Spectre vertical de défaut.....	67
Figure 4. 12. La position des 14 masses en corps MP	67
Figure 4. 13. Spectre axial de défaut.....	69
Figure 4. 14. Positionnements des masses de correction	69
Figure 4. 15. Spectre axial de défaut.....	71

LISTE D'ABREVIATION

GTA : groupe turbo alternateur

BP : base pression

HP : haute pression

MP : moyen pression

NE : la norme européenne

DIN : L'institut allemand normalisation

AFNOR : Association Française de Normalisation

ISO : international organization for standardisation

x : déplacement

v : La vitesse

γ : Accélération

t : temps

A : amplitude

ω : pulsation ou vitesse angulaire (rad/s)

φ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps

f : la fréquence (Hertz)

T : La période

T/M : Tours par Minute

C/M : Cycles par Minute

dB: decibel

Résumé

Cette étude est essentiellement portée sur les outils de la surveillance et la maintenance des machines tournantes et la détection de défauts.

L'analyse vibratoire est la méthode la plus utilisée dans la surveillance des machines. Le principe de cette méthode est basé sur l'analyse spectrale.

Le travail réalisé dans ce mémoire a permis de mettre en évidence l'apport considérable des indicateurs qui se montrent bien adaptés pour la surveillance et la détection des défauts mécaniques dans les machines tournantes.

Mots clés : surveillance, analyse vibratoire, analyse spectrale, détection.

ملخص

تركز هذه الدراسة أساساً على أدوات الرصد والصيانة لتدوير آلات والكشف عن العيوب. تحليل الاهتزاز هو الأسلوب الأكثر استخداماً في الرصد الآلية. ويستند مبدأ هذا الأسلوب في التحليل الطيفي. وساعد العمل المنجز في هذه الذاكرة لتسليط الضوء على مساهمة هذه المؤشرات التي تعتبر مناسبة تماماً للمراقبة والكشف عن عيوب ميكانيكية في تدوير الآلات.

الكلمات الرئيسية: الرصد وتحليل الاهتزاز، التحليل الطيفي، والكشف.

ABSTRACT

This study is mainly focused on the monitoring tools and maintenance of rotating machines and the detection of defects.

The vibration analysis is the most used method in monitoring of machinery. The principle of this method is based on the spectral analysis. The work done in this memory helped to highlight the contribution of the indicators which are well suited for surveillance and detection of mechanical defects in rotating machinery.

Keywords: monitoring, vibration analysis, spectral analysis, detection.

Introduction générale

La maintenance des équipements représente une charge financière importante pour les entreprises et la réduction de cette charge est un enjeu économique certain. Parmi les différentes actions à engager en vue de réduire cette charge (fiabilisation des différents organes, amélioration de la lubrification, prise en compte de la maintenabilité et de la fiabilité d'exploitation au stade de la conception et de l'investissement initial), la surveillance et le diagnostic de machines par analyse vibratoire occupent une place privilégiée.

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une maintenance conditionnelle de l'outil de production industrielle. Elle a pour objectifs de réduire le nombre d'arrêts sur casse, de fiabiliser l'outil de production, d'augmenter son taux de disponibilité, de mieux gérer le stock de pièces détachées, etc....

Cette analyse consiste à déceler d'éventuels dysfonctionnements sur les machines tournantes et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique adéquate à partir des vibrations recueillies régulièrement sur ces machines. On distingue deux principales activités pour l'analyse vibratoire :

- ✓ **La surveillance** : le but de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence indique un dysfonctionnement probable.
- ✓ **Le diagnostic** : il met en évidence des outils mathématiques pour désigner l'élément défectueux de la machine. Le diagnostic demande des connaissances solides en mécanique et en traitement des signaux.

Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

Chapitre 1 :

Est consacré à la présentation de la centrale thermique RAS- DJINET.

Chapitre 2 :

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté une étude théorique sur la maintenance industrielle. et on a proposé une vue complète sur les techniques et les moyens d'analyse vibratoire, pour cela on a approché les notions fondamentales de diagnostic vibratoire.

Chapitre 3 :

Le troisième chapitre présente les principaux défauts existant sur les machines tournantes en général.

Chapitre 4 :

Le quatrième chapitre est une étude expérimentale où nous avons indiqué les résultats de mesures ainsi que l'interprétation des résultats avant et après un équilibrage fait par des agents de siemens.

CHAPITRE 1 :

Présentation de

l'unité de RAS-DUINET

1. Introduction :

La centrale de Ras Djanet est une centrale thermique qui produit une puissance électrique avec une capacité de 704 MW répartie en 4 unités de production de type thermique à vapeur d'une puissance unitaire de 176 Mégawatts (MW) chacun. La puissance fournie au réseau National est de 672MW bornes usine, transportée au poste d'intersection ALGER/EST par l'intermédiaire de 04 lignes de transport de 220 KV. La consommation totale des auxiliaires des quatre tranches et des auxiliaires communs est d'environ 32 MW.

La centrale Thermique de RAS DJINET est une branche de la société nationale de l'électricité et de gaz, SONELGAZ par abréviation. La centrale a été construite par un consortium Austro-allemand : SEIMENS-KWU-SGP, et mise en service pour la première fois en 1986. Cette centrale est classée parmi les plus grandes du pays et revêt un caractère hautement stratégique (régulation de réseau électrique). Elle a été créée pour renforcer le parc de production d'énergie électrique qui atteignait à la fin de premier plan quinquennal : 3000 MW pour la production de 10 000 (G/H).

2. Historique :

La construction de la centrale a été entamée en 1981 dans le cadre du contrat n° 80/103 KDM conclu avec le consortium AUSTRO- ALLEMAND : SIEMENS-KWU-SGP pour un montant de : 133, 7 Millions de DM et 3,34 milliards ATS et 12,5 millions de DA.

La durée de réalisation du projet a été de 5 ans (juin 1981 – fin septembre 1986).

Les entreprises algériennes ayant participé à la réalisation sont :

ENCC, ETTERKIB, BATIMETAL, GENISIDER, INERGA, SNLB, PROSIDER,
ENATUB, SNIC, GTP, SONATRAM, SOGEP.

Les dates de mise en service des groupes :

- Groupe 1 : couplage sur réseau le 17/06/86.
- Groupe 2 : couplage sur réseau le 17/09/86.
- Groupe 3 : couplage sur réseau le 29/11/86.

3. implantation :

La centrale implantée sur une surface de 35 hectare spécialement sélectionnée sur le littoral de cap Djanet (25 km à l'est de Boumer des) pour sa conformité avec les critères nécessités par ce genre d'installation, dont les proximités avec les RN 24 et 12, ainsi que la voie ferrée.



Figure 1. 1. Position de la centrale RAS DJINET

4. Caractéristiques techniques de la centrale :

La centrale Thermique de Ras Djanet est composée de plusieurs organes importants du type Thermique et pour chaque groupe de la centrale on trouve :

4.1. Générateur de vapeur :

La chaudière est un appareil destiné à extraire l'énergie calorifique du combustible et la céder à l'eau, Alors elle a pour rôle de transformer l'eau d'alimentation en vapeur, à haute pression et à une température plus élevée en vue d'alimenter la turbine. La chaudière est de type pressurisée (sous-pression) à circulation naturelle.



Figure 1. 2. Chaudière de la centrale de Cap Djinet

Le générateur de vapeur (chaudière) a pour rôle d'extraire l'énergie calorifique du combustible et de la céder à la vapeur d'eau.

C'est donc la transformation de l'énergie chimique en énergie calorifique, qui sera transformé en énergie mécanique dans la turbine.

4.2. Description du GTA :

4.2.1. Description de la turbine à vapeur :

4.2.2. Introduction :

La turbine à vapeur, comme toutes les turbomachines, sont des appareils à écoulement continu, qui prêtent, dans les conditions économiques, à la production de l'énergie électrique à partir de la vapeur.

Ces machines jouent un rôle important dans la production de l'énergie électrique à cause des avantages qu'elles présentent comparativement à d'autres modes de production d'énergie de même type.

4.2.3. Turbine à vapeur de la centrale :

La turbine à vapeur de la centrale de Cap Djinet est une machine à une seule ligne d'arbre de type à condensation et à simple resurchauffe. Elle comporte six soutirages qui alimentent les réchauffeurs BP (Basse Pression), HP (Haute Pression) et la bêche alimentaire

et elle est composée de trois corps HP, MP (Moyenne Pression) et BP qui sont séparés. Les rotors de la turbine et de l'alternateur sont accouplés rigidement [12].

Ses caractéristiques sont

- Numéro de la machine : N° 117327.
- Longueur : 13.725 m.
- Largeur : 13 m.
- Pression : 138.2 bars.
- Température vapeur : 535 °C.
- Vitesse de rotation : 3000 tr/mn.
- Fréquence : 50 Hz.
- Pression de la vapeur d'échappement : 0.05 bar.
- Puissance : 176 MW.
- Poids : 500 tonnes.

Aubages :

Hormis l'étage de réglage, toute la turbine est du type à réaction. Les aubes mobiles des corps HP sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et tenon.

Les derniers étages de corps BP sont dotés d'aubes à profil gauche venues de matrice dont le pied en forme de sapin ou de marteau double est émanché dans les rainures correspondante de l'arbre. Les aubes directrices des corps MP et HP soumises à de fortes sollicitations sont fraisées dans la masse avec un pied en forme de marteau et un tenon comme les aubes mobiles.

Les autres aubes directrices ont un pied en forme de crochet et un tenon rivé. Les trios derniers étages du corps BP sont constitués par des couronnes d'aubes directrices en tôle.

a) Corps haut pression (HP)

Le corps HP de la turbine est une construction en tonneau. Ce dernier est équipé d'un étage de régularisation par groupe de tuyères. Quatre ensembles combine vannes d'arrêt/soupapes régulatrices sont associées à autant de groupes de tuyères qui sont disposée de coté du corps [12] [6].

La vapeur conduite à la turbine par l'intermédiaire des tuyères parvient aux soupapes régulatrices après avoir traversé les vannes d'arrêt. A partir de ces soupapes la vapeur s'écoule dans l'enveloppe.

Des clapets anti-retour sont montrés sur les tuyères de resurchauffe entre le corps HP et le resurchauffeur pour empêcher le reflux chaud du resurchauffeur vers le corps MP.

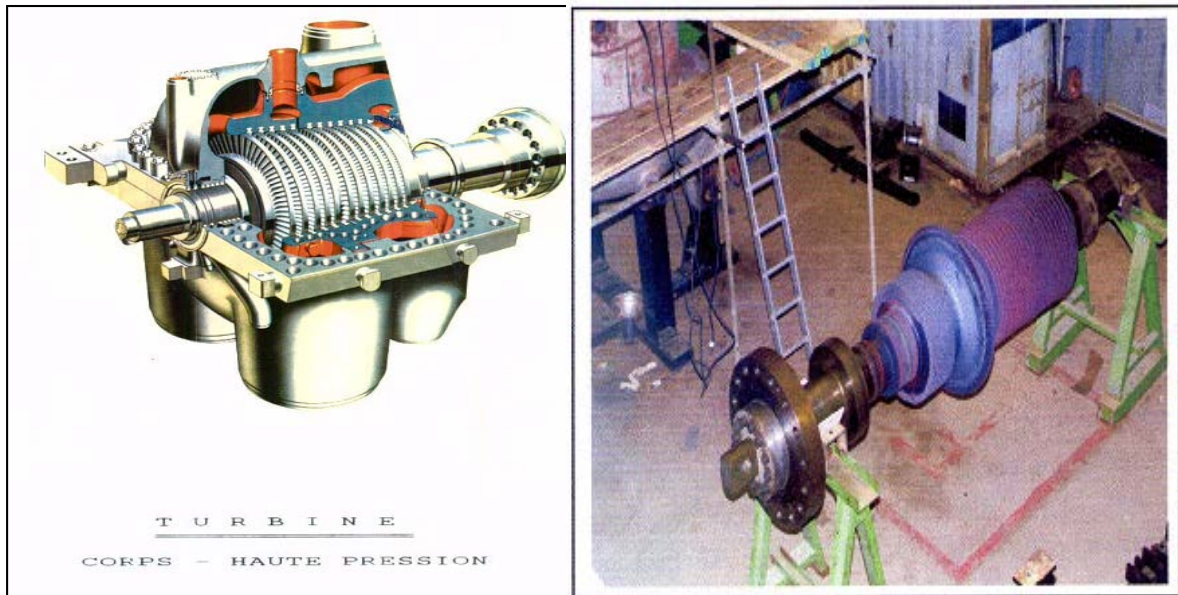


Figure 1. 3. Corps haut pression (HP).

Ses caractéristiques sont

- Corps : simple flux.
- Débit vapeur : 232 t/h.
- Pression vapeur : 138 bars.
- Température vapeur : 535 °C.
- Etage de réglage à action : 1.
- Etage à réaction : 23.

b) Corps moyenne pression (MP)

Le corps MP est à double flux. L'enveloppe externe possède un plan de joint horizontale. Elle porte l'enveloppe interne montée de façon à ne pas entraver les dilatations thermiques. Les aubes directrices sont logées dans l'enveloppe interne et la vapeur resurchauffée pénètre au milieu de l'enveloppe interne par le bas et le haut. La présence de l'enveloppe interne limite les caractéristiques élevées de la vapeur à la zone d'admission de cette enveloppe, alors le joint horizontal de l'enveloppe n'est exposé qu'aux faibles pressions et à la température réduite de la vapeur à la sortie de l'enveloppe interne [12].

Ses caractéristiques sont

- Corps : double flux.
- Nombre d'étage à réactions : 2*19.
- Pression à l'admission : 35.9 bar.
- Température de la vapeur : 535 °C.
- Débit de vapeur : 467.7 t/h.

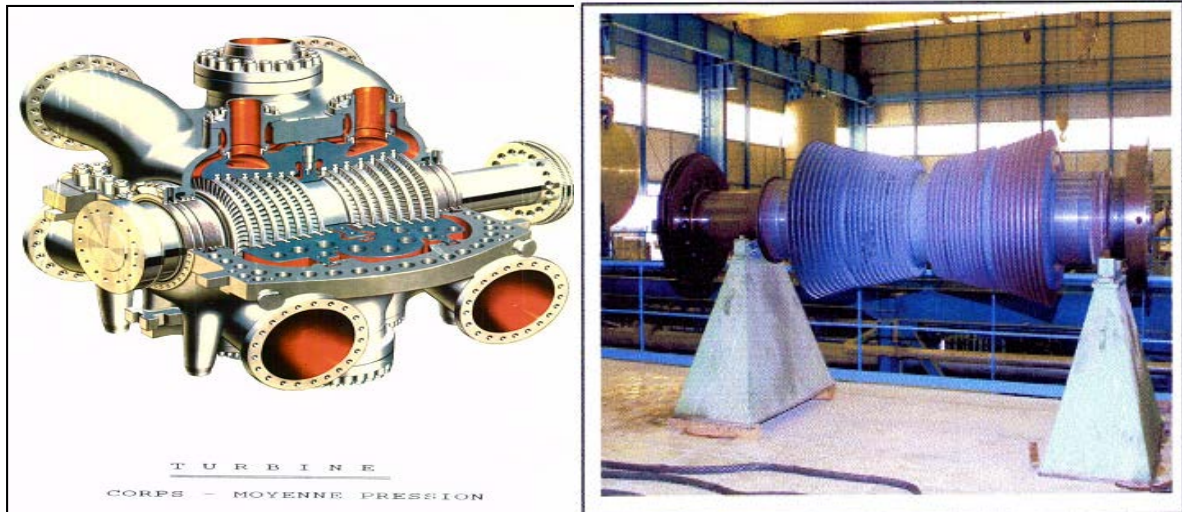


Figure 1. 4. Corps moyenne pression (MP)

c) Corps à base pression (BP)

Le corps BP (basse pression) est du type à double flux. Il s'agit d'une construction mécano- soudée comprenant une carcasse et une double enveloppe. La vapeur provenant du corps MP pénètre dans le corps interne de l'enveloppe double en amont des aubages BP par les pipes d'admission disposées de part et d'autre du corps BP [12].

Des compensateurs sont montés sur les gaines de vapeur pour éviter la déformation sous l'effet de dilatation thermique.

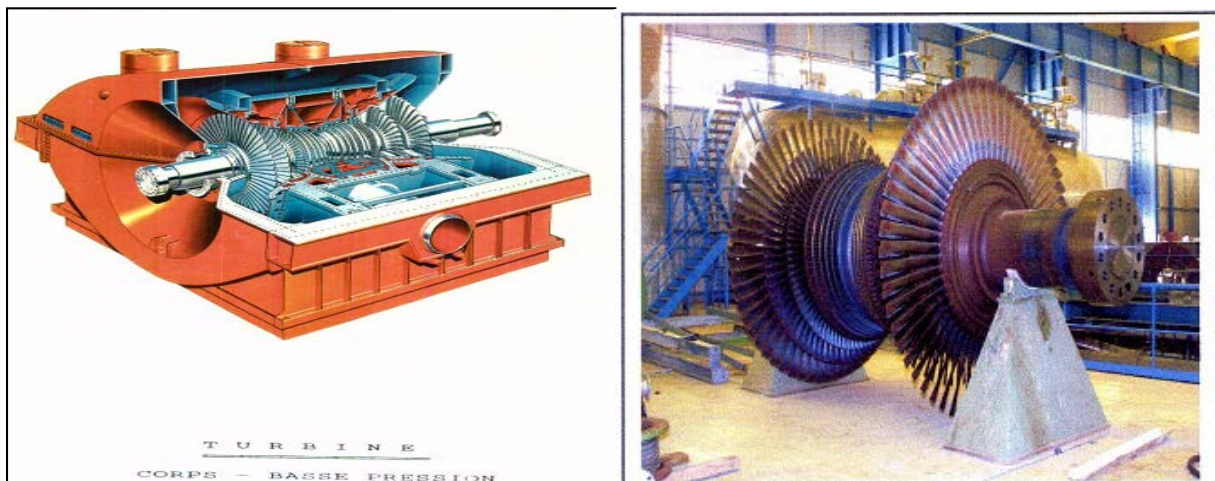


Figure 1. 5. Corps à base pression (BP)

Ses caractéristiques sont :

- Corps : double flux
- Nombre d'étage à réactions : 2*8
- Pression à l'admission : 5.5 bar
- Température de la vapeur : 282°C.
- Débit de vapeur : 406 t/h.

4.3. Alternateur :

4.3.1. Description de l'alternateur :

Il transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique.

Il est refroidi par l'hydrogène en circuit fermé qui présente des avenages par rapport à l'air.

Parmi ces avenages : la faible densité et une grande conductibilité thermique ce qui permet de déduire les pertes de chaleur lors de la ventilation, ainsi que la chaleur dégagée par l'alternateur est récupérée par l'eau d'alimentation [1].

L'alternateur se compose essentiellement de deux organes, l'inducteur alimenté par de la courante continue basse tension, et l'induit où est se développe la façon électromotrice alternative.

4.2.2. L'inducteur :

C'est la partie mobile de la machine, d'où le nom rotor est souvent donné. Son corps est tiré d'une seule pièce forgée en acier à haute perméabilité magnétique. Environ 2/3 de sa circonférence est occupée par l'enroulement de l'excitation [1] [2].

Les bobines concentrées de l'enroulement sont ainsi disposées de façon à obtenir une distribution du champ magnétique à l'entrefer presque sinusoïdale. L'isolation contre masse des conducteurs est réalisée par du papier aramide.



Figure 1. 6. Partie mobile de la machine (l'inducteur).

4.3.3. L'induit :

Appelé couramment le stator, est formé de tôles isolées les empilées les unes sur les autres, de sorte à constituer un cylindre, dans lequel tourne l'inducteur. Sur la surface interne de ce cylindre sont disposés les conducteurs où prend naissance la force électromotrice (f.e.m) générée [1], [2].



Figure 1. 7. Partie fixe de l'alternateur (l'induit)

La carcasse, le noyau magnétique et l'enroulement représentent les principaux éléments de l'induit :

✓ **Carcasse**

Dimensionnée, avec des passages des gaz de réfrigération, pour résister à la pression qu'ils exercent d'une part et d'autre part pour maintenir le poids des parties interne.

✓ **Noyant magnétique**

Conçu à base de tôle en acier doux collées et isolées entre elles, afin de minimiser les courants de Foucault et les pertes par hystérésis.

✓ **Enroulement**

Il est de type triphasé imbriqué, constitué de conducteurs élémentaires en cuivre, dont l'isolation principale est en papier de mica. A chaque encoche creusée dans le noyau sont logées deux barres dans le but d'atteindre un enroulement comportant plus de conducteurs par pôles et par phase.

Caractéristiques technique de l'alternateur

- Température nominale : 15.5 KV
- La longueur : 7.340 m.
- $\cos \varphi = 0.8$
- Excitation : à diodes tournantes.
- Poids du stator complet : 198 tonnes.

4.4. Poste d'eau :

Le poste d'eau est l'ensemble des appareils qui transfère l'eau d'alimentation du cycle depuis le condenseur jusqu'à la chaudière et qui conditionne cette eau du point de vue de la température et de la teneur en oxygène. IL se compose des éléments suivants :

4.4.1. Condenseur :

Le condenseur utilisé dans l'installation est un échangeur à échange par surface. Il est placé sous la Turbine BP. La vapeur d'échappement de la turbine, se condense au contact extérieur des tubes du faisceau tubulaire parcourus intérieurement par l'eau de circulation, qui est prise à la mer, grâce' à une pompe de circulation qui aspire cette eau et la refoule à l'intérieur du faisceau tubulaire et de là elle retourne à la mer

❖ Les principales fonctions de condenseur sont :

- Assurer la condensation de la vapeur d'eau évacuer du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer de refroidissement (débit de $2 \times 12000 \text{ m}^3/\text{h}$), dans les 14850 tubes en titane contenu dans le condensateur.
- Augmenter la chute d'enthalpie de la vapeur détendue en établissement une dépression atmosphérique afin d'améliorer le rendement.
- Dégazer le condensat et d'évacuer les incondensables en majorité l'air.
- Recevoir également le condensat des réchauffeurs BP.

4.4.2. Bâche alimentaire :

C'est un réservoir qui réserve l'eau en charge au cours de l'aspiration des pompes et assure le dégazage du condensat. Cette dernière joue le rôle d'un échangeur à mélange (Réchauffeur), l'eau est chauffée alors par le soutirage S4 du corps MP de la turbine. En condensant la vapeur qui est prélevée à la turbine.



Figure 1. 8. Vue de bache alimentaire de la centrale

4.4.3. Les Pompes :

➤ Deux (02) pompes d'extraction :

Ce sont des pompes centrifuges à 4 étages, leurs rôles est d'assurer le transfert d'eau du puits du condenseur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les trois réchauffeurs BP avec un débit nominale d'une pompe $415\text{m}^3/\text{h}$.

On trouve 2 pompes par groupe l'une en marche et l'autre en réserve en cas de panne, avec une tension de 6.3 KV et une puissance de 300KW

➤ Trois (03) pompes alimentaires :

L'eau d'alimentation est prise de la bache alimentaire par des pompes d'alimentation, et refoulée vers la chaudière en passant par des réchauffeurs HP.

❖ On distingue deux types de pompes :

- **Pompes nourricières** : ce sont des pompes auxiliaires de type centrifuge à un étage, elles servent à augmenter la pression de l'eau d'alimentation de 4.9 bars à 11 bars avec un débit de $261.6\text{ m}^3/\text{h}$.

- **Pompes principales** : ce sont des pompes centrifuges radiales à 6 étages. Elles sont placées en avale des pompes nourricières, elles augmentent la pression de l'eau de 11 bars jusqu'à 177 bars.

Pour chaque groupe, on trouve trois pompes nourricières et trois pompes principales. Et Chaque groupe de pompes d'eau d'alimentation est commandé par un moteur commun d'une tension de 6.3 KV et une puissance de 300KW [3].

➤ **Deux (02) pompes de circulation :**

Leur débit est 12000 m³/h chacune, et leur rôle sert à refouler l'eau de mer jusqu'au condenseur. Après traversée du condenseur, l'eau de réfrigération est rejetée vers le canal de rejet qui aboutit à la mer.

4.5. Auxiliaires électriques :

Les Auxiliaires électriques se situent à l'intérieur, deux bâtiments à 05 niveaux situés entre deux chaudières, on trouve :

- Niveaux 5,15 m : salle de câble.
- Niveaux 8,35 m : tableaux MT, BT.
- Niveaux 11,65 m : salle de câble.
- Niveaux 14,75 m : batteries, redresseurs et salle électrique.
- Niveaux 18,65 m : salle de commande.

4.6. Transformateur principal d'évacuation d'énergie :

Le courant électrique fourni par l'alternateur est une tension trop pour pouvoir être transporté par les lignes aériennes du transport haute tension.

Des transformateurs ont pour fonction d'élever cette tension jusqu'à 225 ou 338 KV ; C'est l'organe qui adapte la tension alternateur à la tension réseau pour pouvoir évacuer l'énergie produite vers le réseau national à travers des lignes aériennes [3].

Chaque alternateur est raccordé par des gaines à un transformateur élévateur de 15.5 KV à 220 KV d'une puissance de 220 MVA à travers un disjoncteur coupleur.

Les transformateurs élévateurs ont un poids de 140 tonnes (sans les radiateurs) et leur réfrigération est assurée par une circulation forcée d'huile, laquelle est elle-même refroidie par l'air.



Figure 1. 9. Transformateur principal

4.7. Station de filtrage et de pompage d'eau de mer :

Trois conduites de 03 mètres de diamètres sont installées à une profondeur de 06 mètres de la surface de la terre avec une longueur de 900 mètres dans la mer, ce qui permet à l'eau de passer automatiquement vers le bassin par la différence de potentiel (de niveau).

Avant qu'elle soit aspirée, l'eau passe par deux niveaux de filtrage :

- Par des grilles à grappins pour empêcher le passage des grands corps.
- Par des tambours filtrants pour empêcher le passage des petits corps.

Le pompage s'effectue dans des puits situés après la station de filtrage, par trois groupes de pompes déferents pour les besoins de la centrale.

4.8. Station de dessalement et de déminéralisation d'eau de mer :

4.8.1. Dessalement d'eau de mer :

La station de dessalement a pour rôle la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer.

Quatre unités de dessalement produisant 500 m³/jour chacune, assurent la production en eau dessalée, stockée dans deux bâches (2 x 2700 m³).

Type de l'installation : **Multi-flash** qui sert à vaporiser l'eau de mer pour lui enlever le sel puis la condensée pour obtenir de l'eau dessalée.

Trois produits chimiques sont injectés pour le traitement de l'eau qui est les suivants :

- **Le bégard EVN** : Inhibiteur d'incrustation utilisé pour éviter l'entartrage.
- **Le bélite (M33)**: Produit anti-mousse utilisé pour éviter la formation de la mousse au niveau des évaporateurs.

- **Les bisulfites de sodium (Na_2SO_3):** Produit permettant l'élimination du chlore dans l'eau pour diminuer la conductivité.

4.8.2. Déminéralisation :

Deux chaînes de déminéralisation de $40\text{m}^3/\text{h}$ chacune parachèvent le traitement d'eau avant son utilisation dans le cycle. Le stockage d'eau déminéralisée se fait dans deux (02) réservoirs de 1500 m^3 Chacun. Pour être traité, des pompes de l'eau brute aspire l'eau dessalée de ces réservoirs et la refoule vers filtres à lits mélangé qui est constitué d'un mélange des échangeurs cationique fortement acides et les échangeurs anioniques fortement basiques

4.8.3. Electro chloration :

La chloration de l'eau de mer permet de préserver l'équipement traversé par l'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins.

Elle se fait par de l'hypochlorite de sodium, la production est assurée par une station d'électro chloration (par électrolyse de l'eau de mer d'une capacité de 150 kg/h de chlore actif).

- Pompes d'alimentation en eau de mer de refroidissement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour les unités de dessalement.
- Pompes d'alimentation en eau de mer pour la station d'électro chloration.

5. Principe de fonctionnement de la centrale thermique de Ras-Djenet :

Avant décrire le fonctionnement de la centrale, il sera bon de rappeler les différentes transformations énergétiques qui ont servi à la production de l'énergie électrique, dans une travaille suivant le **cycle de Rankine** (deux source énergétique l'une chaude (chaudière) et l'autre froide (condenseur) + un groupe turboalternateur).

❖ En gros, on a trois transformations :

- Transformation de l'énergie contenue à l'état latent dans le combustible (énergie chimique) en énergie calorifique (vapeur) dans la chaudière.
- Transformation énergie calorifique (vapeur) en énergie mécanique (vitesse de rotation) la transformation se faite dans la turbine.
- Transformation énergie mécanique (vitesse de rotation) en énergie électrique la transformation se faite dans l'alternateur.

Le circuit eau vapeur est un circuit fermé dont le point de départ est le condenseur. On a deux pompes d'extraction qui est-on plein débit (chaque pompe assure 100% de la charge), ces pompes aspirent le condensât de condenseur a une pression de 0.04 bars et une température de 33° c, elle refoule l'eau vers les réchauffeurs de basse pression BPI, BP2 et BP3, ou l'augmentation de la température se fait comme la suit :

- 520° c à la sortie de réchauffeur BPI.
- 840° c à la sortie de réchauffeur BP2.
- 1130° c à la sortie de réchauffeur BP3.

L'eau arrivé à la bache alimentaire à une température de 152° c et sa pression de 4.5 bars grâce au soutirage S6, au-dessous de la bache se trouve trois pompes alimentaire qui assurent chacune d'elle un demi débit (50% de la charge). Ces pompes travaillent en paires, elles aspirent l'eau à 11 bars et le refoule un niveau de ballon chaudière à 177 bars à travers les réchauffeurs haute pression HP5 et HP6, et on constate que la température augmente comme suit :

- 2000° c à la sortie de réchauffeur HP5.
- 2460° c à la sortie de réchauffeur HP6.

L'eau chaude comprimé arrive au ballon chaudière, elle traverse les parois tubulaires qui tapissent la chambre de combustion ou elle se ramène jusqu'à la température d'ébullition et même jusqu'à la température de vaporisation, la moitié supérieure du ballon chaudière contient de la vapeur saturée celle-ci est dirigée sur les trois surchauffeurs, ou elle va augmenter en température jusqu'à 540°C, et la pression reste presque a 140 bars, la vapeur sur, arrive au corps haute pression HP de la turbine, ou elle détente jusqu'à 40 bars, et sa température diminue jusqu'à 357°C, puis elle renvoyer a la chaudière ou se trouvent les resurchauffeurs, ou elle réchauffe pour atteindre les 540°C, et par la suit envoyer a la turbine pour attaquer le cors moyenne (MP). Ces derniers sont en double flux, pour but de faire détendre le maximum possible la pression de vapeur.

Le passage de la vapeur dans ces trois favorise la formation du travail moteur, qui définit l'énergie mécanique produit par la turbine.

Dans le corps HP la vapeur se détente le maximum possible et sa s'écouler dans le condenseur qui se trouve à 0.04 bars de pression grâce aux quatre éjecteurs qui aspirent l'air pour créer le vide dans le condenseur.

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, une présentation succincte de la centrale thermique de RAS-DJENET est donnée à sa structure en passant par les différents compartiments qui la compose ainsi que les machines indispensable au bon fonctionnement de cette centrale.

CHAPITRE 2 :

Maintenance conditionnelle

et

Analyse vibratoire

1. Introduction :

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Nous nous intéressons principalement aux transmissions des puissances mécaniques utilisées dans différents domaines tel que l'industrie : l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires. La maintenance de ces systèmes de transmission occupe un temps relativement important par rapport à leur temps d'utilisation, actuellement la recherche scientifique vise à développer les outils nécessaires à l'optimisation de la maintenance de tels systèmes.

Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de maintenance, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances. Un rappel sur l'analyse vibratoire des machines tournantes est également donné.

2. Définition de Maintenance :

D'après la norme AFNOR X60-010 « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchés suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou de service. Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise pour effectuer les remplacements ou les remises en état nécessaire ».

2.1. Définition selon la norme EN 13306/2001

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

2.2. Définition selon la norme DIN 31051

L'institut allemand de normalisation DIN définit la maintenance comme "l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel."

2.3. Définition selon la norme NF X60-010

La définition selon AFNOR (Association Française de Normalisation) de la maintenance industrielle est la suivante :

"Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou dans un état où il est en mesure d'assurer un service déterminé". Tel que :

- L'action de MAINTENIR induit la notion de prévention sur un système en fonctionnement.
- L'action de RETABLIR induit la notion de correction consécutive à une perte de fonction.

3. Objectifs de maintenance :

Au niveau d'une entreprise industrielle, la fonction maintenance doit être capable de :

1. Assurer la rentabilité des équipements en tenant compte de la politique définie par l'entreprise.
2. Procéder à des études préalables afin de permettre la réduction des coûts et des interventions.
3. Préparer le travail.
4. Etudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'intervention

4. philosophie de maintenance :

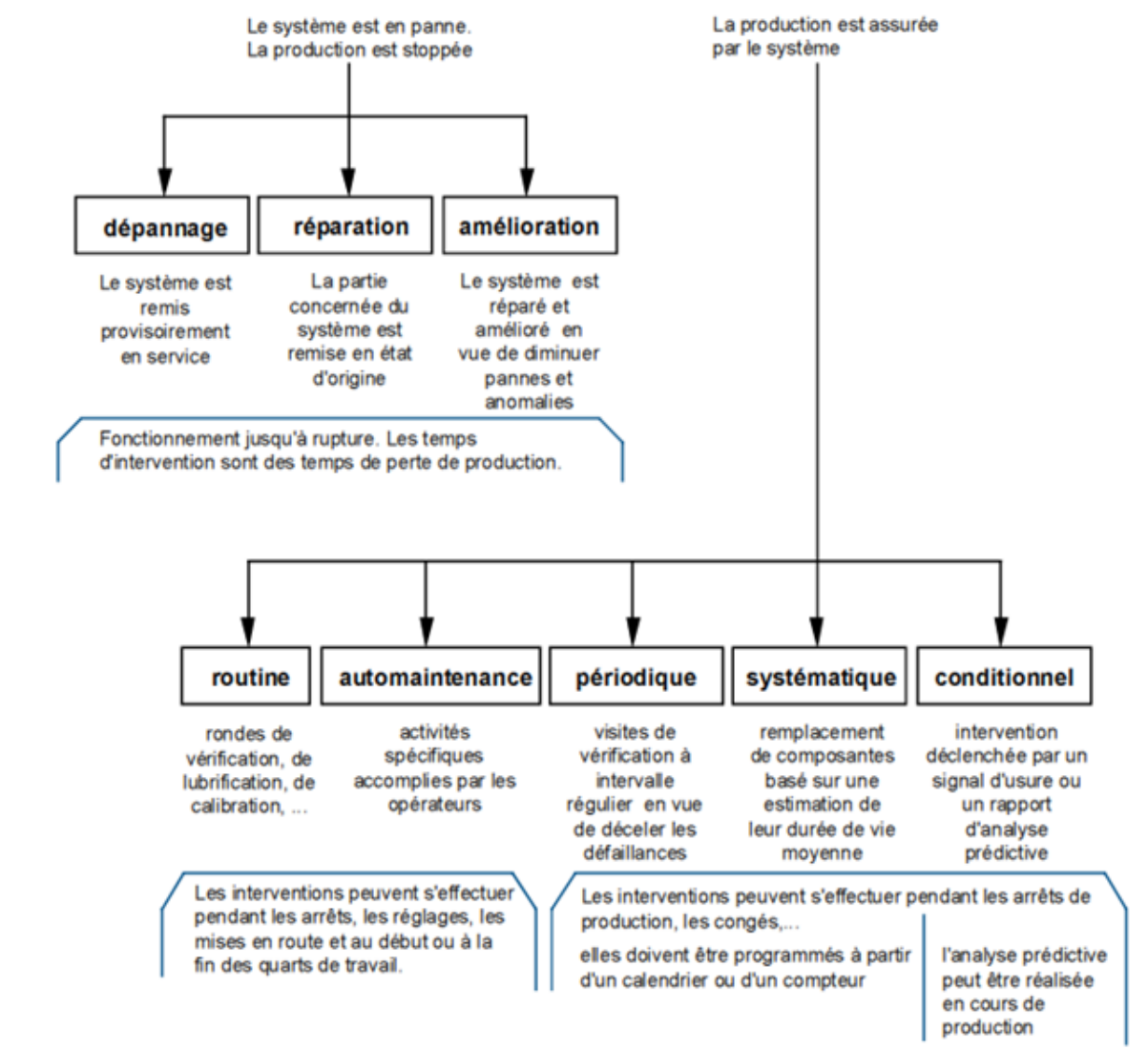


Figure 2. 1. Différentes philosophies de la maintenance

Les différentes philosophies de maintenance employées par les différentes installations industrielles sont légèrement semblables, malgré la grande différence dans la nature de leurs opérations. Ces philosophies sont habituellement classées en quatre catégories (**Fig.2. 1**)

- Corrective ou maintenance de catastrophe,
- Préventive systématique: Maintenance à base de temps ou de délais,
- Préventive conditionnelle (ou Prédictive) : Maintenance à base de conditions,
- Préventive Proactive : maintenance de prévention (systématique + conditionnelle)

5. Type de maintenance :

5.1. Maintenance corrective :

La maintenance corrective correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident. Elle n'est entreprise qu'après constat d'un état de panne. La réaction consiste alors à éliminer le défaut, grâce à un dépannage ou une réparation. C'est donc l'improvisation avec toutes les conséquences qui en résultent (pertes de temps, arrêts prolongés des machines, absences de schémas de dépannage), elle est appelée aussi maintenance de catastrophe. C'est la politique d'entretien la plus coûteuse vue sous l'aspect coûts directs et coûts indirects. L'opération de maintenance corrective n'a pas de condition d'applications particulières.

5.2. Maintenance préventive :

La maintenance préventive correspond à la volonté de **prévoir la dégradation** du bien (matériel ou équipement), afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne. Dans ce type de maintenance, on n'attend pas que le matériel ou l'équipement tombe en panne. Elle est effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de **défaillance** d'un bien ou d'une dégradation d'un service rendu. Elle consiste à :

- Procéder à des visites systématiques en cours de marche ou à l'arrêt pour suivre les usures des pièces. Ces visites sont à caractère périodiques et déterminées d'avance ;
- Faire des contrôles en cours de marche ou à l'arrêt ;
- Opérer à des réglages et resserrage et changer éventuellement des pièces défectueuses.

5.2.1. Types de maintenance préventive :

A. Maintenance préventive systématique

« C'est une politique de maintenance effectuée selon un échancier établi en fonction du temps ou le nombre d'unités d'usage. ». Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués ; la longueur de produits fabriqués ; la distance parcourue ; la masse de produits fabriqués ; le nombre de cycle effectué ; etc.

a) Conditions d'applications

La maintenance préventive systématique nécessite de connaître : le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF).

b) Les avantages

- Planification des arrêts d'entretien.
- Optimisation de l'intervention (préparation).
- Limite les risques de panne.

c) Les inconvénients

- Coût de maintenance élevé.
- Approche statistique.
- Risque induit par une intervention parfois non nécessaire. [5]

d) Domaines d'applications

La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

Equipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée). Par exemples : appareil de levage, extincteur (incendie), réservoir sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc. Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves. Par exemples : tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avion, trains, etc. Equipements ayant un coût de défaillance élevé. Par exemples : éléments d'une chaîne automatisée, systèmes fonctionnant en continu. Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevés au cours de leur temps de service. Par exemples : consommation excessive d'énergie, allumage et carburation déréglés pour les véhicules à moteurs thermiques.

B. Maintenance préventive conditionnelle**a) Définition**

C'est une politique de maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien. La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle parfois maintenance prédictive.

b) Conditions d'applications

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant les cas il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là, nous

pouvons 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 et concerne des paramètres mesurés tels que :

- Le niveau et la qualité d'une huile ;
- Les températures et les pressions ;
- La tension et l'intensité du matériel électrique ;
- Les vibrations et les jeux mécaniques ;
- Thermographie.
- Etc.

De tous les paramètres énumérés, l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. Sa compréhension autorise la prise à bon en pleine connaissance de cause des décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle. La surveillance peut être soit périodique, soit continue.

c) Les avantages

- Optimisation de la durée de fonctionnement.
- Optimisation de l'intervention (préparation).
- Evaluation réelle de l'état de la machine.
- Evite les pertes de production.

d) Les inconvénients

- Coût de l'investissement (homme / matériel).
- Astreindre à un programme suivi. [5]

6. Techniques d'analyse :

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

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts, on établit une courbe d'évolution de l'indicateur au cours

du temps. Sur cette courbe, on définit différents seuils correspondant à un niveau d'alerte, à une alarme, à un niveau de défaillance, ces niveaux sont établis soit par expérience soit en appliquant une norme pour les roulements, on utilise des abaques de sévérité vibratoire pour définir les différents seuils.

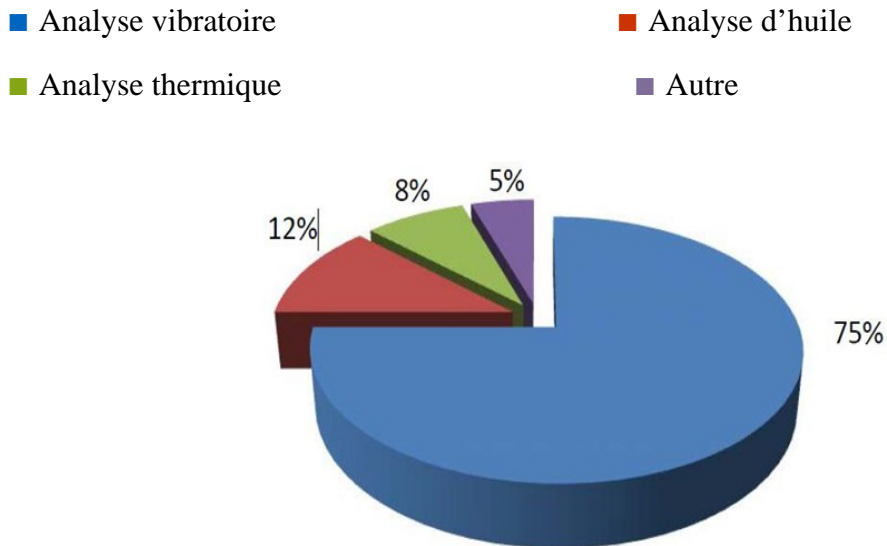


Figure 2. 2. Technique d'analyse

6.1. L'analyse d'huile :

Le lubrifiant (huile) est comparable au sang de la machine, il reflète le comportement et l'état du système dans lequel il circule.

Le suivi de ces caractéristiques physico-chimique permet d'apprécier l'état de dégradation de l'huile et de connaître son aptitude à remplir totalement ses fonctions initiales de lubrification. L'évolution de cette dégradation peut être un indicateur de condition d'exploitation de l'équipement. Elle va permettre d'optimiser les fréquences de vidanges dans le cas de quantité importante, le suivi de la contamination permet :

- De situer l'organe défectueux, d'apprécier l'évolution et le type d'usure dans le cas d'une pollution par des particules internes.
- D'apprécier la nature et l'origine des agents extérieurs.

On prend comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et on compare les résultats obtenue à chaque analyse, si l'on constate une évolution brutale des caractéristiques ou si l'on atteint des valeurs très éloignées des valeurs initiales, il faut soit intervenir au niveau du matériel ou remplacer l'huile

6.2. Thermographie infrarouge :

Le contrôle par thermographie a pour objet de détecter et de localiser les variations de température en surface. Une caméra infrarouge associée à un logiciel de traitement d'image, permet d'obtenir une image en 2 dimensions, appelée thermo-gramme, de la zone contrôlée. La couleur de chaque pixel de l'image peut être reliée à la température en chaque point de l'objet, en faisant des hypothèses sur la valeur d'émissivité de la surface.

La thermographie est utilisée lors des opérations de maintenance sur site pétrochimique notamment pour le contrôle :

- de l'état des calorifuges et frigorifuges d'équipement fonctionnant hors température normale,
- de l'état des matériaux réfractaires utilisés sur les fours, cheminés et le gunitage de réacteurs,
- de niveaux dans les réservoirs.

La thermographie est bien adaptée à la détection des points chauds (surchauffe, température, anormale) sur les machines tournantes et les armoires électriques. Il est également envisageable de surveiller un processus comme le soudage, le remplissage d'un moule.



Figure 2. 3. Exemple de la thermographie infrarouge

6.3. Analyse vibratoire :

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est

la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par les structures de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres

- Caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et modifie l'intensité.
- Position et fixation du capteur sur la machine.
- Caractéristiques du capteur.
- Pré-amplification et transmission du signal.
- Vitesse de rotation et puissance absorbée.
- Etat des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenages, roulements etc.).

6.3.1. Objectifs d'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

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

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel.
- soit dans le domaine fréquentiel.
- soit dans les deux à la fois.

a) Les avantages

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

b) Les inconvénients

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

7. mécanique vibratoire :

- Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire par à une position d'équilibre.
- Si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort [Fig.2.4.], on constate qu'il se traduit par :
 - Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre
 - Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps

Une accélération: variation de la vitesse par rapport au temps. [8]

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération.

La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps.

L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps.

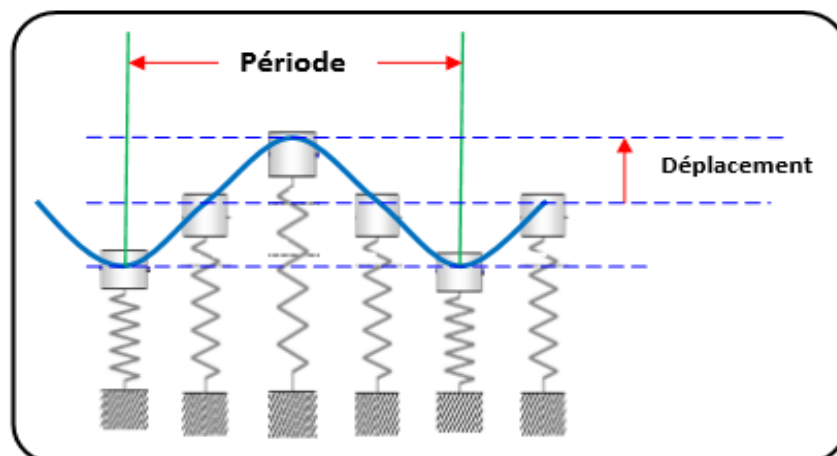


Figure 2. 4. Mouvement d'une masse suspendue à un ressort [4]

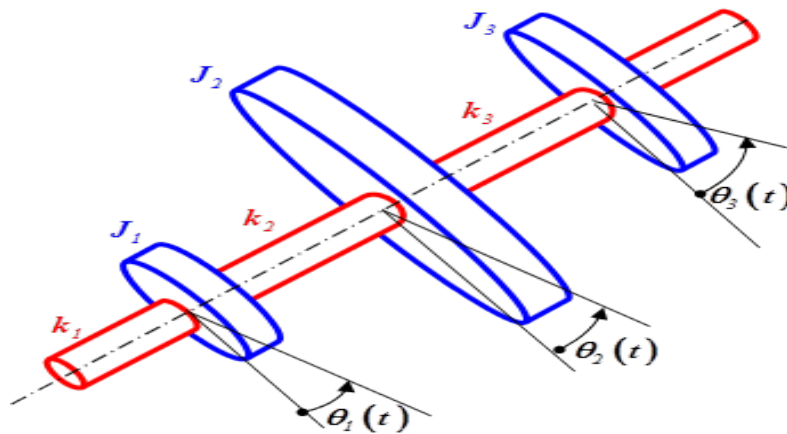


Figure 2. 5. Rotor Disque+ Arbre

8. Définition d'une vibration :

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du Mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement Plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence. En fait, un corps Est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position D'équilibre ou de référence. Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont : NF E 90-001, NF E 90 002.

8.1. Les caractéristiques d'une vibration :

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillatoires autour d'une position de repos (d'équilibre).Elles sont caractérisées par les paramètres suivants :

8.1.1. Le déplacement :

C'est la distance par laquelle s'est déplacée la structure. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale :

$$X(t) = A \sin \omega t$$

Domaine d'utilisation :

Fréquence < 100 Hz

La mesure de déplacement s'effectue à l'aide de capteur de proximité (champs magnétiques)

8.1.2. La vitesse :

La valeur d_x parcourue pendant un instant dit :

$$V = \frac{dx}{dt} = d \frac{A \sin \omega t}{dt} = A * \omega * \cos(\omega t)$$

Domaine d'utilisation :

100 Hz < fréquence < 1000 Hz

La mesure de vitesse s'effectue à l'aide de capteur de vitesse (courant induit dans une bobine. Cette technique est peu utilisée).

8.1.3. Accélération :

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps. Mathématiquement, l'accélération notée γ est la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -\omega \times \omega A \sin \omega t$$

8.1.4. Amplitude :

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre (1 μ m) : 1 μ m = 10⁻⁶m.

8.1.5. Fréquence :

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'hertz(Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute(T/M), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises est communément exprimée en cycles par minute(C/M). Comme une minute compte 60 secondes, 1HZ =60 C/M.

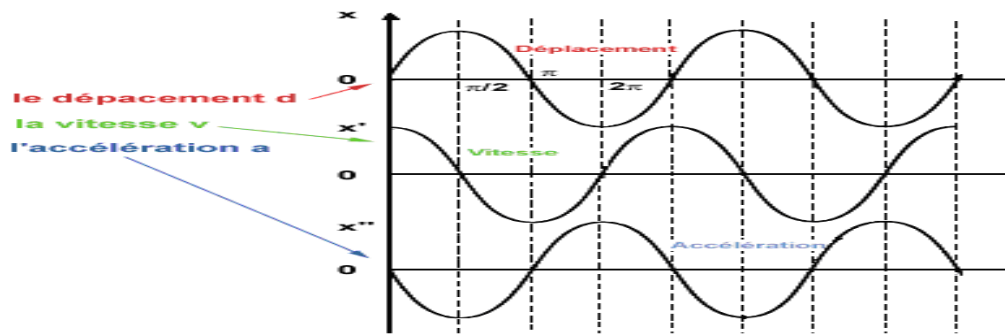


Figure 2. 6. Représentation de déplacement, vitesse, l'accélération

8.2. Les type de vibrations :

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

8.2.1. Vibrations périodiques :

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelée période (Fig.2.7.).

Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines.

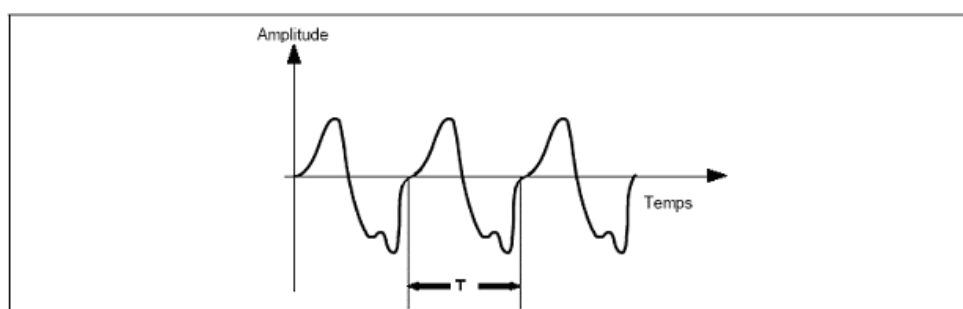


Figure 2. 7. Vibration périodique.

8.2.2. Vibrations harmoniques (sinusoïdal pur) :

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude temps est représenté par une sinusoïde (Fig.2.8.).

Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle qui est générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

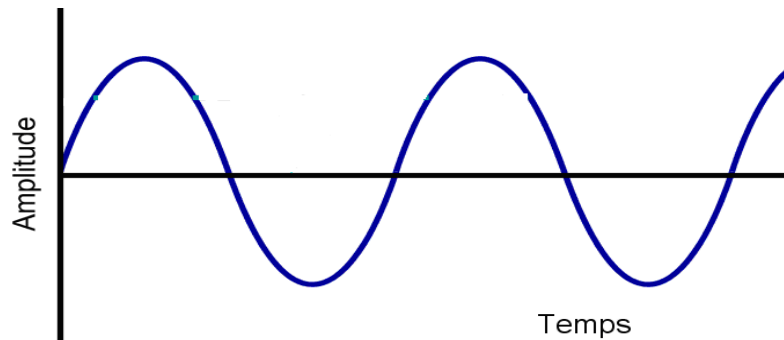


Figure 2. 8. Vibration harmonique

Elle est décrite par :

$$X(t) = X_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

Avec :

ω = vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$)

f = fréquence du mouvement

φ = phase du mouvement par rapport à un repère dans le temps

Elle est décrite par :

$$X(t) = \sum [X_i \cdot \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \text{ avec } 1 \leq i \leq n$$

8.2.3. Les vibrations aléatoires :

Une vibration aléatoire est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps (Fig.2.9.). C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.

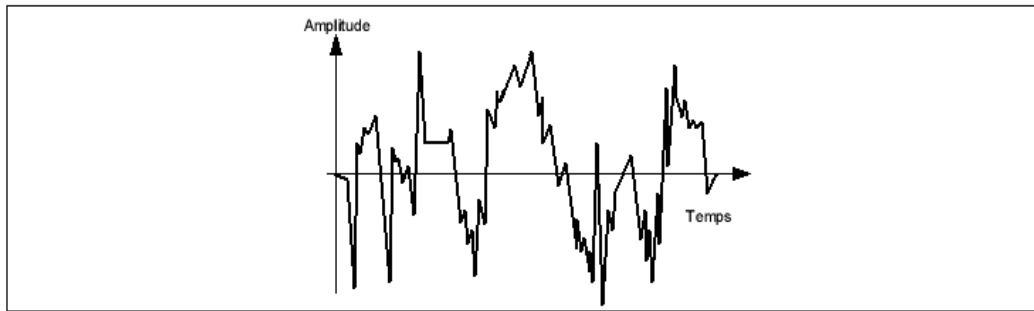


Figure 2. 9. Vibration aperiodique

Elle est décrite par :

$$X(t) = \sum [X_i * \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \text{ avec } i \geq 1$$

8.2.4. Les vibrations transitoires :

Sont générées par des forces discontinues (choc). Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement. Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudopériodique, si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur critique et le mouvement est aperiodique.

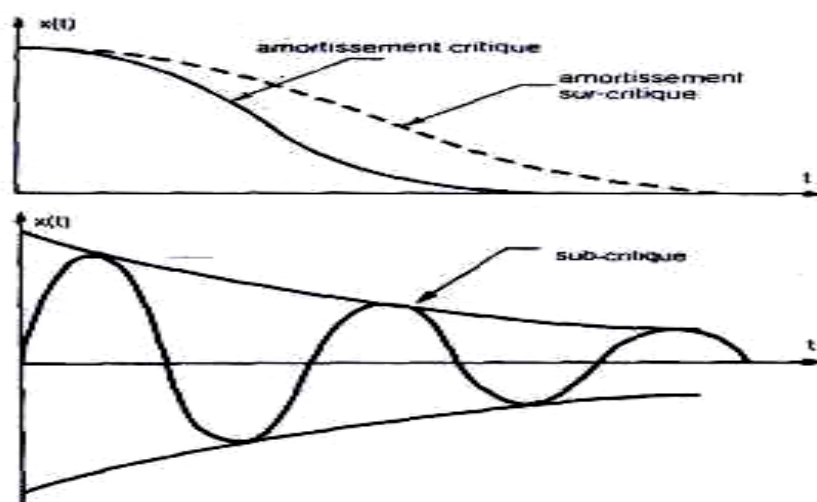


Figure 2. 10. Vibration transitoire

Différents types de vibrations

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité) comme dans le tableau ci-dessous :

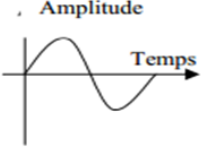
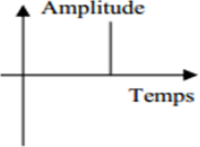
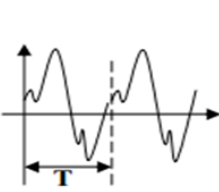
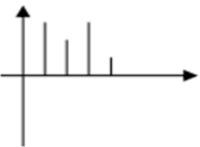
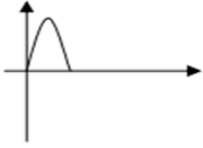
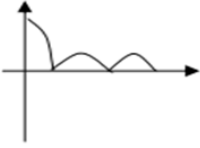
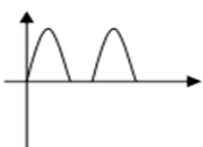
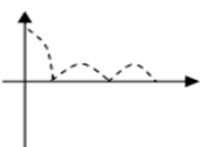
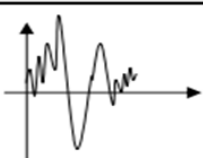
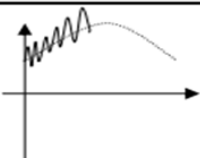
Nature de vibration	Forme temporelle	Forme spectrale	Phénomènes générateurs
Harmonique (Sinusoïdale) Elle est représentée par une sinusoïde $x(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$			Balourd
Périodique (Sinusoïdale Complexe) $x(t) = \sum X \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ Elle est composée de plusieurs vibrations harmoniques			Effort dynamique d'engrènement
Transitoire			Explosion Laminoirs
Transitoire périodique non harmonique			Presses Automatique
Apériodique (Aléatoire) Elle a un comportement temporel quelconque			Oscillations de pression exercée sur une structure Chocs dans le Broyeur

Tableau 2. 1. Les types des vibrations

8.3. Applications des vibrations :

Les vibrations sont mesurées à des fins très diverses. En général, toute vibration non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le bruit ou cause des défaillances mécaniques prématurées. Quatre grands domaines de mesure vibratoire peuvent être définis.

8.3.1. Analyse structurale :

Il s'agit d'une méthode expérimentale performante se basant sur les mesures des vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, allant des petites pales de turbine aux grands ponts. En utilisant un capteur de force et un accéléromètre, le signal d'excitation et la réponse vibratoire de la structure sont mesurés simultanément à l'aide d'un analyseur bi canal ou multivoie.

8.3.2. Test de vibration :

Pour valider la tenue réelle d'un produit à l'environnement et donc sa conception, le test de vibration est pratiqué en soumettant une structure (une caisse automobile par exemple) à de hauts niveaux vibratoires avec un excitateur vibratoire. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies. Les informations sur la réponse fréquentielle de la structure sont obtenues.

8.3.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts :

Dans sa forme la plus simple, une mesure du niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème imminent. En effet, les forces internes d'une machine se caractérisent par des niveaux plus ou moins importants suivant son état (déséquilibre par exemple). Cependant, de plus amples informations sont souvent requises pour une détection fiable et précoce d'un grand nombre de défauts : Signatures fréquentielles de base et avancées. Cette technique (décrite plus loin) consiste en la mesure du spectre fréquentiel caractéristique des vibrations d'une machine en bon état, et de la surveillance de tout changement concernant les composantes spectrales. De tels changements sont le reflet d'une modification tant des éléments tournants que de la structure, et permettent le diagnostic de défauts.

8.3.4. Mesure des vibrations appliquées à l'homme :

Ce domaine concerne la mesure des vibrations transmises à l'homme. Ces vibrations peuvent provenir, par exemple de véhicules ou d'outils à main portatifs. Les niveaux de vibrations mesurées sont ainsi modifiés pour satisfaire au confort humain et aux critères de santé stipulés dans les normes internationales (ISO 2631, UIC 513)

9. Origine des vibrations :

9.1. Vibration des machines voisines :

Le sol et les socles de fixation peuvent transmettre les vibrations d'une machine à l'autre. Si l'on arrête la machine voisine mise en cause, le pic spectral disparaît.

9.2. Vibration d'origine électrique :

Les vibrations des parties métalliques du stator et du rotor sous l'excitation de champs électromagnétiques produisent des pics à des fréquences égales à celle du secteur et à ses harmoniques, l'augmentation de ces pics peut être le signe de la dégradation du moteur.

9.3. Résonance de la structure ou du rotor :

Chaque sous ensemble de la machine possède une fréquence propre de résonance qui est fonction de paramètres multiples tels que la rigidité, la masse, la forme géométrique. Si une excitation quelconque possède une fréquence voisine de celle de la résonance, un pic apparaît dans le spectre.

10. Principales activités de l'analyse vibratoire :

10.1. La surveillance :

Le but est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence constituant la signature alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable.

10.2. Le diagnostic :

Il met en œuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance.

Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire.

11. Mesure pratique d'une vibration :

11.1. Chaîne de mesure vibratoire :

Il existe deux types de surveillance vibratoire, online donc les capteurs sont installés à demeure sur la machine et off line dans ce cas la mesure se fait manuellement avec le capteur.

11.2. Les capteurs de vibration :

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, on retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération). [8]

11.2.1. Les proximètres :

Le proximètre, ou sonde capteur de déplacement sans contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monté en permanence à l'intérieur du palier [Fig.2.11.], les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz). [8]

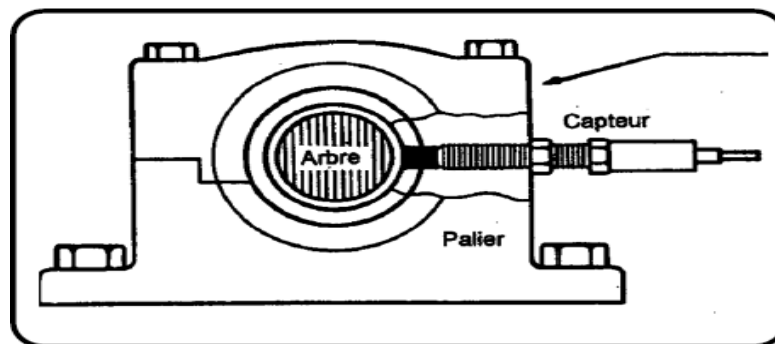


Figure 2. 11. Proximètre monte sur un palier [8]

❖ Les avantages et les inconvénients

a) Avantages

- Mesure directement les mouvements d'arbre
- Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse
- Mesure directement le déplacement

- Pas de pièce mobile

b) Inconvénients

- Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements
- Installation
- Sensible au matériau de l'arbre
- Restriction de températures. [5]

❖ Problèmes et défauts détectés

- Arbre
- Palier lisse
- Buté
- Généraux : balourd, désalignement, usure, et.....

11.2.2. Vélocimétrie :

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

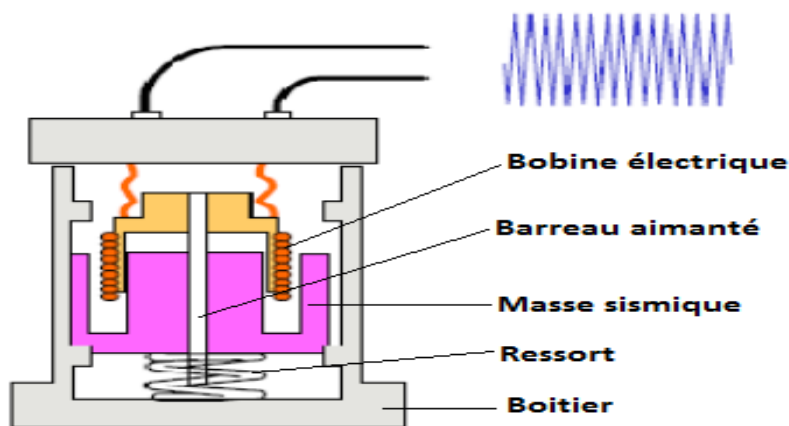


Figure 2. 12. Schéma de principe d'une vélocimétrie

11.2.3. Les accéléromètres :

Un accéléromètre piézoélectrique [Fig.2. 13.] Est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.

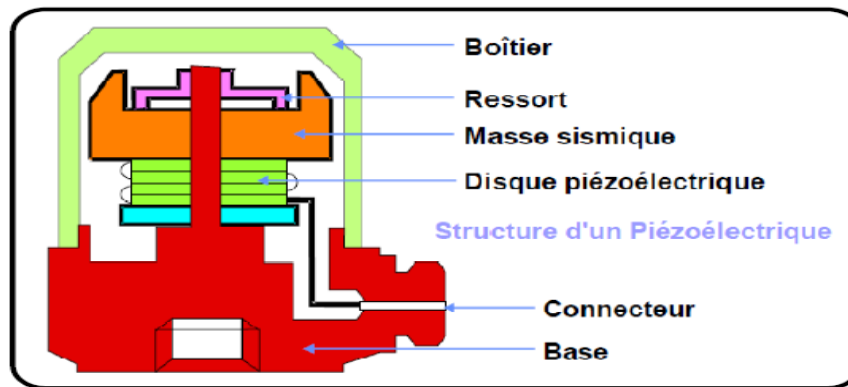


Figure 2. 13. Schéma de principe d'un accéléromètre [8]

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

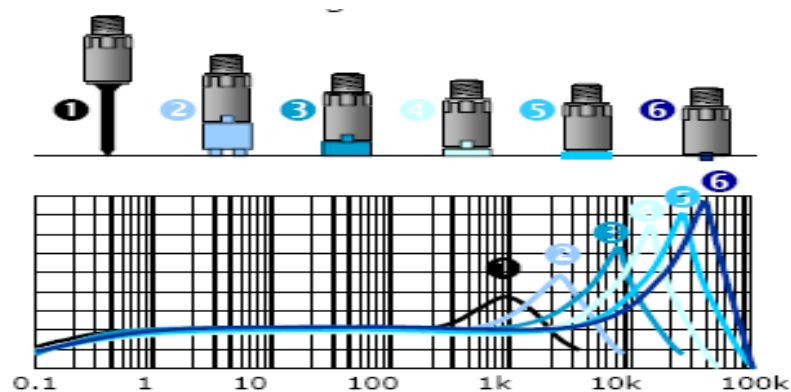


Figure 2. 14. Mode de fixation de l'accéléromètre

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

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable [8]

❖ Les avantages et les inconvénients

a) Les avantages

- Facile à installer

- Petit, léger
- Supporte les hautes températures
- Pas de pièce mobile

b) Les inconvénients

- Nécessite une double intégration pour le déplacement
- Nécessite une source extérieure
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre
- Médiocre pour les faibles vitesses [8]

❖ Problèmes et défauts détectés

- Roulements
- Engrenages
- Machine à pâles
- Machine électrique
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

❖ Points de mesure

Les mesures de vibrations sont réalisées **au droit des paliers** de la machine.

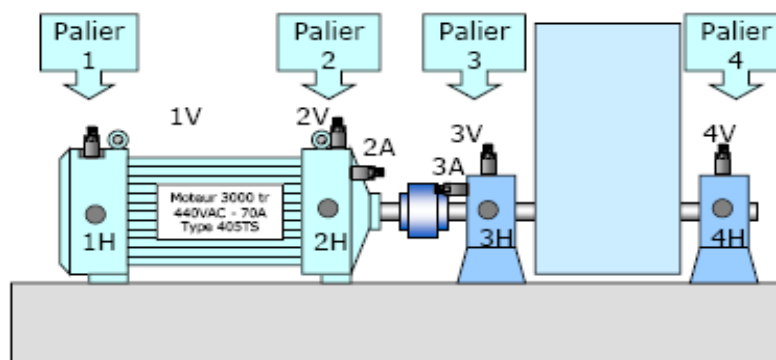


Figure 2. 15. Points de mesure

Les capteurs utilisés mesurent les vibrations selon une direction, généralement confondue avec leur axe de symétrie. On distingue différentes directions de mesure pour un même point de mesure physique. Il serait souhaitable de réaliser les mesures de vibrations selon les trois directions possibles. Pour des raisons de temps et de coûts, on se limite généralement à une seule direction de mesure par palier : La direction **radiale oblique** constitue le plus souvent un bon compromis

Remarque : Il faut d'affecté les points de mesure pour les accéléromètres et les sondes de déplacement sur les paliers sur plusieurs points radial, vertical...).

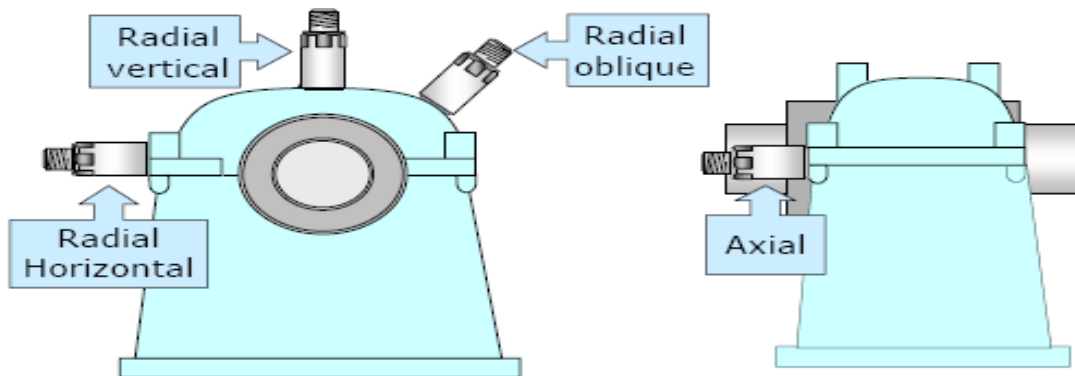


Figure 2. 16. Les points de mesure pour les accéléromètres

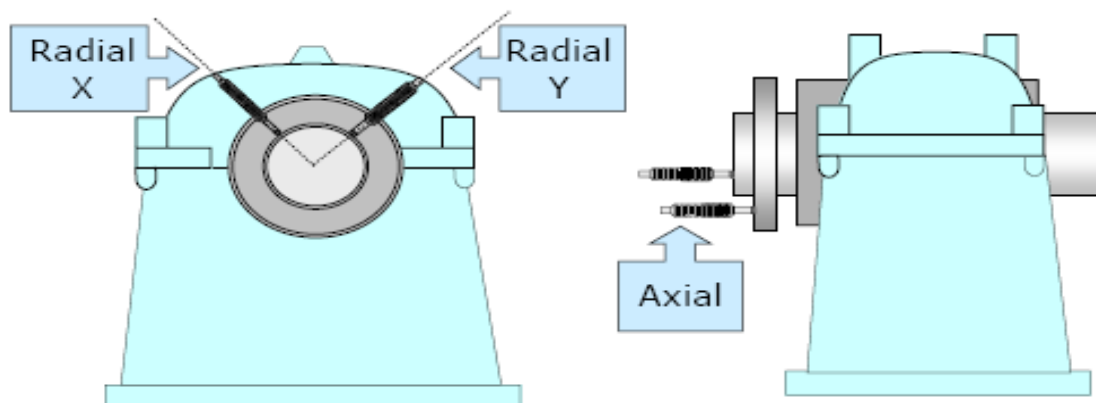


Figure 2. 17. Les sondes de déplacement sur les paliers

11.2.4. Analyseur portable de vibration :

L'analyseur portable de vibration incorpore un microprocesseur qui lui permet de convertir le signal électrique mathématiquement en accélération par temps d'unité, d'exécuter un FFT, et de stocker les données. Il peut être programmé pour produire des alarmes et des affichages des données.

Les données stockées par l'analyseur peuvent être téléchargées à un ordinateur personnel ou plus puissant pour exécuter des analyses, un stockage et une récupération de données, et une production d'états plus sophistiqués.

12. Conclusion :

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine. Les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes

Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine.

Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut de roulement, par exemple pour la détection d'un défaut de roulement, on trouve qu'il est utile d'utiliser l'analyse spectrale (résonance à des hautes fréquences), le facteur de défaut de roulement est aussi exigé la complémentarité de plusieurs indicateurs (facteur crête et valeur efficace).

CHAPITRE 3 :

Les défauts

des machines tournantes

1. Introduction :

Les défauts vibratoires des machines tournantes sont tellement complexes, qu'il est très difficile de faire un diagnostic sans connaître les symptômes vibratoires associés à chaque défaut (images vibratoires induites par ces défauts). Ainsi, pour maîtriser les pannes, il faut savoir les identifier et mesurer leur incidence. Il convient ensuite de les analyser et rechercher sur un effet constaté, la cause initiale d'une défaillance.

2. Défaut de balourd :

On dit qu'un rotor est équilibré lorsque les masses qui le composent sont réparties symétriquement autour de son axe de rotation. Il se comporte comme un cylindre de révolution tournant autour de son axe et aucune force n'est générée sur les paliers qui le supportent.

Physiquement, un déséquilibre mécanique se manifeste par le non coïncidence de l'axe de rotation et de l'axe central d'inertie (Δ) de l'arbre (leurs différentes positions relatives caractérisent le déséquilibre). Il en résulte que le rotor est soumis à une force centrifuge tournante de la forme :

$$\vec{F} = m r \omega^2 \vec{u}$$

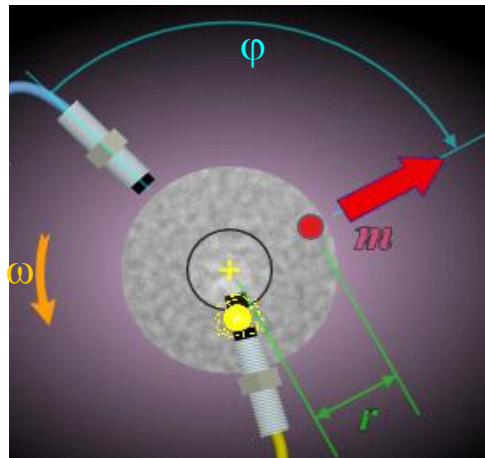
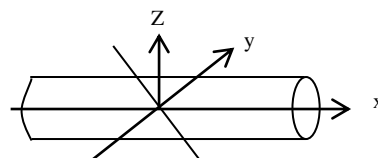


Figure 3. 1. Présentation d'un balourd.

Qui peut être décomposée en deux forces vibratoires dans un repère :

$$F_x = m r \omega^2 \cos \omega t$$

$$F_y = m r \omega^2 \sin \omega t$$



2.1. Les types de balourd :

a)- Balourd statique :

L'axe d'inertie est parallèle à l'axe de rotation, ce type de balourd est surtout présent lorsque le rotor comprend un disque de rayon important par rapport à l'axe.

b)- Balourd de couple :

L'axe d'inertie est sécant avec l'axe de rotation, mais les deux axes sont dans un même plan.

c)- Balourd dynamique :

C'est une combinaison des deux premiers, il correspond au cas réel le plus fréquent.

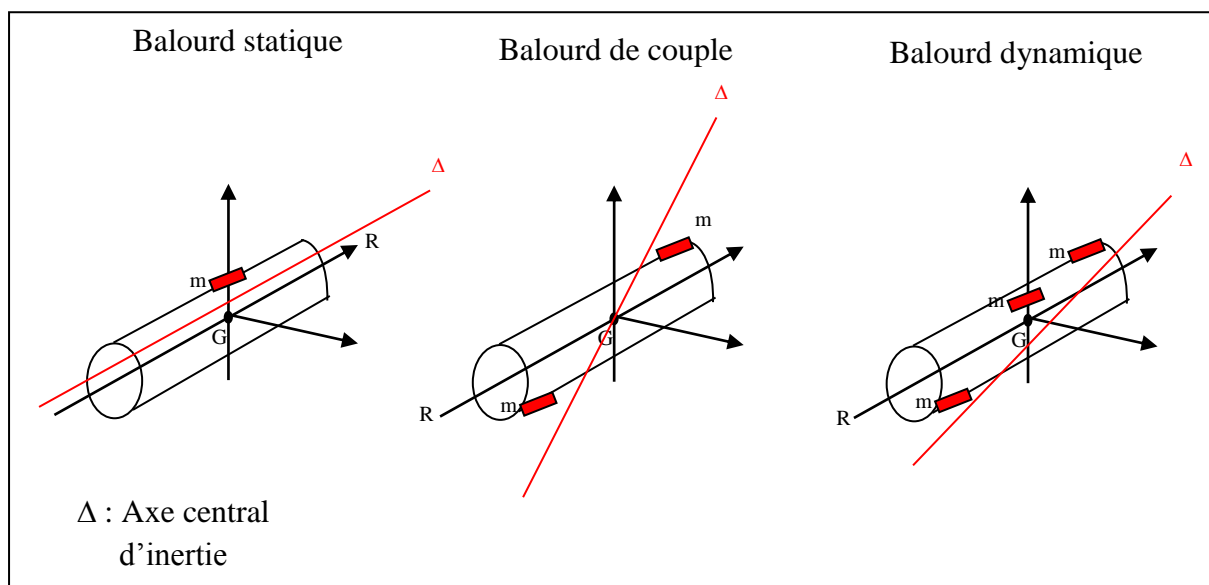


Figure 3. 2. Différents types de balourd.

2.1.1. Balourd d'origine thermique :

a) Déformation des rotors de turbine :

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

b) Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques :

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

c) Glissement et dilatation contrariée des bobinages de machines électriques :

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

2.1.2. Balourd évolutif :

Si au passage par un orifice (palier, joint d'étanchéité par exemple) l'arbre s'échauffe de manière dissymétrique, soit parce qu'il frotte, soit parce que le brassage d'huile provoque un échauffement plus intense d'un côté de l'arbre que de l'autre si de plus,

La déformation de l'arbre qui résulte de cet échauffement déplace à son tour le point chaud (vibration maximum décalée par rapport au point chaud qui lui donne naissance) (cf. figure), alors, toutes les conditions sont réunies pour amorcer un phénomène de variations cycliques du déséquilibre.

La mise en équation du mouvement montre que la trajectoire du vecteur représentant la vibration à la fréquence de rotation \mathbf{Fr} est une spirale amortie ou divergente selon la position des vitesses critiques, ou plus exactement selon la valeur de l'angle que fait la vibration (déplacement) avec la force qui lui donne naissance (balourd créé par l'échauffement).

Le décalage du point d'échauffement s'explique parce qu'il y a déphasage entre la déformation et la force qui la crée.

Ce déphasage est celui qui existe par exemple entre un balourd et la vibration qu'il induit :

- il est nul à basse vitesse
- il est égal à $\pi/2$ à la vitesse critique
- il est égal à π aux vitesses élevées

On peut voir quelques exemples de phénomènes

vibratoires observés dans le cas de frottements sur des joints d'étanchéité lubrifiés.

Les phénomènes d'évolution en spirale (aussi appelés **balourds thermiques tournants**) décrits ci-dessus sont surtout observés si l'échauffement n'est pas trop fort et si l'ancien point de contact peut se refroidir.

2.2. Ambiguïtés de diagnostic :

D'autres phénomènes sont susceptibles de générer de l'énergie à la fréquence de rotation F_0 sans pour autant être liés à un déséquilibre de masse :

- Jeux de paliers trop importants
- Chocs périodiques à la rotation (problème de fixation)
- Défaut rétorque sur un moteur asynchrone (barres, anneau)
- Déformation d'un rotor (effet thermique)
- Résonance de structure

Les problèmes vibratoires engendrés par ce type de défaut ne seront donc pas corrigés par l'équilibrage de la machine.

3. Défaut d'alignement :

Entre arbres en prolongement, le prolongement peut être de plusieurs ordres : axial, radial, angulaire.

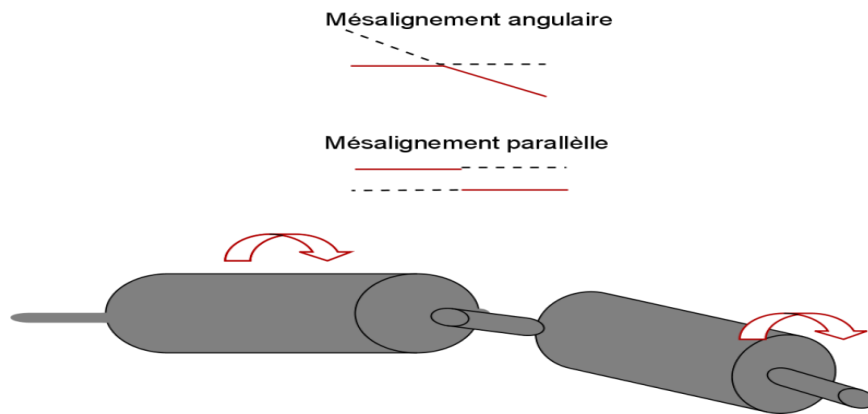


Figure 3. 3. Défaut d'alignement.

La perception de ces décalages se fait **axialement** pour les **désalignements axiaux**, et logiquement radialement pour les défauts radiaux, sur les premières **harmoniques de rotation notamment**. Le signal temporel est cyclique et dépend du type d'accouplement, de l'importance et du type de décalage.

3.1. Les types de désalignement :

a) Désalignement radial :

Un défaut d'alignement est révélé par un pic d'amplitude prépondérante généralement 2 fois la fréquence de rotation (parfois 3 ou 4 fois). Il apparaît une vibration dans la direction radiale de composante d'ordre 2 de la fréquence de rotation (rarement d'ordre 3, voire exceptionnellement d'ordre 4), avec des amplitudes supérieures aux composantes d'ordre 1.

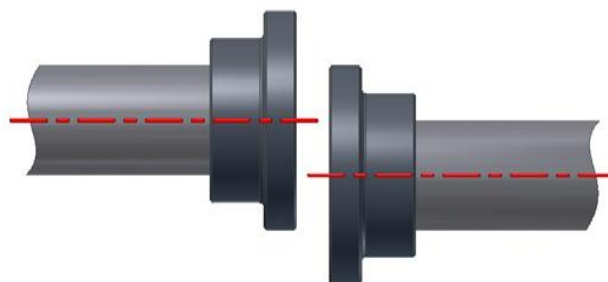


Figure 3. 4. Désalignement parallèle.

b) Désalignement angulaire :

Il apparaît une vibration axiale de composante d'ordres 1, 2, 3 ou 4 de la fréquence de rotation avec des amplitudes supérieures à celles des composantes radiales correspondantes

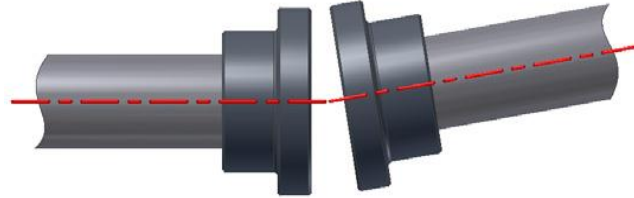


Figure 3. 5. Délignage angulaire

3.3. Ambiguïtés de diagnostic :

Le défaut de lignage peut n'apparaître qu'en fonctionnement, sous l'effet de la charge. Les causes peuvent être :

- Déformation du stator
- Efforts dissymétriques sur le rotor
- Calage du rotor (machine à paliers lisses)
- Déformation de la structure porteuse
- Blocage d'accouplement

D'autres phénomènes peuvent donner lieu à des manifestations vibratoires similaires :

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation.

4. Défauts de roulements :

Le roulement a pour fonction de permettre la rotation de l'arbre tout en transférant sa charge vers le palier, avec le moins de frottement possible.

Il a également un rôle de positionnement de l'arbre dans les paliers.

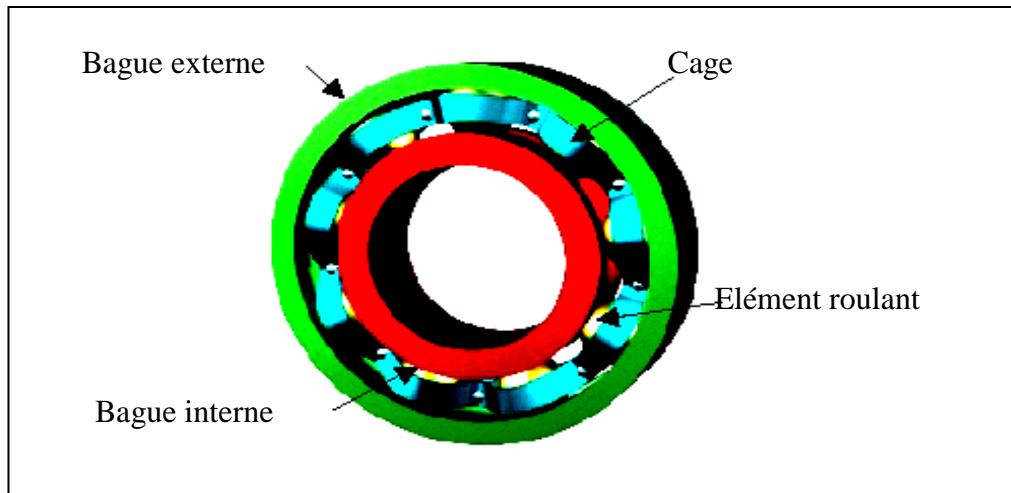


Figure 3. 6. Roulement à bille.

En général, la bague interne est fixée sur l'arbre et la bague externe est fixée, dans un logement situé dans le palier. La cage assure un écartement constant entre les éléments roulants.

a) Dégradation d'un roulement

Dégradation d'un roulement peut être due à :

- ✗ son usure normale.
- ✗ Une sous charge ou une surcharge.
- ✗ Une mauvaise lubrification (manque ou excès de graisse).

Elle se manifeste par un écaillage au niveau des surfaces en contact (bague interne, bague externe, éléments roulants).

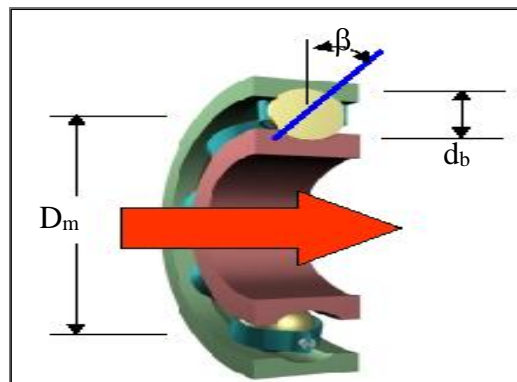


Figure 3. 7. Géométrie de roulement.

Cinématique

La géométrie des roulements permet de déterminer leurs fréquences caractéristiques de défauts.

Les données de base sont :

- ✗ d_b : diamètre des éléments roulants.
- ✗ D_i : Diamètre du chemin de roulement de la bague interne.
- ✗ D_e : Diamètre du chemin de roulement de la bague externe.
- ✗ β : l'angle de contact des éléments roulants (en degrés).
- ✗ n : nombre de billes (ou de rouleaux).
- ✗ N : vitesse de rotation de l'arbre.
- ✗ D_m : Diamètre moyen du roulement, avec $D_m = \frac{D_i + D_e}{2}$

Ces éléments permettent d'établir :

- ✗ Fréquence caractérise un défaut sur bague externe : $f_e = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left(1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$
- ✗ Fréquence caractérise un défaut sur bague interne : $f_i = \frac{n \cdot N}{2 \cdot 60} \cdot \left(1 + \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$
- ✗ Fréquence caractérise un défaut sur bille : $f_b = \frac{D_m}{d} \cdot \frac{N}{60} \cdot \left(1 - \frac{d_b^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \beta \right)$
- ✗ Fréquence caractérise un défaut sur cage : $f_c = \frac{N}{2 \cdot 60} \cdot \left(1 - \frac{d_b}{D_m} \cdot \cos \beta \right)$

Le calcul de ces fréquences caractéristiques nécessite une connaissance précise des caractéristiques dimensionnelles du roulement, Malheureusement, ces renseignements ne figurent pas sur les catalogues généraux et sont quelque fois difficiles à obtenir auprès des constructeurs.

Aussi, nous avons été amenés à utiliser des formules simplifiées qui tiennent uniquement compte de paramètres facilement déterminables, c'est-à-dire vitesse de rotation N et le nombre de billes ou de rouleaux.

Roulement avec $6 \leq n \leq 12$	Roulement avec $n > 12$
$f_e = \frac{N}{60} \cdot 0,4 n$	$f_e = \frac{N}{60} \cdot (0,5n - 1,2)$
$f_i = \frac{N}{60} \cdot 0,6 n$	$f_i = \frac{N}{60} \cdot (0,5n + 1,2)$
$f_c = \frac{N}{60} \cdot 0,4$	$f_c = \frac{N}{60} \cdot \left(0,5n - \frac{1,2}{n}\right)$

Tableau 3. 1. Formules simplifiées pour le calcul des fréquences caractéristiques de défauts

5. Défaut de paliers lisses hydrodynamique :

Dans un tel palier, l'arbre est en équilibre sur le film d'huile entretenu par la rotation. La position d'équilibre est définie par l'angle de calage qui est l'angle formé par la droite des centres et la direction de la charge de l'arbre dans le palier. L'angle de calage dépend de la technologie du palier et a une forte incidence sur la stabilité de la machine.

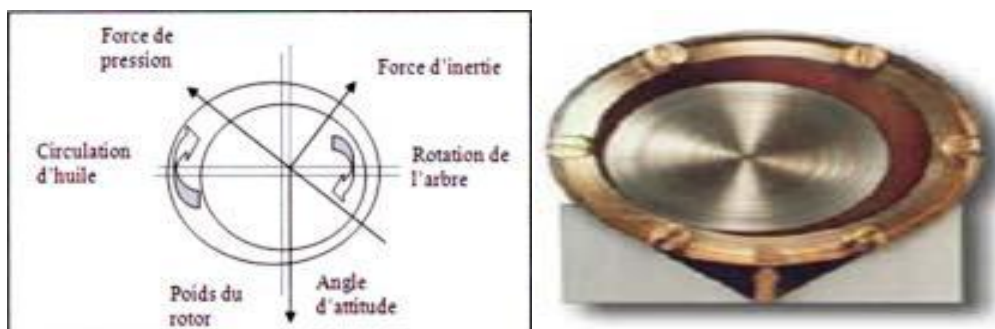


Figure 3. 8. Schéma du palier hydrodynamique.

5.1. Instabilités de paliers :

Des instabilités de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que :

- le poids du rotor.
- la force liée à la pression et des caractéristiques de l'huile.
- la charge de la machine.
- la vitesse de rotation.

L'instabilité se manifeste par une vibration auto-entretenu qui entraîne une précession du rotor, avec une période différente de la période de rotation, dont la fréquence est :

$$0.23F_0 < F_{\text{instabilité}} < 0.63F_0 \quad (3.9)$$

Selon la technologie du palier.

5.2. Types d'instabilités :

Il existe deux types d'instabilités :

- **Le tournoiement d'huile (Oil Whirl) :** Instabilité dont la fréquence varie avec la fréquence de rotation du rotor.
- **Le fouettement d'huile (Oil Whip) :** Instabilité dont la fréquence coïncide avec la vitesse critique correspondant à la première pulsation propre du rotor (rotor en état flexible).

5.3. Origine des instabilités :

Les instabilités de paliers peuvent apparaître au cours des phases transitoires des machines tournant à vitesse élevée (turbine). Elles peuvent être observées sur des acquisitions spectrales en cascade.

6. Défaut de Cavitation :

Il s'agit d'un défaut d'écoulement d'un fluide qui se produit quand la pression, à l'intérieur de la pompe, s'abaisse à un niveau égal à celle de la vapeur saturante du fluide véhiculé. Il y a formation de bulles de gaz qui, en implosant, excitent un grand nombre de modes de structure. La cavitation est causée par un débit d'aspiration insuffisant et se manifeste par un bruit caractéristique identique à celui que provoquerait le passage de graviers dans le corps de la pompe. Ces phénomènes sont souvent intermittents et s'ils persistent, ils peuvent dégrader des éléments internes de la pompe et notamment éroder les aubes des impulseurs.

On pourra distinguer un phénomène de cavitation des autres phénomènes ayant des manifestations vibratoires voisines (usure de bagues de roulement, défaut de lubrification) en prenant une mesure sur le corps de pompe. Pour un défaut lié à un palier, l'énergie vibratoire sera beaucoup plus élevée sur le palier que sur la volute, alors que pour la cavitation, elle sera généralement supérieure sur la volute.

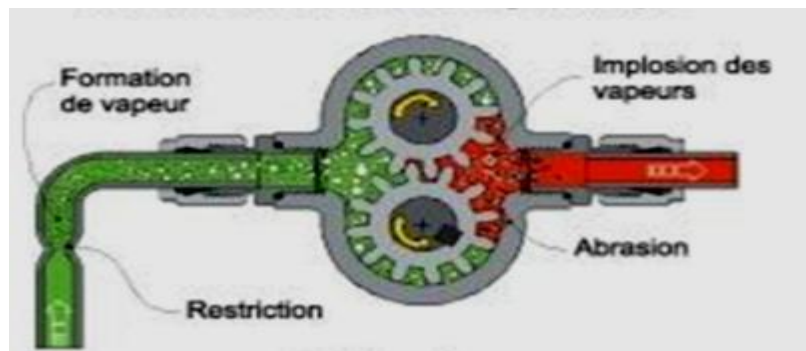


Figure 3. 9. Cavitation dans une pompe hydraulique.

6.1. Types de cavitation :

On rencontre donc une quantité de type de cavitation, dont certains particulièrement importants, ont fait l'objet de classification plus ou moins admises par la communauté spécialisée. Parmi les sous-classifications pouvant présenter un certain intérêt, consiste à considérer qui se produisent au sein du liquide et celles qui sont provoqués près des parois. Toutes les cavitations obtenues au sien d'un liquide impliquent la présence de tourbillons permanents ou non. Elles sont particulièrement sensibles au nombre de Reynolds:

- cavitation à haut nombre de Reynolds: l'inertie du liquide (sa mise en mouvement) ralentit l'expansion de la partie vapeur.
- cavitation à faible nombre de Reynolds: la viscosité du liquide limite la vitesse d'expansion.
- cavitation élastique : la résistance élastique du milieu et la tension de surface limitent la dilatation de la phase gazeuse.

Un autre sous classification possible, il convient de considérer deux grandes familles d'écoulements cavitants, la cavitation à structures séparées, qui nécessite la présence de germes pour se développer, et la cavitation quasi permanent, la cavitation à poches, par exemple, qui après avoir été initiée, s'auto-entretient par vaporisation du liquide environnement au travers d'une interface assez bien définie.

7. Défauts d'excentricité :

On parle d'excentricité dans une machine lorsqu'on est en face d'une uniformité de l'entrefer. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, l'usure des roulements, un déplacement du noyau statorique...etc. Lorsque cette excentricité s'accroît, la résultante des forces magnétiques radiales déséquilibrées (connue aussi sous le nom de traction magnétique déséquilibrée) peut causer un frottement entre le stator et le rotor, celui-ci à des conséquences néfastes sur le circuit magnétique et l'enroulement du stator et du rotor. On distingue deux principaux types d'excentricité qui peuvent apparaître dans les machines tournantes ; l'excentricité statique et l'excentricité dynamique.



Figure 3. 10. Défauts d'excentricité statique et dynamique.

On cite aussi dans la littérature l'excentricité axiale, ou plus généralement, à un non uniformité axiale de l'entrefer l'excentricité statique peut être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator, ou par un mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction.

Si l'assemblage arbre-rotor est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas. Une excentricité dynamique est due à une déformation ou un désalignement du rotor ou à un desserrage de barres rotoriques. Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas confondu avec son centre de rotation. Et par conséquent, la position de l'entrefer minimale change avec la position du rotor. Ce qui fait que l'excentricité dynamique dépend du temps et de l'espace, alors que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace. L'excentricité dynamique peut être provoquée par la flexion de l'arbre, l'usure des roulements, les défauts d'alignement entre le rotor et la charge, la résonance mécanique à la vitesse critique,.....etc. En réalité les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à

coexister. Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication.

CHAPITRE 4 :

Etude

Expérimentale

*Etude
Expérimentale*

1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse vibratoire (surveillance et diagnostic) pour étudier les phénomènes vibratoires apparus dans une machine tournante. Il faut savoir que les machines tournantes sont utilisées dans des domaines aussi variés que possible. Et puisque ces domaines sont variés, on distingue ainsi une variété de machines tournantes ayant différentes fonctions mais liées par des organes communs en rotation, parmi ces machines, on distingue : les machines hydrauliques ou pneumatiques, les machines électriques, et les machines mécaniques.

2. But du travail :

Le but de notre travail est d'étudier les comportements vibratoires des machines tournantes et diagnostiquer leurs états mécaniques. Dans notre pratique, nous disposons de méthode d'acquisition non permanente « on line » des indicateurs d'états les plus importants avec un collecteur de données portable ou un analyseur.

3. Les outils de mesures :

3.1. Description de système VIBROCAM 4000

Le VIBROCAM 4000 est un système modulaire destiné au diagnostic et à la maintenance des machines.

Grâce à différents composants matériels et logiciels, il répond à un grand nombre d'applications dans les domaines de protection et de la maintenance des machines comme, par exemple la mesure, la surveillance, l'exploitation ou l'affichage des paramètres importants, tout comme l'édition de rapports.

L'acquisition des mesures se fait en ligne ou hors ligne, à l'aide de différents appareils d'acquisition

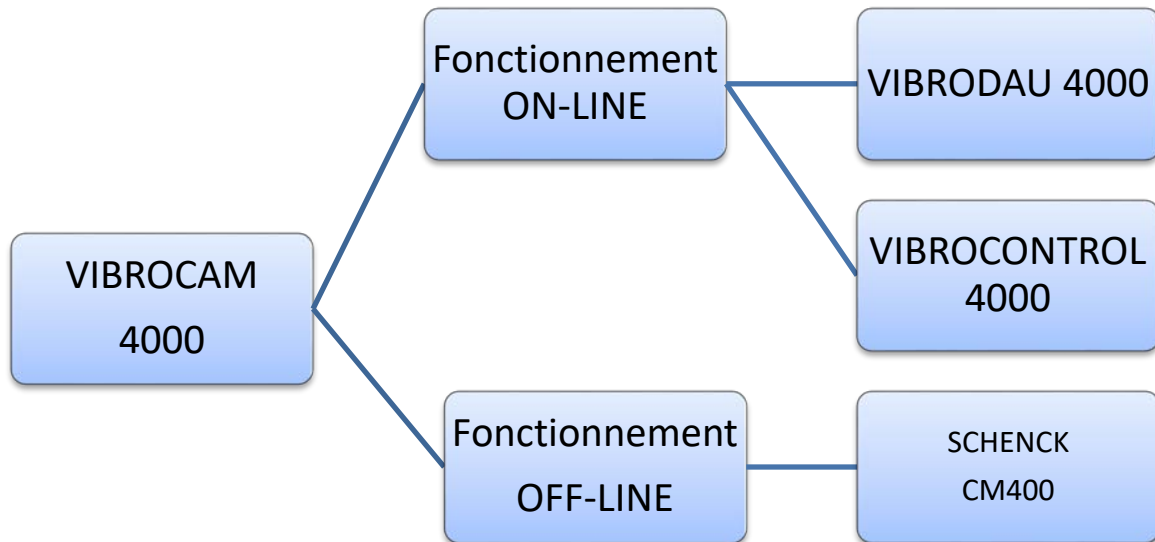


Figure 4. 1. Organigramme de VIBROCAM 4000.

a) Fonctionnement « « ON-LINE » »

A l'aide du système multivoies d'acquisition discontinue de données

VIBRODAU 5000. Le VIBRODAU 5000 est un système d'acquisition périodique et de traitement des données.

Les mesures globales obturé peuvent être traitées, à l'aide du logiciel d'exploitation CM400 .

- Mesure en bande large de vibration
- mesure d'état des roulements (BCU)
- Paramètres de procédé (pression, température, ... ect)
- vitesse de rotation

Le diagnostic peut être effectuée grâce aux fonctions suivants :

- Mesure d'un échantillon temporel
- Spectre en fréquence
- Amplitude et phase d'une mesure filtrée par exemple la 1^{ère} et le 2^{ème} harmonique

A l'aide du système modulaire d'acquisition continue de données VIBROCONTROL 4000. Le VIBROCONTROL 4000 est un système modulaire d'acquisition continue et de surveillance de données.

Les mesures globales suivantes peuvent être acquises et surveillance :

- Mesure en bande large de vibrations
- Mesure d'état des roulements (BCU)
- Vitesse et sens de rotation
- Fréquence et durée
- Position d'un arbre
- Déplacement d'un arbre
- Paramètres de procédé (pression, température, etc)



Figure 4. 2. Photo de système de control ON-LINE.

b) Fonctionnement « « OFF-LINE » »

Le service DIAGNOSTIC MACHINES de la centrale thermique de Cap Djinet utilise un système appelé SHINCK pour la maintenance conditionnelle (détections des défauts des machines tournantes à traverses les vibrations). Ces systèmes est composé d'un collecteur de données appelé VIBROTEST 60, qui permet de faire l'acquisition du signal vibratoire généré par les vibrations d'une machine. Les données acquises stockées dans la carte PCMCIA seront transmises, ver le logiciel VIBROEXPERT C M-400 qui fait le traitement du signal et l'analyse des tendances

3.2. Le VIBROTEST 60 :

Le VIBROTEST 60 est un appareil pratique de mesure des vibrations, permettant d'apprécier l'état des machines, d'établir les diagnostics des défauts dans le cadre de la maintenance

conditionnelle. Il peut être utilisé comme collecteur de données. Cet appareil réunit à la fois les fonctions d'analyse 'FFT', d'équilibrage et de collecte de données.

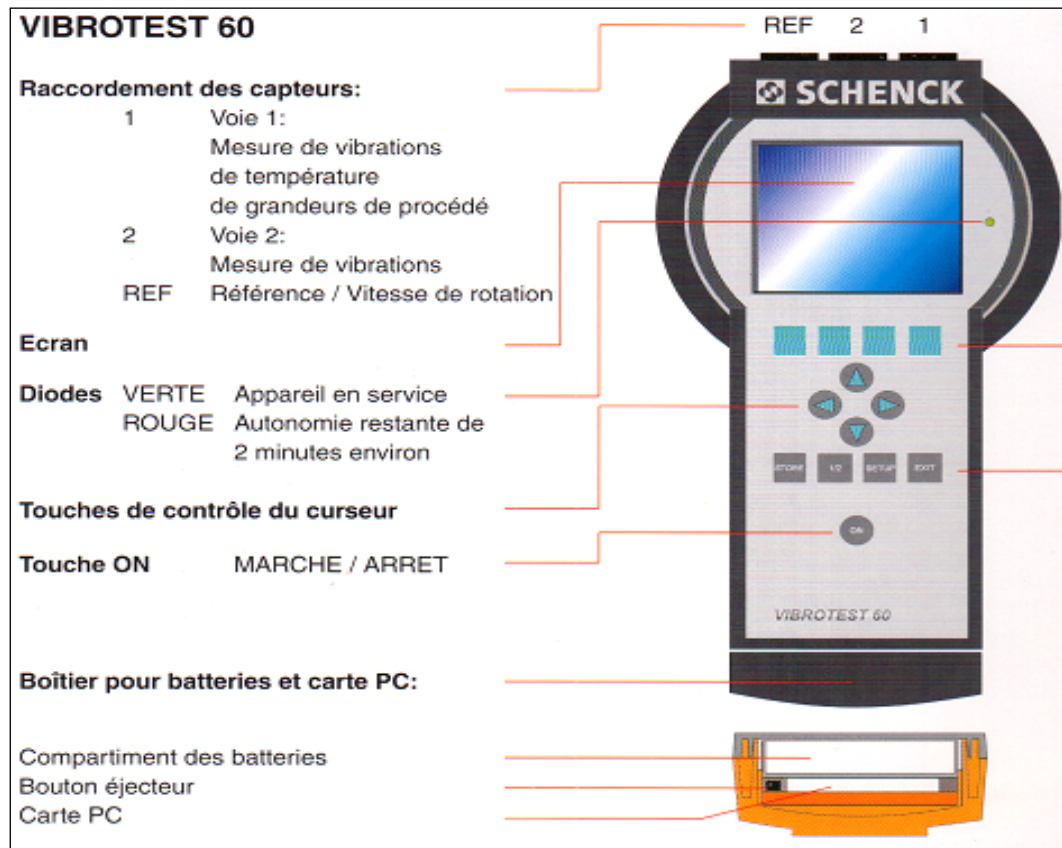


Figure 4. 3. Appareil de mesure de vibration VIBROTEST 60.

Caractéristique de l'appareil :

- Appareil bi voie avec mesure de la vitesse de rotation.
- Appareil portable (900 g).
- Nouvelle technologie de collecte de données.
- Traitement rapide et simultané des données (jusqu'à 5 données à la fois).
- Des routes de mesure multiples.
- Possibilité de basculer entre les fonctions analyseur, équilibreur et collecteur de données.
- Technologie de points de traitement numérique grâce à un processeur numérique (DSP).
- Précision élevée grâce au convertisseur 'CAN' 16 bits.
- Bonne résolution pour les spectres en fréquence (jusqu'à 12800 lignes).

- Possibilité d'utilisation d'une variété de capteurs d'accélération, de vitesse et de déplacement vibratoire.

3.3. Capteur de vibrations (Accéléromètre) :

L'accéléromètre AS-065 est utilisé pour la mesure de l'accélération vibratoire. Il est raccordé au collecteur analyseur VIBROTEST 60.

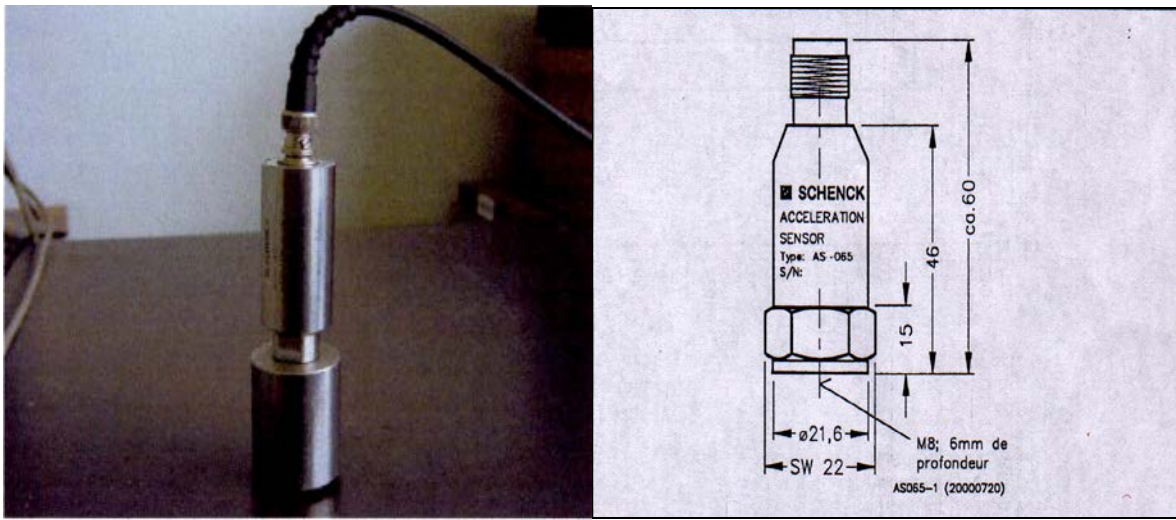


Figure 4. 4. Accéléromètre.

3.4. Logiciel d'analyse de diagnostic vibratoire « VIBROEXPERT CM-400 » :

VIBROEXPERT CM-400 est un élément du système VIBROCAM 4000. Ce système est un logiciel tournant sur Plateforme **WINDOWS** conçu pour traiter les données de vibration recueillies sur les machines tournantes ou les structures. Il permet la comparaison des spectres ainsi qu'une meilleure visualisation des signaux dynamiques. Plusieurs analyseurs mono et multivoies sont supportés par **VIBROEXPERT**.

Parmi les caractéristiques intéressantes du logiciel figurent l'archivage des fonctions multivoies (réponse en fréquence, cohérence, spectre croisé), le post-traitement des données (**cepstre**, profils de rouleaux et d'engrenages) et la possibilité d'écouter les signaux sur le haut-parleur du PC.

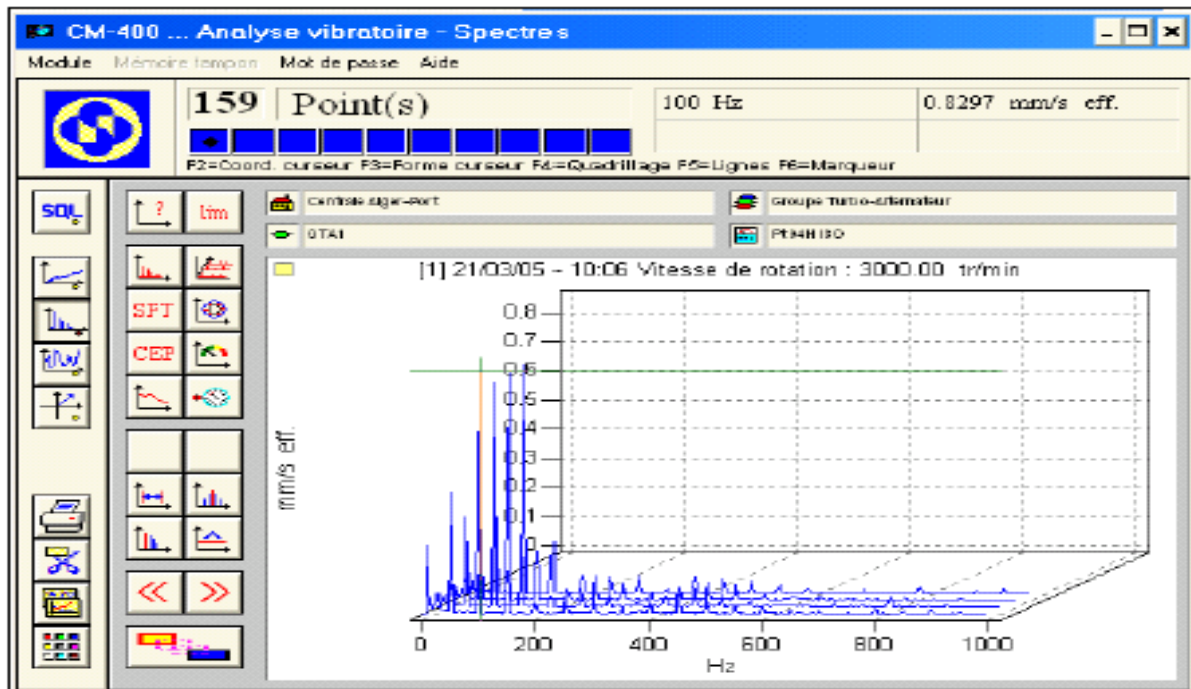


Figure 4. 5. VIBROEXPERT CM-400.

Caractéristiques :

- Accepte les données de plusieurs analyseurs (mono et multivoies) et collecteurs de données
- Fonctions de visualisation avancées incluant plusieurs types de curseurs, conversion des unités, Kurtosis et facteur de crête, représentation 3D et matricielle des spectres, profil.
- Calcul de plusieurs fonctions et grandeurs liées au signal vibratoire (filtrage, démodulation, cepstre).
- Permet aussi d'archiver les fonctions multi-voies (réponse en fréquence, orbites, cohérence et autres).

Avantage :

- Flexible à l'utilisation.
- Un seul logiciel est requis pour traiter l'information de plusieurs instruments différents.
- Facilite, accélère et améliore l'interprétation des données de vibration
- Augmente les capacités d'analyse.
- Pratique pour les études de cas difficiles ou les applications en analyse structurelle.
- Compatible avec d'autres logiciels d'analyse ou d'animation structurelle.

4. Partie manipulation :

4.1. Les points de mesures :

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

On essaie de rapprocher les plus possible les points de mesure des paliers, cela nous a permis d'obtenir des images les plus fidèles des défauts mécaniques.

Chaque palier du GTA à trois capteurs de mesure :

- Palier avant le corps HP : deux capteurs absolues et un capteur relative ;
- Palier après HP et avant MP : deux capteurs absolues et un capteur relative ;
- Palier après MP et avant BP : deux capteurs absolues et un capteur relative ;
- Entre les corps BP et l'alternateur, on a deux paliers, tels que chaque palier comporte relative ;
- Palier après l'alternateur et avant l'excitatrice : deux capteurs absolues et un capteur relative ;
- Palier entre l'excitatrice : deux capteurs absolues et un capteur relative.

Les capteurs absolus sont des accéléromètres qui servent à mesurer les vibrations absolues des paliers, par contre les capteurs relatifs sont des proximités (capteur à courant de Foucault) servent à mesurer les vibrations relatives.

Et pour avoir une image vibratoire complète des vibrations. On a pris les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque palier du groupe turboalternateur : les trois directions possibles sont verticales, horizontale, axiale. Ces mesures sont faites par le VIBROTEST 60.

Les mesures sont faites à l'aide de VIBROTEST 60 (principe de mesure).

Les mesures sont faites sur trois positions : axiale, horizontale et verticale

Le traitement de ces signaux se fait à l'aide d'un logiciel s'appelle CM-400.

Remarque : malheureusement on ne peut pas accéder pour mesure les vibrations au niveau de palier 7, si pour cette raison on a fait des mesures que sur six palier.

Les positions des mesures

Position (1) : horizontale

Position (2) : verticale

Position (3) : axiale

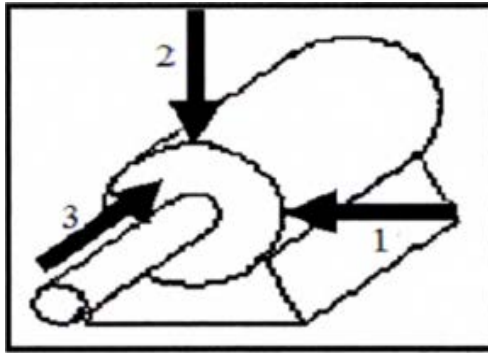


Figure 4. 6. Les positions des mesures.

4.2. Matériel utilisé dans l'équilibrage :

a) OROS séries 3

Ces des analyseurs adaptés pour mesure des bruits et des vibrations. De 2 à 32 voies, ces instruments complets permettent des analyses précises en temps réel. Associés à un enregistreur autonome sur disque dur, intégré dans leur châssis, ces analyseurs se positionnent comme la référence des instruments portables pour professionnels [7].



Figure 4. 7. Les différentes capacités de matériel OROS (2 à 32 voies).

Les domaines exigeants sont **L'automobile, l'aéronautique, l'énergie et l'industrie** : de plus en plus de mesures dans des laps de temps de plus en plus courts. OROS propose des analyseurs de bruit et de vibration conçus et fabriqués à partir des technologies les plus modernes. Nous avons précisé le domaine de l'industrie

b) Avantage et Inconvénient de ce système

Avantage	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> -Ces analyseurs permettent de réaliser les mesures sur site. -Ces instruments surmontent la plupart des obstacles grâce à leur large éventail de fréquences du milli hertz à 40 kHz et leur gamme dynamique étendue de 140 dB. -Jusqu'à 40 kHz, l'analyse FFT fournit une analyse spectrale haute résolution. - ces analyseurs en peu content come un système ON-LINE come en peu conte come un système OF-LINE -L'enregistreur intégré autonome s'assure du stockage exact des données 	<ul style="list-style-type: none"> -Ce système est équipé d'une batterie externe, donc il y a un problème de déchargement de batterie. - Capacité d'enregistrement petite par a pour à les calculs de la FFT (si pour ça que la capacité maximale d'enregistrement est 100000 dernière points mesuré)

Tableau 4. 1. représentation des principaux avantages et inconvénients de l'OROS [9].

c) Logiciel associe avec OROS est le NVGate

NVGate est le logiciel fondamental pour toutes vos mesures. IL utilise pendant tout le processus de mesure, de l'acquisition de données jusqu'au rapport. IL garde la même interface pour l'enregistrement, la post-analyse, les applications avancées et pour chaque mode d'analyse [7].

4.3. Normes des vibrations :

Dans la surveillance il y'a des notions ou bien des Norme à suivre

Paliers	Paliers Turbine HP MP BP Exct				Paliers Alter Exct				Observation
	Alarme		Déclanchement		Alarme		Déclanchement		
	μm	mm/s	μm	mm/s	μm	mm/s	μm	mm/s	
Absolute palier	35	11	45	14,13	50	15,70	70	22	Déclanchement par protection vibratoire
Absolute arbre	120	37,68	200	62,80	Ceux de générateur non installé				Déclanchement volontaire par arrêt d'urgence
Relative arbre (x, y crête à crête)	160	/	240	/	Ceux de générateur non installé				

Tableau 4. 2. Les valeurs d'alarme et déclenchement pour cette turbine.

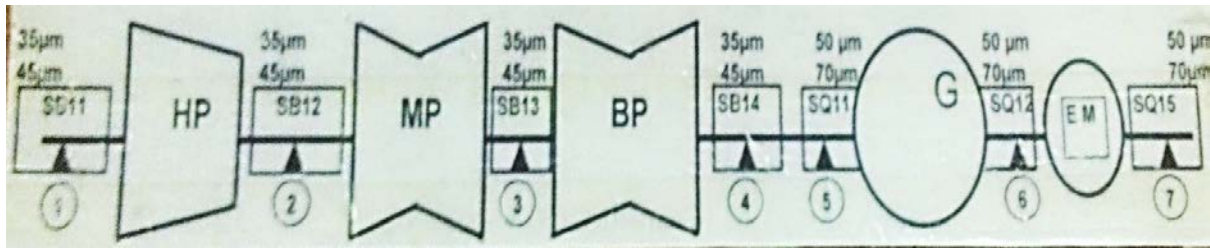


Figure 4. 8. Représentation des sept paliers de GTA.

4.4. Les opérations et les résultats :

Analyse basses fréquences (jusqu'à 2KHz) : Toutes les valeurs ont été relevées à la vitesse de 3000RPM.

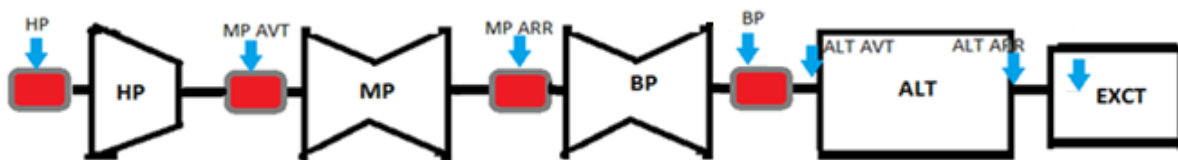


Figure 4. 5. Emplacement Des Capteurs.

Vibrations Absolue Selon La Norme ISO10816-2 :

Répartition en zone pour 3000 Tr /min	Vibration absolue d'arbre En mm /s eff	Explication selon ISO
A	< 3,8	Machine neuve
B	3,8 > valeur < 7.5	Service autorisé
C	7.5 > valeur < 11.8	Durée limité autorisé
D	>11.8	Endommagement possible de la machine

Tableau 4. 3. Classement des vibrations selon le danger d'après la norme ISO.

Tout si norme on est obligé à suivre pour une bonne surveillance de la machine. Dans ce chapitre en a étudié une balourd (avant l'équilibrage et après l'équilibrage). Cette Analyse ce fait à basse fréquence (jusqu'à 2KHz), Toutes les valeurs ont été relevées à la vitesse de 3000Tr /min.

16/12/2015		Vibration Globale Oros			Système T3000 Siemens		
Régime	Paliers	V (mm/s eff)	H (mm/s eff)	A (mm/s eff)	Relatif Arbre (X)	Relatif Arbre (Y)	Absolue Arbre
A80 MW	HP	1.35	2.37	1.72	152	118	/
	MP Av	1.02	0.99	0.49	200	114	/
	MP Ar	2.39	0.53	0.75	39	25	/
	BP	3.02	1.12	10.6	49	45	/
	Alt Av	2.75	1.62	1.33	Non installé		/
	Alt Ar	1.86	1.48	1.24			/
	Exct		1.42	2.04	1.78	89	59

Tableau 4. 4. Les résultats de premières mesures à 80 MW.

Les valeurs vibratoires obtenues sur les paliers 1, 2 et 3 sont élevées, atteignant la valeur de déclenchement en relative et absolue arbre. Sauf dans le cas où il n'y avait que les masses d'essai des paliers 3 et 4 (**démarrage de 05/09/2016**) dont on a observé une amélioration des valeurs vibratoires sur le palier 3 qui ne dépasse pas les 80µm en relative et absolu.

5. Comportement vibratoire de GTA avant l'intervention :

5.1. Démarrage 06/09/2016 sans masse (comme démarrage d'essai) :

Régime	Paliers	Oros	Système T3000 Siemens			
		V (mm/s eff)	Relative arbre µm (X)	Relative arbre µm (Y)	Absolu arbre µm	Absolu Palier µm
06/09/2016 à 16h40						
A Vide	Palier 1 (HP)	2.49	116	123	122	5.5
	Palier 2 (HP-MP)	4.37	221	135	226	5
	Palier 3 (MP-BP)	4.56	208	128	220	12.6
	Palier 4 (BP-Alter)	3.81V/4.92A	113	43	121	7.8
	Palier 5 Alter Avant	4.55	/	/	/	9.4
	Palier 6 Alter Arrière	5.16	/	/	/	17.4
	Palier 7 Excitatrice	5.97V/1.86H	112	37	115	3.1
06/09/2016 à 17h25						
	Palier 1 (HP)	2.95	113	101	116	2.7
	Palier 2 (HP-MP)	2.37	172	101	175	2.8
	Palier 3 (MP-BP)	4.4	152	80	163	10.2

A70 MW	Palier 4 (BP-Alter)	2.74V/13.2A	50	43	54	4
	Palier 5 Alter Avant	3.43	/	/	/	9.5
	Palier 6 Alter Arrière	4.07	/	/	/	13.5
	Palier 7 Excitatrice	10.54A/3.11H	94	39	98	4
06/09/2016 à 18h25						
A 70 MW	Palier 1 (HP)	3.7	148	139	152	3.7
	Palier 2 (HP-MP)	3.65	216	117	220	3.2
	Palier 3 (MP-BP)	4.5	148	70	158	9.1
	Palier 4 (BP-Alter)	2.6V/13.71A	64	41	67	3
	Palier 5 Alter Avant	3.7	/	/	/	10.1
	Palier 6 Alter Arrière	4.15	/	/	/	14
	Palier 7 Excitatrice	3.17H/11.6A	82	35	87	4.6
Après une dégradation remarquable des vibrations absolues arbre du palier 02 (220µm) un abaissement de charge été effectuer						
06/09/2016 à 18h55						
A 50 MW	Palier 1 (HP)	4.55	199	83	203	3.1
	Palier 2 (HP-MP)	4.6	237	96	241	3.4
	Palier 3 (MP-BP)	4.66	148	60	159	10.1
	Palier 4 (BP-Alter)	2.24V/11.6A	50	47	52	2
	Palier 5 Alter Avant	3.66	/	/	/	8.6
	Palier 6 Alter Arrière	4.21	/	/	/	13.6
	Palier 7 Excitatrice	4.2H/14.72A	74	33	78	4.6
NB : une dégradation remarquable des vibrations absolues arbre du palier 01 et 02 (203µm, 241µm) ce qui provoque un déclenchement volontaire par arrêt d'urgence						

Tableau 4. 5. Les mesures effectuées sans masse d'essai.

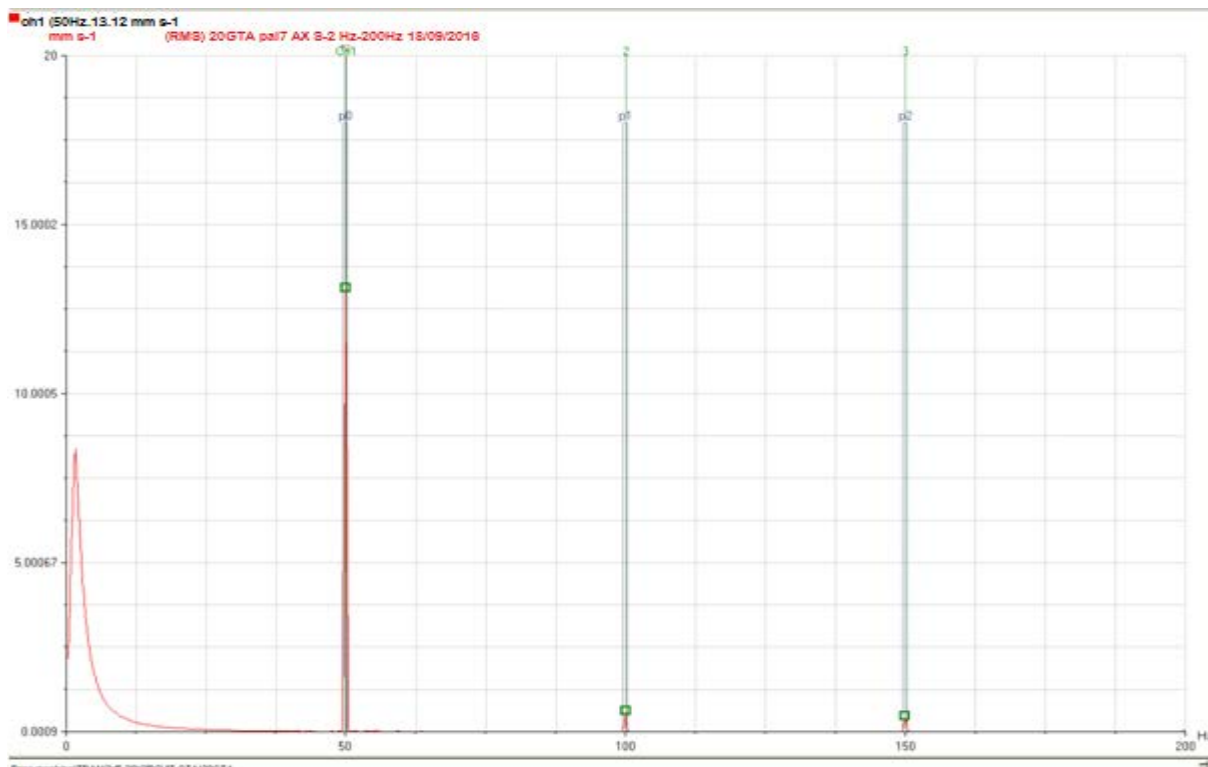


Figure 4. 6. Spectre axial de défaut.

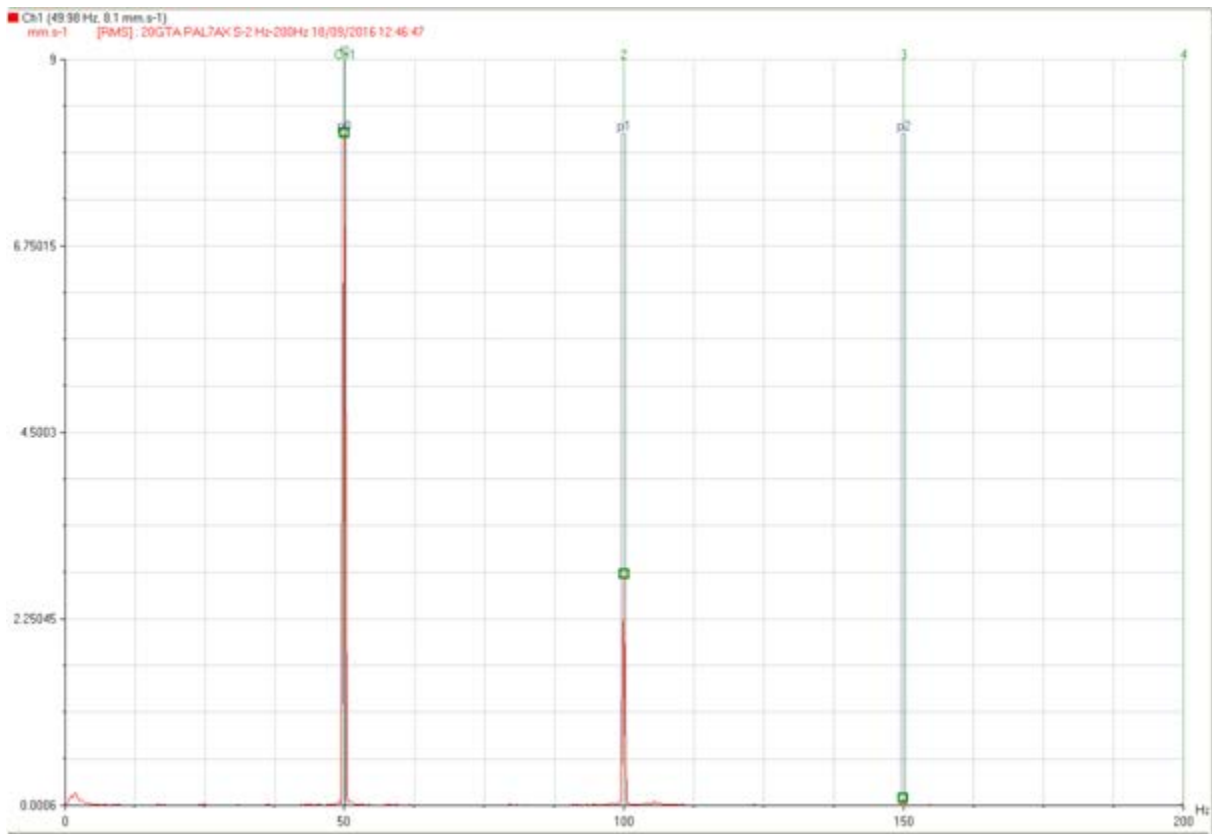


Figure 4. 7. Spectre vertical de défaut.

6. Comportement vibratoire de GTA après l'intervention :

6.1. Démarrage 25/03/2018 avec 14 masses des deux côtés du corps MP en opposé :

Les agents de siemens ajoutent dans ce démarrage une masse d'essai de 680g au niveau palier 02(+P) et 666g au niveau palier 03(+P) a la même position (sur le rotor MP)

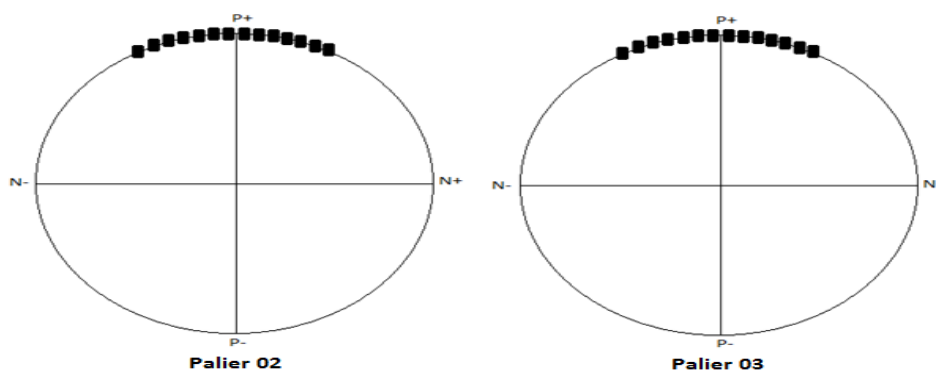


Figure 4. 8. La position des 14 masses en corps MP.

Régime	Paliers	Oros	Système T3000 Siemens			
		V (mm/s eff)	Relative arbre μm (X)	Relative arbre μm (Y)	Absolu arbre μm	Absolu Palier μm
25/03/2018 à 09h56						
A Vide	Palier 1 (HP)	/	89	77	93	4.4
	Palier 2 (HP-MP)	/	128	98	131	3
	Palier 3 (MP-BP)	/	162	108	171	9.2
	Palier 4 (BP- Alter)	/	82	29	88	6.8
	Palier 5 Alter Avant	/	/	/	/	10.3
	Palier 6 Alter Arrière	/	/	/	/	15.9
	Palier 7 Excitatrice	/	124	46	128	4.2
25/03/2018 à 10h35						
A110 MW	Palier 1 (HP)	1.88	91	87	93	1.7
	Palier 2 (HP-MP)	1.16	93	80	95	1.8
	Palier 3 (MP-BP)	3.44	133	78	140	7.5
	Palier 4 (BP- Alter)	3.36V/11.3A	36	33	42	5.8
	Palier 5 Alter Avant	3.29	/	/	/	9.4
	Palier 6 Alter Arrière	4.2	/	/	/	13.7
	Palier 7 Excitatrice	2.82H/9.32A	94	35	98	4
25/03/2018 à 11h05						
A130 MW	Palier 1 (HP)	3.84	71	123	72	3.2
	Palier 2 (HP-MP)	1.42	83	115	84	1.8
	Palier 3 (MP-BP)	3.22	133	90	139	6.2
	Palier 4 (BP- Alter)	3.34V/13.8A	62	39	65	5.6
	Palier 5 Alter Avant	3.29	/	/	/	10.5
	Palier 6 Alter Arrière	4.21	/	/	/	14.3
	Palier 7 Excitatrice	2.42H/12.4A	90	37	95	4.7
25/03/2018 à 12h00						
A150 MW	Palier 1 (HP)	3.51	61	133	65	3.8
	Palier 2 (HP-MP)	1	57	113	61	2.1
	Palier 3 (MP-BP)	3.43	142	106	149	6.3
	Palier 4 (BP- Alter)	3.51V/14A	74	49	78	4.8
	Palier 5 Alter Avant	3.37	/	/	/	11.2
	Palier 6 Alter Arrière	4.46	/	/	/	14.6
	Palier 7 Excitatrice	3.82H/16.3A	80	33	85	5.4

Tableau 4. 6. Les mesures effectuées après les 14 masses à différent régimes.

- ✓ Une amélioration remarquable de la vibration relative arbre direction X et absolu arbre au niveau des paliers 1 et 2 (HP, HP-MP). Mais le palier 3 (MP-BP) reste toujours en alarme avec une valeur fixe de **130µm à 140µm** en absolu arbre en fonction de la charge.
- ✓ En absolu palier (Oros globale) : On remarque une valeur vibratoire élevée au niveau du palier 4 (BP-Alter) en direction axiale qui atteint les **14 mm/s** et au niveau du palier 7 (Exct) qui atteint les **16.3 mm/s**.

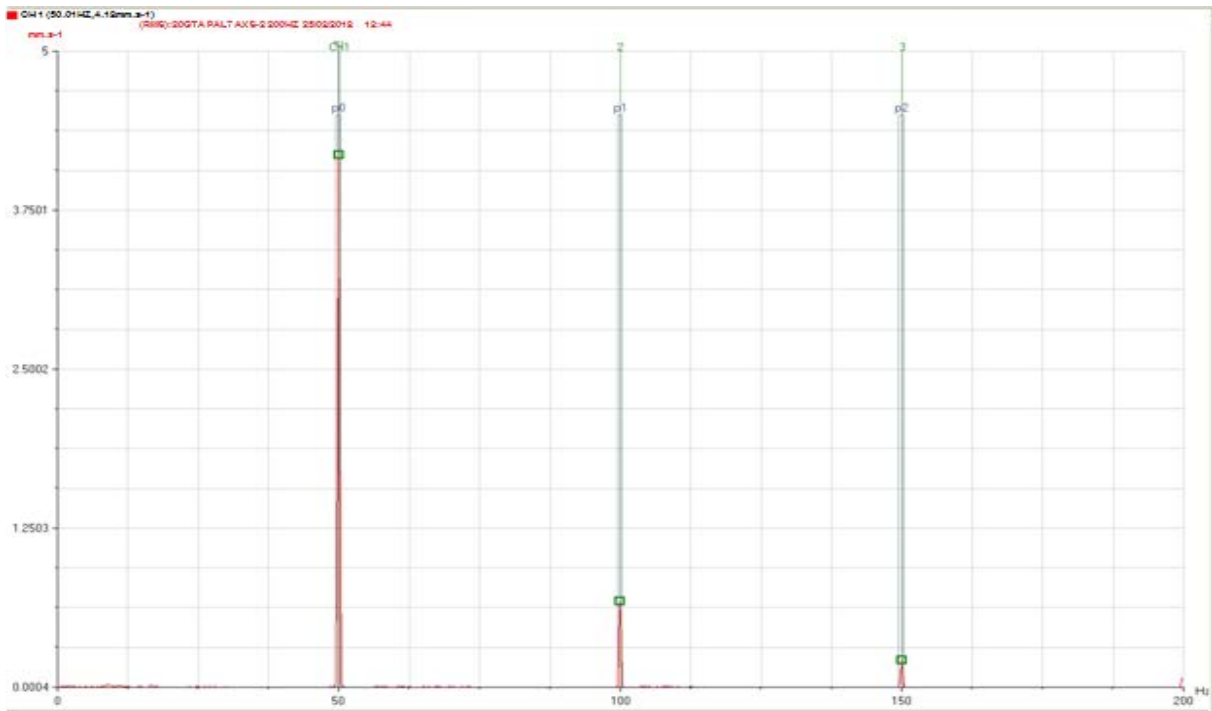


Figure 4. 9. Spectre en axial de défaut.

6.2. Démarrage 02/04/2018 avec une masse de correction :

Les agents de siemens ajoutent 333g au palier 02 (-N) et 592g au palier 03 à la position (+P) (sur le rotor MP)

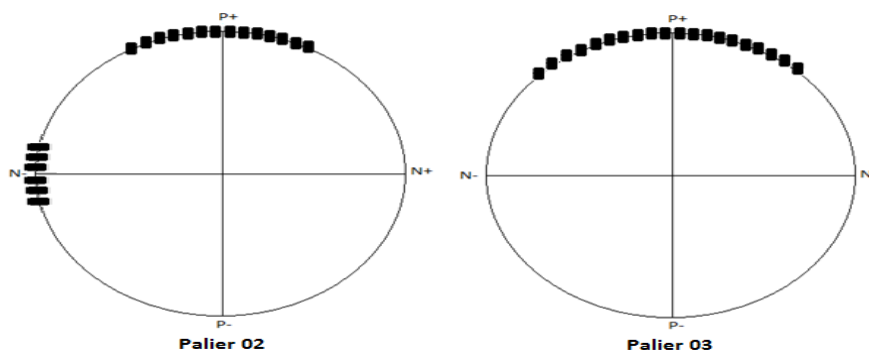


Figure 4. 10. Positionnements des masses de correction.

Régim e	Paliers	Oros	Système T3000 Siemens			
		V (mm/s eff)	Relativ e arbre µm (X)	Relative arbre µm (Y)	Absolu arbre µm	Absolu Palier µm
02/04/2018 à 09h45						
A Vide	Palier 1 (HP)	2.31	130	91	137	6.7
	Palier 2 (HP-MP)	2.06	142	133	147	8.4
	Palier 3 (MP-BP)	3.08	158	106	168	9.6
	Palier 4 (BP- Alter)	3.81V/6.97A	123	62	131	8.1
	Palier 5 Alter Avant	3.7	/	/	/	9.4
	Palier 6 Alter Arrière	4.68	/	/	/	16.2
	Palier 7 Excitatrice	1.66H/3.6A	100	41	103	4
02/04/2018 à 10h49						
A 100 MW	Palier 1 (HP)	2.73	89	89	91	2.3
	Palier 2 (HP-MP)	1.58	83	74	84	2
	Palier 3 (MP-BP)	1.99	105	60	110	5.3
	Palier 4 (BP- Alter)	3.6V/11.91A	58	25	64	7.1
	Palier 5 Alter Avant	3.1	/	/	/	9.2
	Palier 6 Alter Arrière	4.2	/	/	/	14
	Palier 7 Excitatrice	3.11H/10.6A	90	36	93	3.8
02/04/2018 à 11h40						
A148 MW	Palier 1 (HP)	2.76	67	131	70	3.2
	Palier 2 (HP-MP)	1.25	65	103	67	2
	Palier 3 (MP-BP)	2.14	115	76	119	4.4
	Palier 4 (BP- Alter)	3.7V/14.63A	75	37	76	6.4
	Palier 5 Alter Avant	3.06	/	/	/	10.4
	Palier 6 Alter Arrière	4.46	/	/	/	15.4
	Palier 7 Excitatrice	3.83H/14A	90	37	94	4.3

Tableau 4. 7. Les mesures effectuées après les masses de correction à différents régimes.

- ✓ Une amélioration remarquable de la vibration relative arbre direction X et absolue arbre au niveau des paliers 3(MP-BP), mais reste toujours en voisinage de l'alarme avec une valeur qui varie de 110µm à 120µm en absolu arbre en fonction de la charge.
- ✓ En absolu palier (Oros globale) : on remarque une valeur vibratoire élevée au niveau du palier 4 (BP-Alter) en direction axiale qui atteint les 14.6 mm/s et au niveau du palier 7 (Exct) qui atteint les 14mm/s.

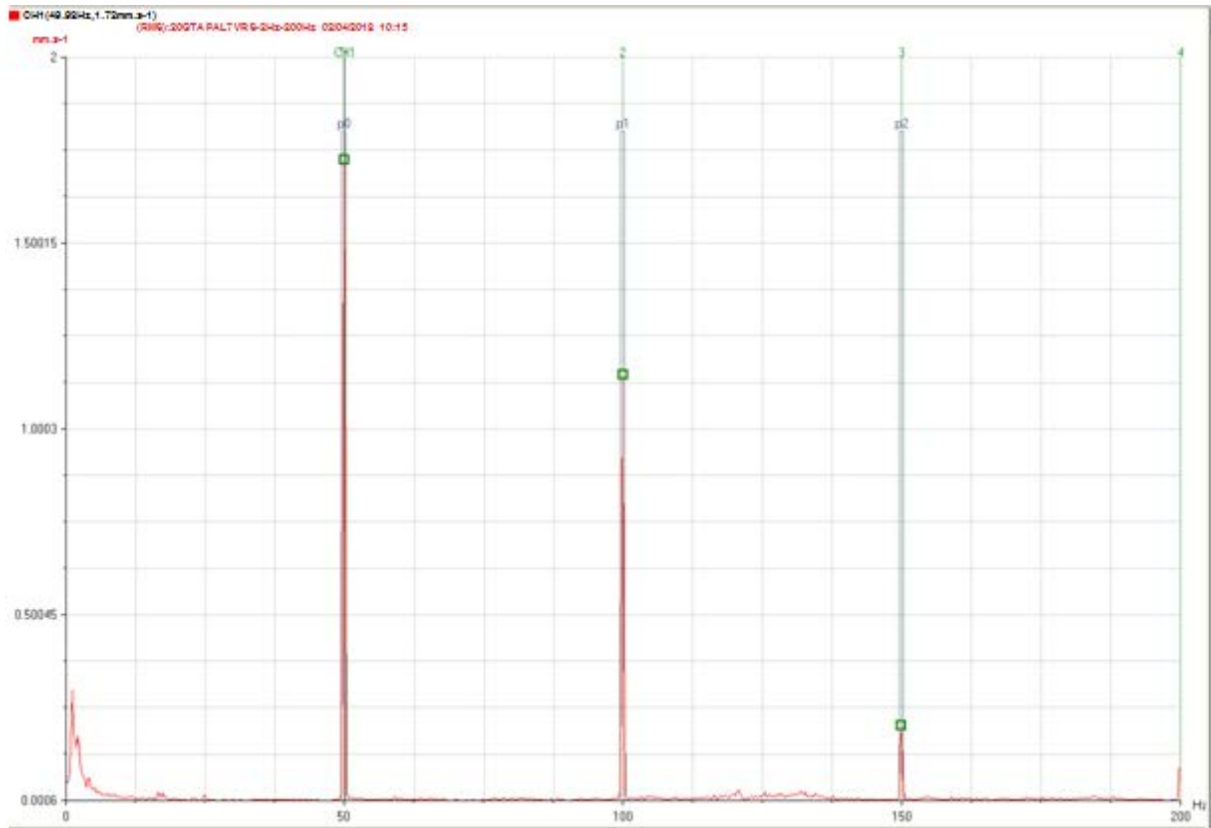


Figure 4. 11. Spectre vertical de défaut.

7. Conclusion :

Compte tenu des résultats obtenus et des analyses effectuées en régime transitoire et stabilisé (3000tr/min) et en différent régimes de charge, le comportement vibratoire du groupe 10 de la centrale de Ras Djinet est considéré comme :

- **ADMISSIBLE** conformément aux spécifications de la norme internationale ISO 10816 pour ce type de machines, sur toute la ligne d'arbre et selon les mesures absolues palier.
- Une dégradation des vibrations relatives en fonction de la charge du palier HP a été enregistrée, et atteignant 151 μm à 100 MW, qui est classé à la limite de la zone B (au voisinage du seuil d'alarme) selon la norme **ISO10816-2**.

Par ailleurs, malgré les différentes tentatives d'équilibrage effectuées par le spécialiste SIEMENS, nous remarquons que les niveaux des vibrations relatives restent toujours élevés et instables selon l'ordre d'ouverture des soupapes au niveau du palier HP.

À cet effet ; nous recommandons :

- une inspection adéquate sur la régulation des soupapes pour détecter l'origine du défaut.
- une surveillance en continu du comportement vibratoire du groupe durant leur exploitation.

Conclusion générale :

Au terme de ce mémoire, qui synthétise le projet de fin d'études de notre cursus universitaire au sein du département de génie mécanique de la faculté des sciences appliquées de l'université de boumerdes, le fait de traiter une problématique issue du milieu professionnel et industriel nous a donné l'occasion d'acquérir et de renforcer nos connaissances sur les réalités économiques et techniques du pays. En outre, le thème traité par notre projet de fin d'études nous a facilités en tant qu'étudiant l'intégration progressive dans notre future cadre de travail

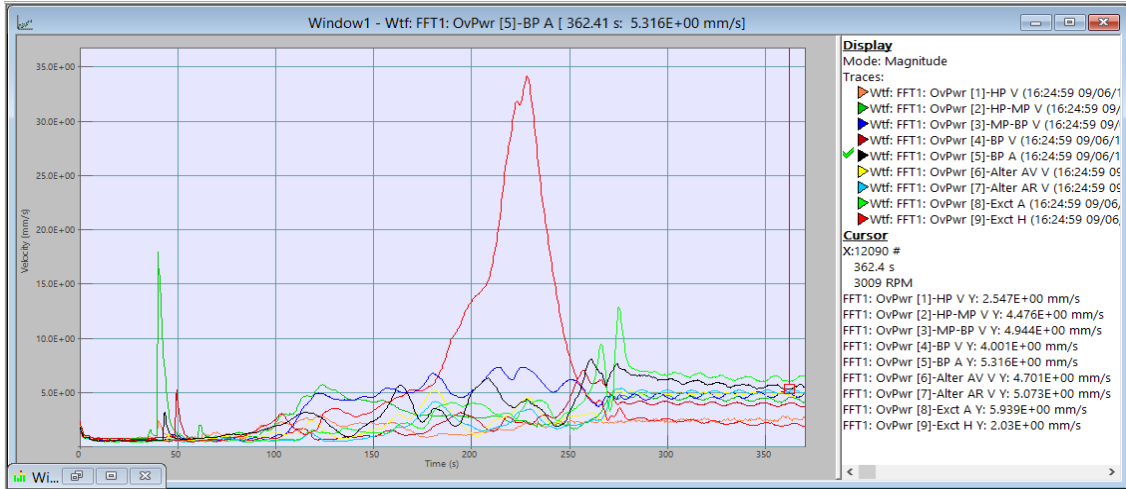
D'après tout ce que nous venons de démontrer, il en sort de notre analyse que le contrôle des machines tournantes par analyse vibratoire offre des outils efficaces qui nécessite une compétence particulière de l'opérateur. Cette analyse permet d'augmenter la durée de vie de l'équipement, de mieux gérer le stock des pièces de rechanges. L'analyse vibratoire est la technique la plus répandue pour la maintenance conditionnelle des machines tournantes, éléments essentiels au cœur de processus de fabrication. Les mesures réalisées sur les machines en fonctionnement sont faciles à mettre en œuvre et la technique permet une détection précoce de la plupart des défauts rencontrés sur les machines tournantes. Une bonne pratique de la maintenance conditionnelle permet d'alléger les coûts de maintenances systématiques et correctives en remplaçant les organes défectueux avant la casse

Dans le but d'augmenter d'avantage la production et d'améliorer la qualité et l'efficacité du service maintenance, l'analyse vibratoire sert à assurer la disponibilité des groupes de production de la SPE RAS DJENAT.

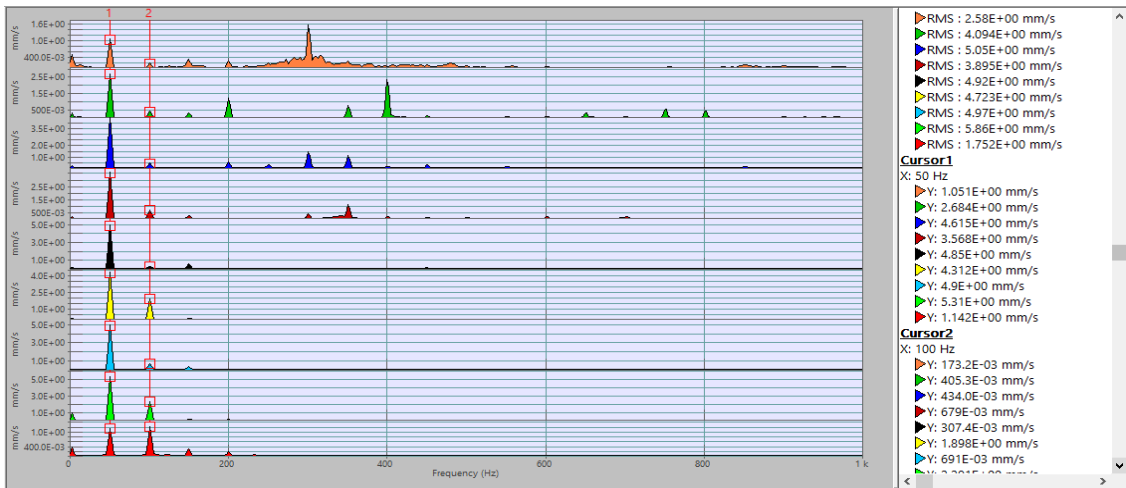
Références bibliographique :

- [1] Notions techniques sur les centrales thermiques. Fonctionnement de l'Alternateur. Edition 2, septembre 1967
- [2] Notions techniques sur les centrales thermiques. L'Alternateur. Edition 2, aout 1968
- [3] A. BOULENGER, C. PACHAUD : « Diagnostic vibratoire en maintenance préventive » (Dunod, Paris, octobre 1999).
- [4] C. CAPDESSUS, Aide au diagnostic des machines tournantes par Traitement du signa Thèse INP Grenoble, 1992
- [5] ABA. A, « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle,
- [6] RAHMI FAHIM et HAMAD MAKHLOUF, Suivi et analyse vibratoire du groupe turboalternateur par le système ON-LINE Mémoire de fin d'étude (2006/2007)
- [7] Alain Boulenger, Christian panchaud, Surveillance des machines par analyse de vibrations, Préface de Claude Pichot ,2e tirage 1998 (AFNOR).
- [8] LandolsiFoued, « Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire ».
- [9] <http://www.usinenouvelle.com/expo/analyseur-de-bruit-et-vibrations-oros-p15501.html>
- [10] Bdirina El khansa, « Diagnostic de défauts d'engrenage par l'analyse vibratoire » Thèse de Magistère en Génie électronique (2006)
- [11] Omar DJEBILI ; « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement ». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne (2013).
- [12] KWU Service Formation Professionnelle. Référence de section 5520 (turbine à vapeur).

- Démarrage initial sans masse d'essai le 06/09/2016 :
- Les valeurs globales à vide



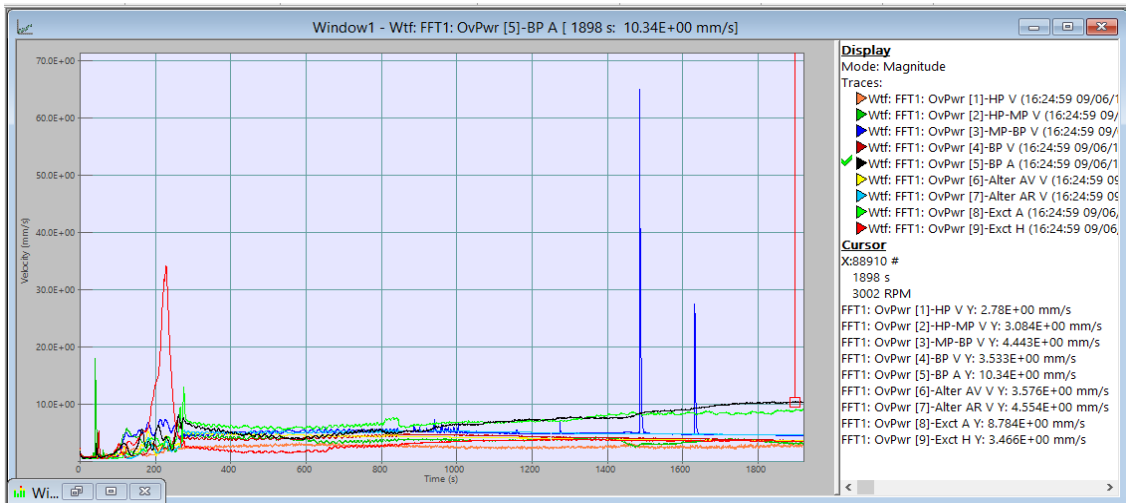
- Analyse spectrale à vide



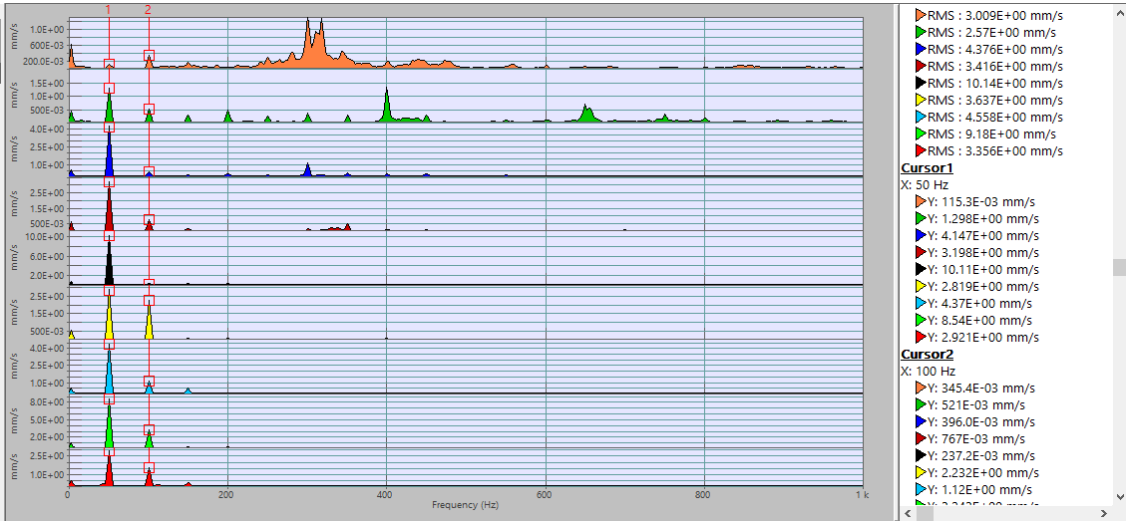
- Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à vide

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)
714.7 E-03 mm/s	268.7 °	2.714E+00 mm/s	128.5 °	3.947E+00 mm/s	229.9 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase)
3.406E+00 mm/s	149.2 °	4.721E+00 mm/s	31.16 °	3.981E+00 mm/s	296.2 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)
4.94 E+00 mm/s	108.9 °	5.33 E+00 mm/s	4.21 °	182.6E-03 mm/s	262.8 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)
534.2 E-03 mm/s	3.283 °	724.0 E-03 mm/s	263 °	795.5 E-03 mm/s	345.3 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)
749.4 E-03 mm/s	25.95 °	1.944E+00 mm/s	169.7 °	928.5 E-03 mm/s	216.5 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)
2.45 E+00 mm/s	319.8 °	2.499E+00 mm/s	No signal	4.376E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)
4.563E+00 mm/s	No signal	3.818E+00 mm/s	No signal	4.925E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)
4.551E+00 mm/s	No signal	5.166E+00 mm/s	No signal	5.973E+00 mm/s	No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)
1.322E+00 mm/s	92.09 °	1.205E+00 mm/s	98.4 °	1.868E+00 mm/s	No signal

• Les valeurs globales à 50 MW



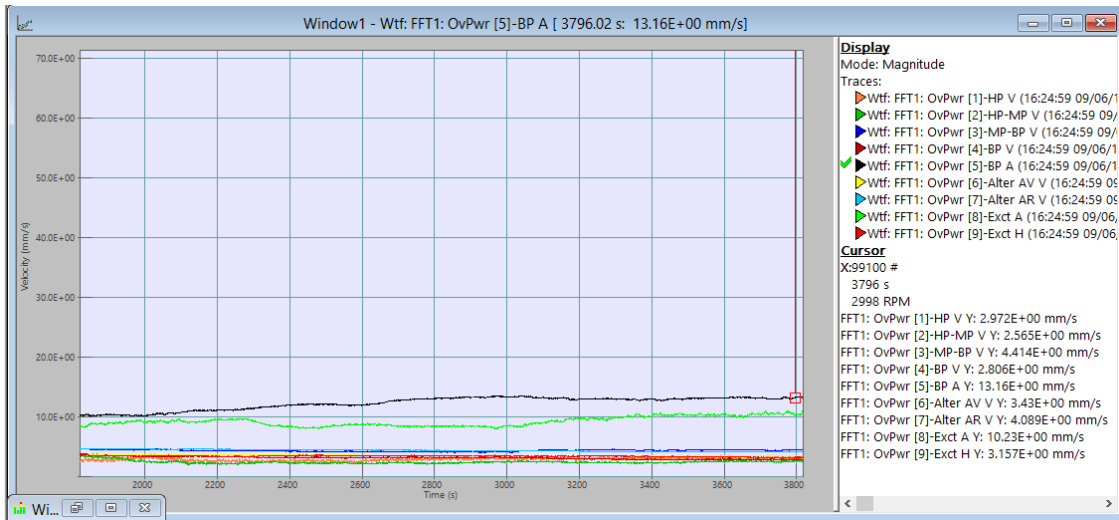
• Analyse spectrale à 50 MW



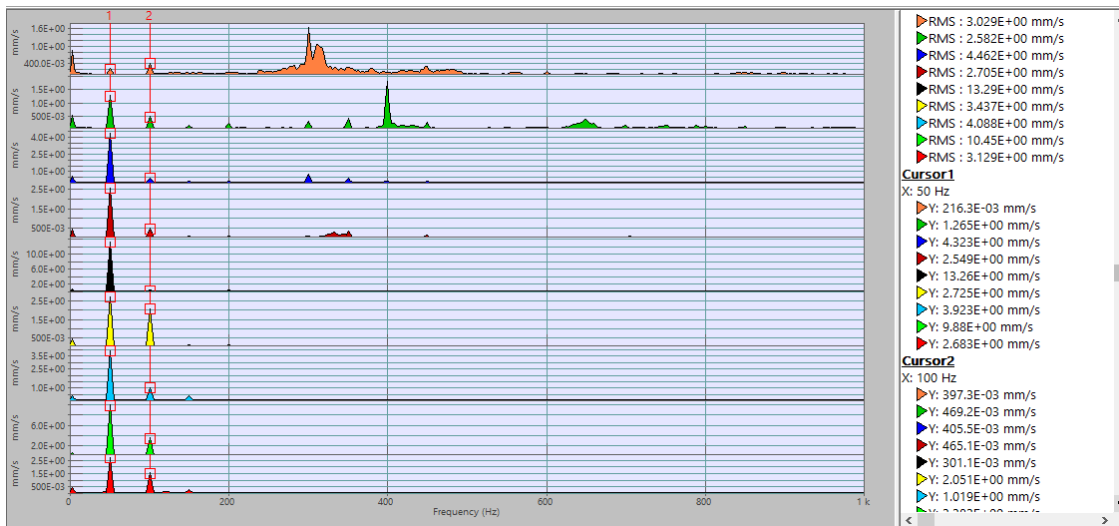
• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 50 MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude) 119.8 E-03 mm/s	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase) 341.9 °	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude) 1.328E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase) 120.7 °	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude) 4.122E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase) 227.9 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude) 3.137E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase) 116 °	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude) 10.1 E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase) 16.28 °	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude) 2.823E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase) 289.8 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude) 4.359E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase) 96.6 °	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude) 8.609E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase) 332.9 °	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude) 382.7E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase) 75.34 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude) 539.7E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase) 345.7 °	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude) 416.7 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase) 304.2 °	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude) 756.3 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase) 286.4 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude) 363.8 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase) 75.04 °	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude) 2.221E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase) 153.4 °	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude) 1.111E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase) 160.1 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude) 3.203E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase) 321.9 °	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude) 3.282E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude) 2.388E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase) No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude) 4.331E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude) 3.295E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude) 10.13E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase) No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude) 3.604E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude) 4.533E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude) 9.2 E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase) No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude) 2.795E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase) 15.44 °	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude) 1.541E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase) 133.4 °	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude) 3.222E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase) No signal

• Les valeurs globales à 70MW



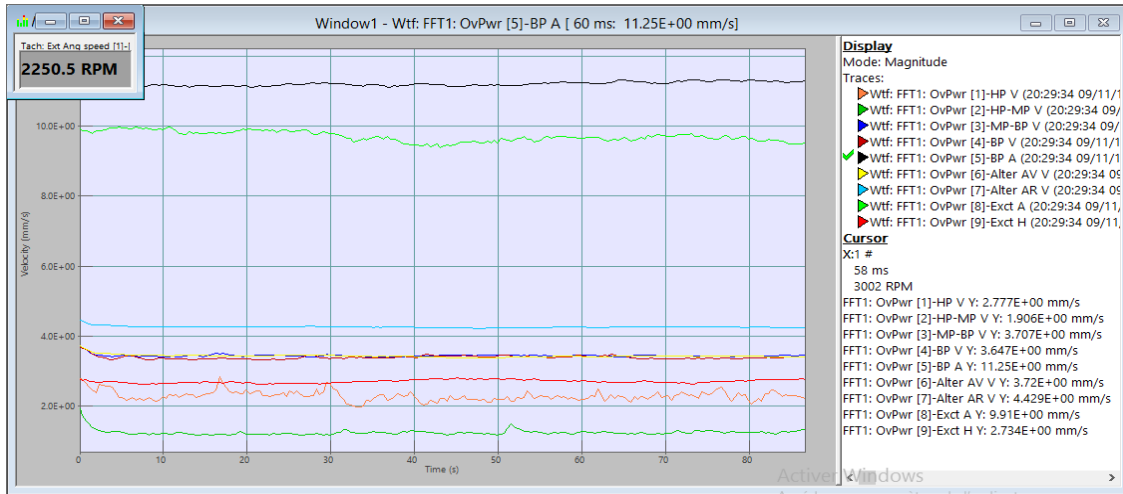
• Analyse spectrale à 70MW



• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 70MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)
208.5E-03 mm/s	5.881 °	1.257E+00 mm/s	142.9 °	4.292E+00 mm/s	222.9 °
2.558E+00 mm/s	95.9 °	13.21 E+00 mm/s	2.21 °	2.728E+00 mm/s	288.8 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)
3.923E+00 mm/s	92.18 °	9.99 E+00 mm/s	323.1 °	369.9E-03 mm/s	55.48 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)
481.3E-03 mm/s	351.5 °	428.3 E-03 mm/s	293 °	475.8E-03 mm/s	274.8 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)
503.8 E-03 mm/s	88.92 °	2.06 E+00 mm/s	164.2 °	1.004E+00 mm/s	167.3 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)
3.309E+00 mm/s	329.7 °	2.953E+00 mm/s	No signal	2.378E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)
4.405E+00 mm/s	No signal	2.748E+00 mm/s	No signal	13.25E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)
3.433E+00 mm/s	No signal	4.077E+00 mm/s	No signal	10.54E+00 mm/s	No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)
2.713E+00 mm/s	22.28 °	1.481E+00 mm/s	145.7 °	3.113E+00 mm/s	No signal

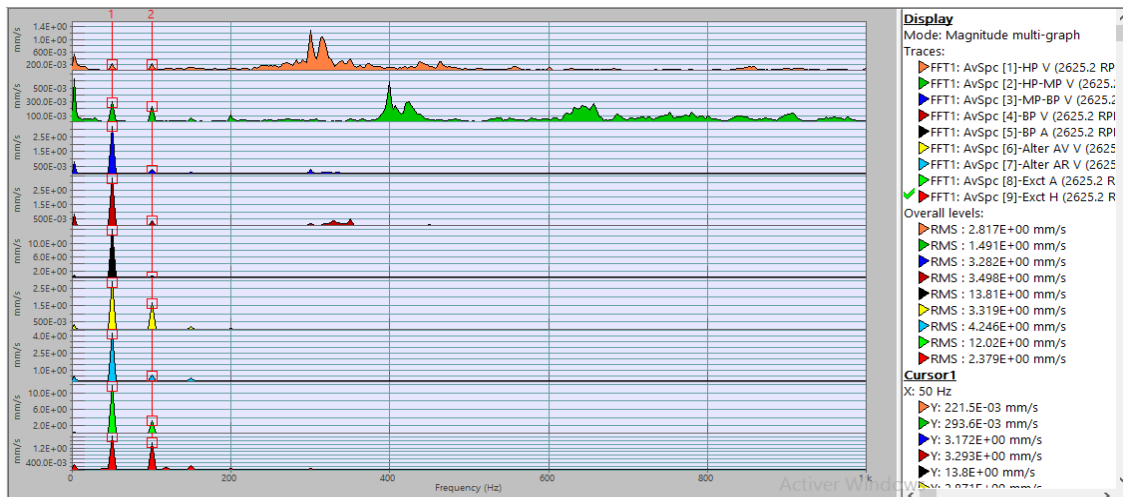
- Démarrage avec masse d'essai le 25/03/2018 :
- Les valeurs globales 110MW



- Les valeurs numériques globales, 1f et 2f 110MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)
206.3E-03 mm/s	22.94 °	645.3E-03 mm/s	117.6 °	2.469E+00 mm/s	254.5 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase)
2.317E+00 mm/s	134.8 °	8.239E+00 mm/s	44.72 °	1.802E+00 mm/s	312.3 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)
3.039E+00 mm/s	115.3 °	6.58 E+00 mm/s	340.5 °	194.5E-03 mm/s	73.26 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)
406.2E-03 mm/s	70.88 °	1.22 E+00 mm/s	213.2 °	1.133E+00 mm/s	82.71 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)
4.265E+00 mm/s	3.905 °	1.543E+00 mm/s	242.3 °	1.629E+00 mm/s	83.34 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)
4.398E+00 mm/s	314.9 °	1.883E+00 mm/s	No signal	1.169E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)
3.444E+00 mm/s	No signal	3.363E+00 mm/s	No signal	11.36E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)
3.298E+00 mm/s	No signal	4.207E+00 mm/s	No signal	9.326E+00 mm/s	No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)
1.753E+00 mm/s	46.65 °	779.5 E-03 mm/s	1.876 °	2.825E+00 mm/s	No signal

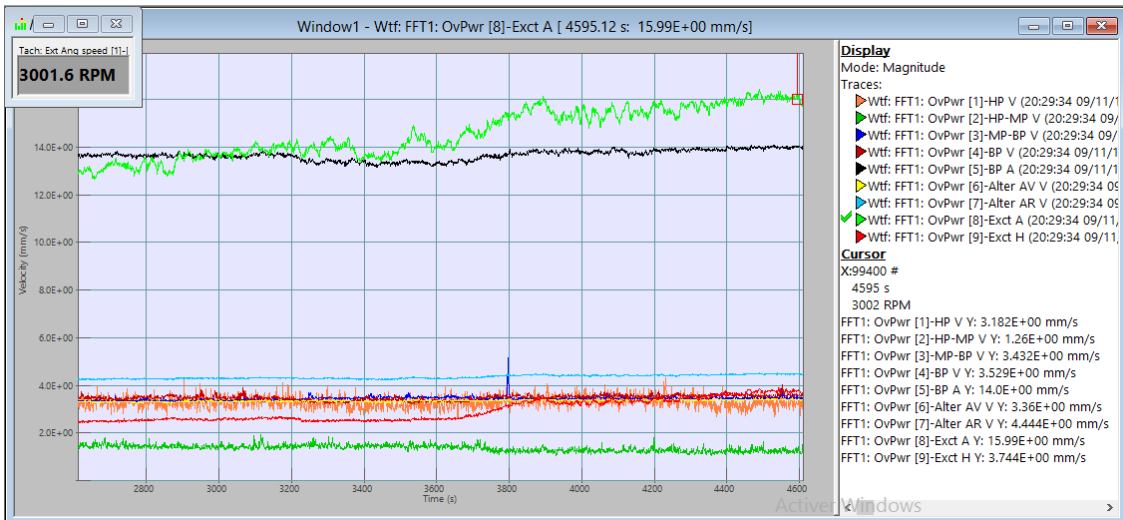
- Analyse spectrale à 130MW



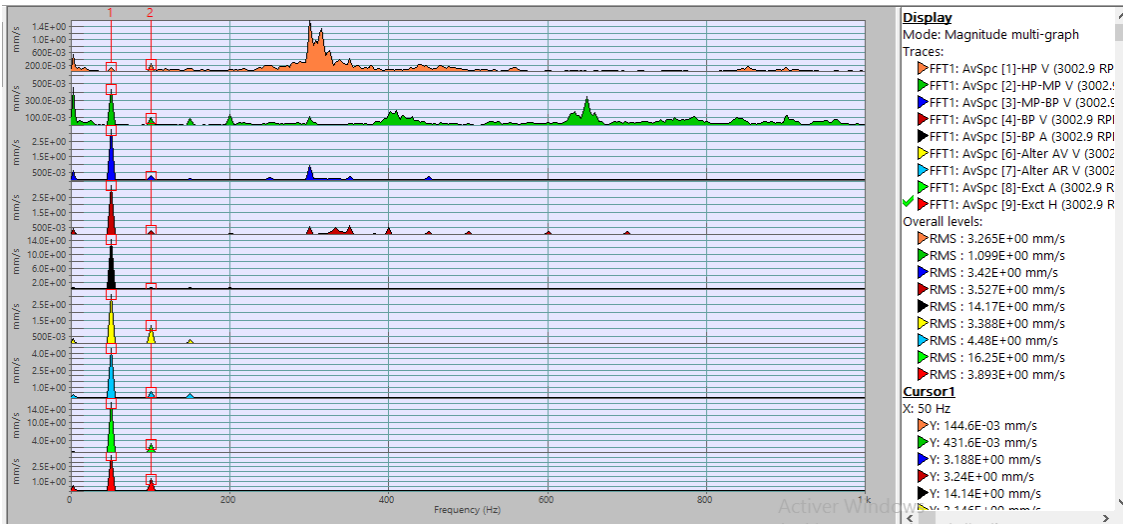
• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 130MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude) 203.5E-03 mm/s	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase) 37.5 °	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude) 275.8E-03 mm/s	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase) 115.4 °	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude) 3.172E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase) 231.8 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude) 3.263E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase) 103.3 °	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude) 13.84 E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase) 23.42 °	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude) 2.871E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase) 288.8 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude) 4.169E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase) 94.16 °	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude) 11.94 E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase) 323.9 °	Ord1: Ord 1 [9]-HP V (Magnitude) 239.7E-03 mm/s	Ord1: Ord 1 [9]-HP V (Phase) 53.63 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude) 230.7E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase) 342.1 °	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude) 276.7 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase) 310.4 °	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude) 340.7 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase) 266 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude) 333.9 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase) 63.04 °	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude) 1.602E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase) 152.5 °	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude) 535.8 E-03 mm/s	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase) 169 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude) 3.248E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase) 325.7 °	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude) 3.843E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude) 1.423E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase) No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude) 3.221E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude) 3.347E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude) 13.85E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase) No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude) 3.295E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude) 4.218E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase) No signal	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude) 12.38E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase) No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude) 1.819E+00 mm/s	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase) 50.27 °	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude) 1.54 E+00 mm/s	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase) 142.5 °	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude) 2.421E+00 mm/s	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase) No signal

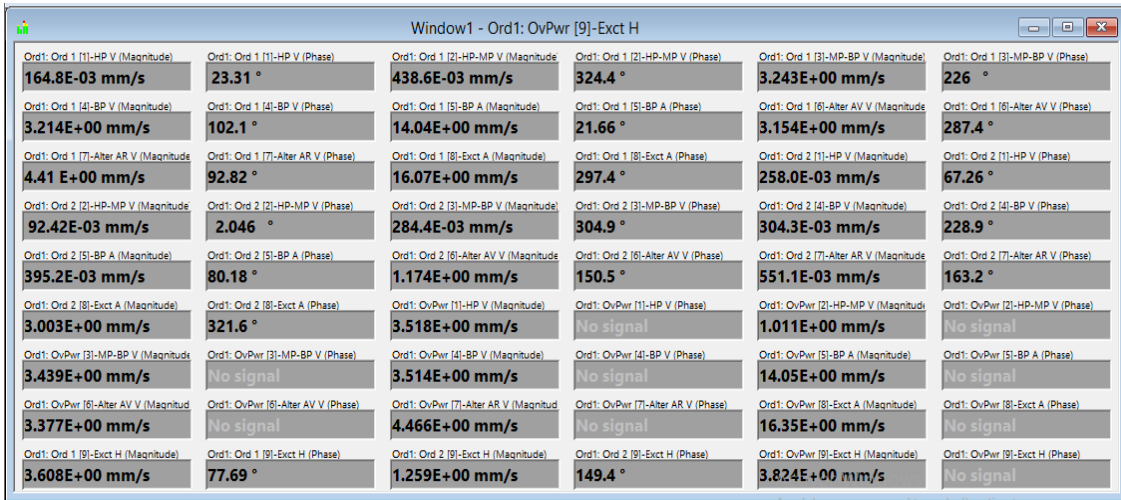
• Les valeurs globales à 150MW



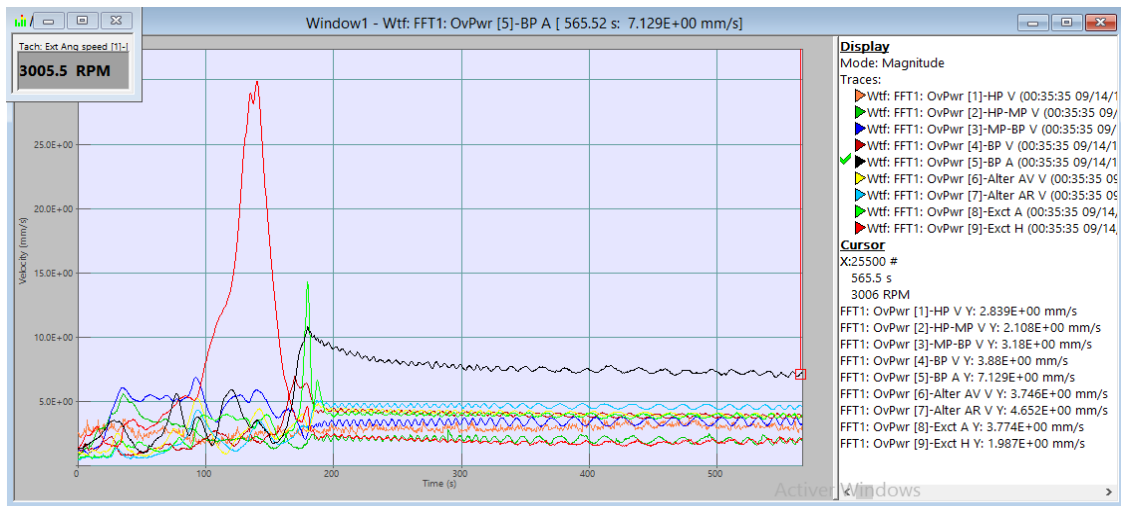
• Analyse spectrale à 150MW



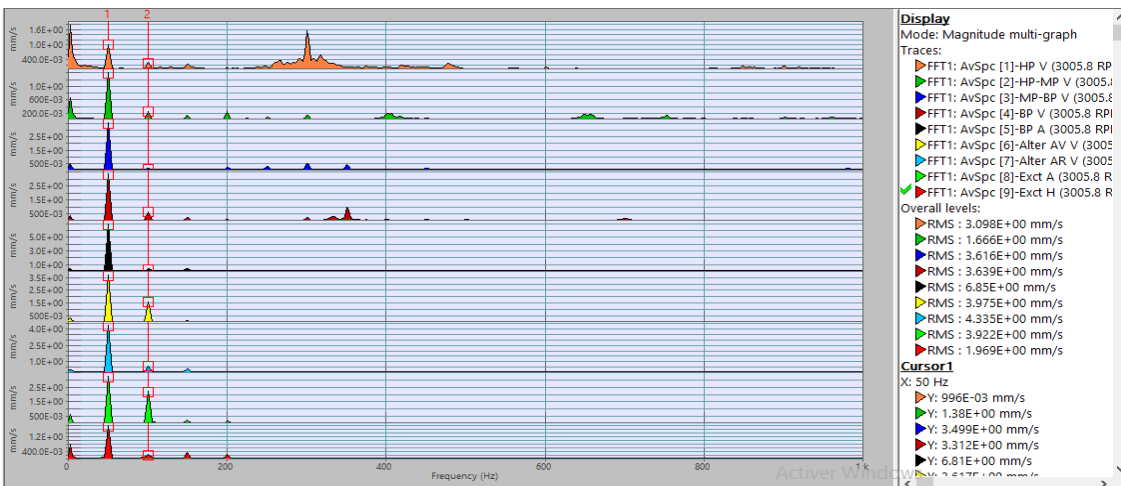
- Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 150MW



- Démarrage avec masse de correction le 02/04/2018 :
- Les valeurs globales à vide



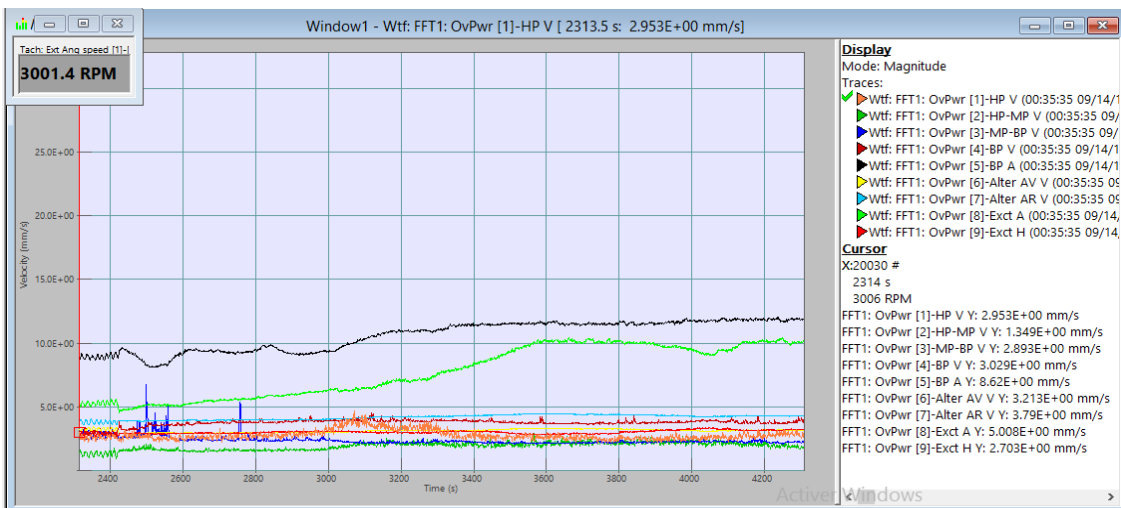
- Analyse spectrale à vide



• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à vide

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)
652.6E-03 mm/s	284 °	1.937E+00 mm/s	102.9 °	2.974E+00 mm/s	242.6 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase)
3.528E+00 mm/s	141.5 °	6.947E+00 mm/s	22.56 °	3.322E+00 mm/s	293.7 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)
4.633E+00 mm/s	104.8 °	2.871E+00 mm/s	335.3 °	273.4E-03 mm/s	208.2 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)
252.5E-03 mm/s	42.57 °	84.28 E-03 mm/s	359 °	678.5 E-03 mm/s	13.71 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)
305.6 E-03 mm/s	331 °	1.636E+00 mm/s	170.8 °	578.3 E-03 mm/s	209.5 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)
2.138E+00 mm/s	307 °	2.316E+00 mm/s	No signal	2.062E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)
3.085E+00 mm/s	No signal	3.816E+00 mm/s	No signal	6.975E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)
3.707E+00 mm/s	No signal	4.685E+00 mm/s	No signal	3.593E+00 mm/s	No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)
1.592E+00 mm/s	37.86 °	145.9E-03 mm/s	358.5 °	1.667E+00 mm/s	No signal

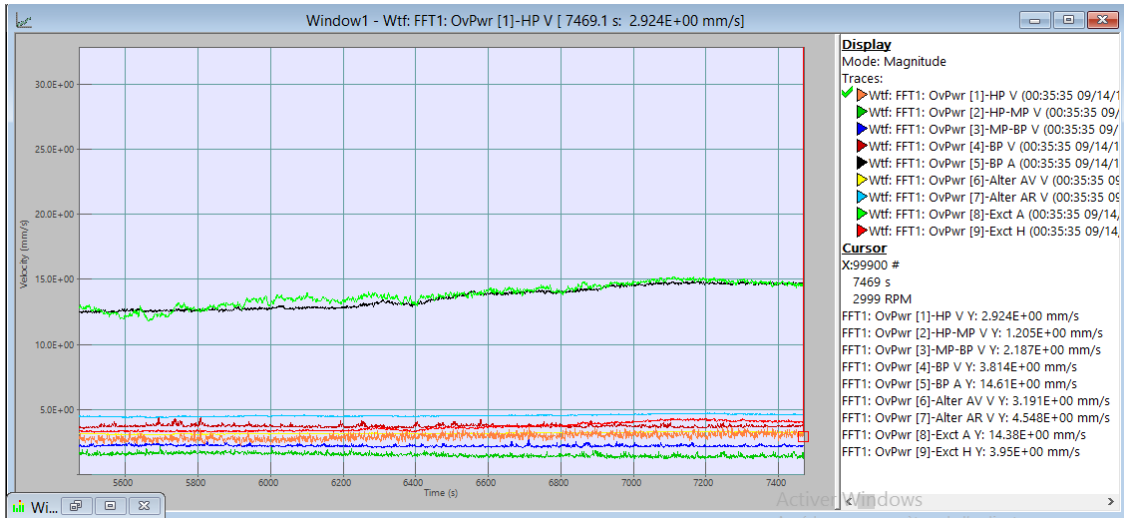
• Les valeurs globales à 100MW



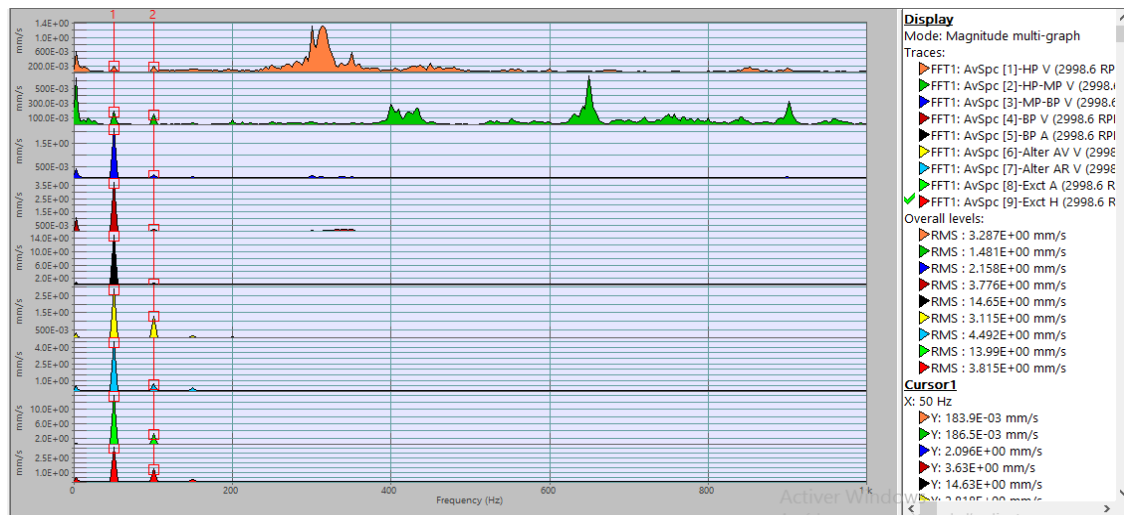
• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 100MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H					
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)
214.7 E-03 mm/s	310.6 °	725.5 E-03 mm/s	102.1 °	1.976E+00 mm/s	234.1 °
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase)
3.545E+00 mm/s	112 °	11.91 E+00 mm/s	28.16 °	2.506E+00 mm/s	285.9 °
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)
4.202E+00 mm/s	94.65 °	10.23 E+00 mm/s	296.1 °	144.4E-03 mm/s	125.6 °
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)
170.6E-03 mm/s	352.9 °	68.63 E-03 mm/s	1.882 °	380.6 E-03 mm/s	312.3 °
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)
258.7 E-03 mm/s	39.11 °	1.83 E+00 mm/s	154.9 °	744.8 E-03 mm/s	156.2 °
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)
2.781E+00 mm/s	315 °	2.737E+00 mm/s	No signal	1.58 E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)
1.997E+00 mm/s	No signal	3.603E+00 mm/s	No signal	11.91 E+00 mm/s	No signal
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)
3.106E+00 mm/s	No signal	4.285E+00 mm/s	No signal	10.61 E+00 mm/s	No signal
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)
2.821E+00 mm/s	24.76 °	1.262E+00 mm/s	138.3 °	3.114E+00 mm/s	No signal

• Les valeurs globales à 148MW



• Analyse spectrale à 148MW



• Les valeurs numériques globales, 1f et 2f à 148MW

Window1 - Ord1: OvPwr [9]-Exct H											
Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [1]-HP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [3]-MP-BP V (Phase)						
143.6E-03 mm/s	314.7 °	144.1E-03 mm/s	135.3 °	1.443E+00 mm/s	237.1 °						
Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [4]-BP V (Phase)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [6]-Alter AV V (Phase)						
2.5 E+00 mm/s	109.4 °	10.04E+00 mm/s	30.82 °	1.884E+00 mm/s	287.4 °						
Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [1]-HP V (Phase)						
3.035E+00 mm/s	94.7 °	9.484E+00 mm/s	288.4 °	146.2E-03 mm/s	76.08 °						
Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [2]-HP-MP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [4]-BP V (Phase)						
99.1E-03 mm/s	52.18 °	798.3E-03 mm/s	227.6 °	1.399E+00 mm/s	98.6 °						
Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [5]-BP A (Phase)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [7]-Alter AR V (Phase)						
5.927E+00 mm/s	22.19 °	1.274E+00 mm/s	246.5 °	1.748E+00 mm/s	95 °						
Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [8]-Exct A (Phase)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [1]-HP V (Phase)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [2]-HP-MP V (Phase)						
6.205E+00 mm/s	286.4 °	2.765E+00 mm/s	No signal	1.154E+00 mm/s	No signal						
Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [3]-MP-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [4]-BP V (Phase)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [5]-BP A (Phase)						
2.141E+00 mm/s	No signal	3.707E+00 mm/s	No signal	14.63E+00 mm/s	No signal						
Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [6]-Alter AV V (Phase)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Magnitude)	Ord1: OvPwr [7]-Alter AR V (Phase)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Magnitude)	Ord1: OvPwr [8]-Exct A (Phase)						
3.065E+00 mm/s	No signal	4.461E+00 mm/s	No signal	13.98E+00 mm/s	No signal						
Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 1 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: Ord 2 [9]-Exct H (Phase)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Magnitude)	Ord1: OvPwr [9]-Exct H (Phase)						
2.496E+00 mm/s	48.06 °	1.276E+00 mm/s	63.07 °	3.836E+00 mm/s	No signal						