



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA1

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 2

EN GENIE MECANIQUE

Option : construction mécanique

Détection des défaillances par analyse vibratoire Sur la chaîne de Broyeur De la cimenterie

PROMOTEUR:

- Mr. Madani Fateh

REALISE PAR :

- Gasmi Fouad
- Difallah Abdennour
- Sadoune Abd El Madjid

Co-promoteur:

- Meziane Mansour
- Nabi Younes

2021-2022

Remerciements

Au terme de notre formation à la faculté de science et technologie, nous adressons nos remerciements au corps administratif et professoral pour leur compréhension et leur patience au long de notre parcours des études universitaires, spécialement le département du Génie Mécanique. Le plus grand merci tout d'abord revient, à Dieu qui nous a guidé dans le bon sens de notre vie qui nous a donné le courage, la volonté, et la force pour réaliser ce travail.

Nous tenons remercier chaleureusement notre promoteur Mr : MADANI FATAH ; pour son soutien et ses conseils un grand merci pour notre encadreur et son chef de département Mr : MEZIANE Mansour et toute l'équipe de BTC, Nabil Younes et toute l'équipe de la SMIF. Nous remercions chaleureusement nos familles et surtout nos parents pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience durant les étapes difficiles de ce travail.

Nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail. Merci à tous nos collègues pour tous les bons moments passés, et les échanges scientifiques qu'on a partagés, leurs disponibilités et leurs compétences merci Du fond du cœur.

Dédicace

Nous voulons dédier à notre chers parents, Aucune dédicace ne saurait exprimer notre respect, notre amour éternel et notre considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour notre étude, vous êtes la cause principale de notre réussite dans nos études et de notre arrivée à ce poste.

Ainsi que mes 2 frères Akram et Lotfi je leurs souhaite toute la réussite dans leurs vies.

Ainsi qu'a tous mes amis, collègues de la spécialité « Construction mécanique » Et toutes les familles Gasmi.

Fouad

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à : Mes parents, ma chère et mon père votre présence, vos sacrifices et vos encouragements ont permis de passer les obstacles que j'ai rencontrés le long de mon parcours et ma vie, vos bienfaits sont aussi illimités que l'étendue du ciel. Mes frères, vous m'avez donné énormément de motivation.

Madjid

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à tout personne qui m'a aidé de loin ou de près A l'homme, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère A Sahbi, mon bras droit pour son affection, son soutien, et sa patience qui m'a toujours encouragé pour avancer A mes frère et sœurs, mes amis et mon trinôme Fouad et Madjid et sans oublier mes potes Imad, Wassim, Sami et Rabeh.

Abdnour

لصة :

لنعب المراقبة لاهتزازية لللدوارة في الصناعة دورا مهمًا للغاية في إطالة عمر خدمة للمعدات، وفي تقريرنا التحليل لاهتزازي لتوسيع مجال دراسة للعيوب، هج التحليل النموذجي والتوافقي لذلك في تدواسة سلوكها التي يلي الفعلي كدالة ألعطال لاهتزاز. لقد قدمنا بتطبيق العملية على مطحنة خام من موقع تاح، لتقديم مساعدة عامة حول قيمة استخدام هذه للطريقة

Résume :

La surveillance vibratoire des machines tournantes dans l'industrie jeux un rôle très importante pour prolongée la durée de vie des équipements, en fonction de sa nous avons déterminé l'analyse vibratoire pour élargir le champ d'étude des défauts, tout en intégrant l'analyse modale, harmonique dans la machine et étudier son comportement de fonctionnement réel en fonction les défauts vibratoires. Nous avons réalisé une application sur le broyeur cru du site Meftah, pour donner une aidée générale sur l'intérêt d'utilisation de cette méthode.

Abstract:

The vibratory monitoring of rotating machines in industry plays a very important role in prolonging the service life of the equipment, according to its we determined the vibratory analysis to broaden the field of study of the defects, while integrating the modal and harmonic analysis in the machine and study its actual operating behavior as a function of vibration faults. We have made an application on the raw grinder from the Meftah site, to give general help on the value of using this method.

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE

I. INTRODUCTION3

I.1 PRESENTATION GENERALE : [1].....3

I.1.1 PRESENTATION3

I.1.2 LOCALISATION.....3

I.1.3 HISTORIQUE.....4

I.1.4 LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT5

I.1.4.1 ZONE I : CARRIERE CALCAIRE.....6

I.1.4.2 ZONE II : ZONE CRU6

I.1.4.3 ZONE III : CUISSON.....7

I.1.4.4 ZONE IV : CIMENT7

I.1.4.5 ZONE V : EXPEDITION.....7

I.2 PRESENTATION DE BROYEUR : [1].....8

I.2.2 PRESENTATION DE SUJET8

I.2.2.1.1 DESCRIPTION DE L'UNITE D'INTERVENTION8

I.2.2.1.2 DOSSIER TECHNIQUE DU BROYEUR A BOULETS9

I.2.2.1.3 CARACTERISTIQUE DU MOTEUR PRINCIPALE.....9

I.2.2.1.4 CARACTERISTIQUE DU REDUCTEUR9

I.2.2.3 PROCEDES DE BROYAGE.....10

I.2.2.4 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS DU BROYEUR A BOULETS11

I.2.2.5 VITESSE CRITIQUE DU BROYEUR12

I.3 CONCLUSION13

CHAPITRE II : APPLICATION DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE SUR LE BROEUR

II INTRODUCTION	15
II.1 MACHINE TOURNANTE.....	15
II.2 LA MAINTENANCE	16
II.2.1 DEFINITION DE LA MAINTENANCE :D’APRES LA NORME AFNOR X60-010	16
II.2.1.1 OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE.....	16
II.2.2 TYPES DE LA MAINTENANCE	17
II.2.2.1.1 FORMES DE MAINTENANCE PREVENTIVE.....	17
II.2.2.1.1.1 MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE	18
II.2.2.1.1.2 MAINTENANCE PREDICTIVE	18
II.2.2.1.2 LES AVANTAGES MAINTENANCE CONDITIONNEL	19
II.2.2.2 LA MAINTENANCE CORRECTIVE	19
II.2.2.2.1 MAINTENANCE PALLIATIVE.....	19
II.2.2.2.2 MAINTENANCE CURATIVE	19
II.2.2.2.3 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE LA MAINTENANCE CORRECTIVE	20
II.2.2.3 MAINTENANCE AMELIORATIVE	20
II.2.3 LES OPERATIONS DE LA MAINTENANCE.....	20
II.2.4 LES DIFFERENTS NIVEAUX DE MAINTENANCE	21
II.2.5 CRITERE DE CHOIX DE LA FORME DE MAINTENANCE	22
II.3 Technique de surveillance.....	22
II.3.1 L’ANALYSE D’HUILE : [8].....	22
II.3.2 THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : [9]	22
II.3.3 ANALYSE VIBRATOIRE	23

II.3.3.2 NOTION SUR VIBRATIONS MECANIQUES.....	23
II.3.3.2.1 DEFINITION : (NORME AFNOR).....	23
II.3.3.3 LES GRANDEURS DE MESURE : [10].....	23
II.3.3.3.1 DEPLACEMENT VIBRATOIRE X (T).....	23
II.3.3.3.2 VITESSE VIBRATOIRE V (T).....	24
II.3.3.3.3 ACCELERATION VIBRATOIRE A(T).....	24
II.3.3.4 CARACTERISTIQUES D'UNE VIBRATION : [10].....	24
II.3.3.4.1 RELATION ENTRE FREQUENCE ET PERIODE.....	25
II.3.3.4.2 LES UNITES.....	25
II.3.3.4.3 GRANDEURS.....	25
II.3.3.4.4 AMPLITUDE.....	26
II.3.3.5.1 VIBRATIONS HARMONIQUES.....	27
II.3.3.5.2 VIBRATIONS APERIODIQUES.....	27
II.3.3.6.1 REPRESENTATION TEMPORELLE.....	28
II.4 CONCLUSION.....	30

CHAPITRE III : L'ANALYSE DES DEFAUTS DU BROEUR

III INTRODUCTION.....	32
III.1 DEFAUT DE BALOURD.....	32
III.1.1 DIFFERENTS TYPES DE BALOURD.....	32
III.1.2 Mesure.....	32
III.1.3 SPECTRE TYPOLOGIQUE.....	34
III.2 DEFAUT D'ALIGNEMENT.....	35
III.2.1 DESALIGNEMENT D'ARBRES ACCOUPLES.....	36
III.2.2 TYPOLOGIE DU DELIGNAGE.....	36

III.3	DEFAUTS DESSERRAGE	38
III.4	LES DEFAUTS DES ENGRENAGES	38
III.4.1	FREQUENCE D'ENGRENEMENT	49
III.4.2	SIGNATURES VIBRATOIRES DES DEFAUTS D'ENGRENEMENT	40
III.5	LES PALIERS LISSES HYDRODYNAMIQUES	43
III.5.1	INSTABILITES DE PALIERS	43
III.6	CONCLUSION.....	44

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1	INTRODUCTION.....	46
IV.2.1	LES POINTS DE MESURE.....	47
IV.2.2	MATERIELS UTILISES.....	49
IV.2.2.1	CAPTEUR DE VIBRATION UTILISE : ACCELEROMETRE.....	49
IV.2.2.2	VB8.....	50
IV.2.2.2.1	DESCRIPTION	50
IV.2.3	LOGICIEL D'ANALYSE : SYSTEME 1.....	51
IV.2.3.1	PARAMETRAGE SUR LOGICIEL	52
IV.2.3.2	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	52
IV.2.3.3	CALCULE DES FREQUENCES SUR LE REDUCTEUR MAAG.....	52

IV.3 CONCLUSION.....70

CHAPITRE V : CONCEPTION ET SIMULATION DU BROYEUR

V INTRODUCTION72

V.1 LES LOGICIELS UTILISENT72

V.1.1 LE LOGICIEL SOLIDWORKS72

V.1.2 LE LOGICIEL ANSYS73

V.1.3 LE LOGICIEL ANSYS WORKBENCH73

V.2 RESULTAT ET INTERPRETATION73

V.2.1 ETUDE SUR ARBRE D'ATTAQUE73

V.2.2 ANALYSE MODALE.....73

V.2.3 ETUDE SUR SYSTEME PLANETAIRE.....83

V.2.3.1 STRUCTURE STATIQUE.....83

V.2.3.2 CAS ROTATIONNELS85

V.3 CONCLUSION89

CONCLUSION GENERALE91

BIBLIOGRAPHIE.....92

ANNEXES94

CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE

FIGURE I.1 : LA VUE DU SCMI	3
FIGURE I.2 : LOCALISATION.....	4
FIGURE I.3 : REALISATIONS DE CIMENT	4
FIGURE I.4 : SCHEMA DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT	5
FIGURE I.5 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT	5
FIGURE I.6 : CARRIERE CALCAIRE	6
FIGURE I.7: CUISSON.....	7
FIGURE I.8 : BROyage CIMENT	7
FIGURE I.9 : EXPEDITION EN SAC OU VRAC.....	7
FIGURE I.10 : BROYEUR A BOULET	8
FIGURE I.11: LE REDUCTEUR DE VITESSE.....	10
FIGURE I.12 :La chaine de broyeur	11
FIGURE I.13 : Tableau de nomenclature de broyeur	11
FIGURE I.14 : Schéma du circuit ouvert	12
FIGURE I.15 : Schéma du circuit ferme.....	12

CHAPITRE II : APPLICATION DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE SUR LE BROYEUR

FIGURE II.1 : ELEMENT GENERALE DES MACHINES TOURNANTES.....	16
FIGURE II.2 : TYPES DE MAINTENANCE.....	17
FIGURE II.3 : MAINTENANCE ONLINE	18
FIGURE II.4 : MAINTENANCE OFFLINE	19
FIGURE II.5 : LES GRANDEURS DES MESURES	24
FIGURE II.6 : REPRESENTATION DES DIFFERENTES AMPLITUDES.....	26
FIGURE II.7 : SIGNAUX VIBRATOIRE HARMONIQUE.....	27
FIGURE II.8 : SIGNAUX VIBRATOIRE APERIODIQUE	27
FIGURE II.9 : SIGNAUX VIBRATOIRE PERIODIQUE.....	28
FIGURE II.10 : REPRESENTATION TEMPORELLE.....	29

FIGURE II.11 : REPRESENTATION VECTORIELLE	29
FIGURE II.12 : REPRESENTATION SPECTRALE.....	30

CHAPITRE III : L'ANALYSE DES DEFAUTS DU BROYEUR

FIGURE III.1 : TOLERANCES D'USINAGE SUR UN ROTOR	32
FIGURE III.2: BALOURD STATIQUE	33
FIGURE III.3 : BALOURD DE COUPLE	33
FIGURE III.4 : BALOURD DYNAMIQUE	34
FIGURE III.5 : POINTS DE MESURE POUR UN DEFAUT DE BALOURD	34
FIGURE III.6 : SPECTRE THEORIQUE D'UN DEFAUT DE BALOUR.....	35
FIGURE III.7 : SPECTRES SUPERPOSES D'UN DEFAUT DE BALOURD.[13].....	35
FIGURE III.8 : DEFAUTS D'ALIGNEMENT D'ARBRES	36
FIGURE III.9 : SPECTRE THEORIQUE D'UN DEFAUT D'ALIGNEMENT	36
FIGURE III.10 : SPECTRES SUPERPOSES D'UN DEFAUT D'ALIGNEMENT.....	37
FIGURE III.11 : DESALIGNEMENT DE PALIERS SE TRADUISANT PAR UNE FLEXION DE L'ARBRE	37
FIGURE III.12 : DIFFERENTS TYPES D'ENGRENAGE.....	39
FIGURE III.13 : EFFORTS SUR LES DENTS D'ENGRENAGE SELON LE TYPE DE DENTURE	39
FIGURE III.14 : FREQUENCE D'ENGRENEMENT	40
FIGURE III.15 : SPECTRE D'UN ENGRENAGE SAIN.....	40
FIGURE III.16 : SPECTRE THEORIQUE DE L'USURE GENERALE DE LA DENTURE	41
FIGURE III.17 : SPECTRE D'UN ENGRENAGE PRESENTANT UNE DENT DETERIOREE	41
FIGURE III.18 : SPECTRE THEORIQUE D'UN ENGRENAGE PRESENTANT UN JEU INSUFFISANT	42
FIGURE III.19 : SPECTRE THEORIQUE D'UN ENGRENAGE PRESENTANT UNE DENT DETERIOREE	42
FIGURE III.20 : PALIERS LISSES HYDRODYNAMIQUES	43

CHAPITRE IV : ÉTUDE EXPERIMENTALE

FIGURE IV.1 : POINT DES MESURES SUR LES PALIERS	47
FIGURE IV.2 : DANS UN PLAN HORIZONTAL.....	48
FIGURE IV.3 : DANS LE SENS AXIAL	48
FIGURE IV.4 : VERTICALE.....	48
FIGURE IV.5 : ACCELEROMETRE UTILISE	49
FIGURE IV.6 : COLLECTEUR DE DONNE (VB8).....	50

FIGURE IV.7 : EMBLEMEMENT DE CAPTEUR.....	50
FIGURE IV.8 : LOGICIEL D'ANALYSE SYSTEME 1	51
FIGURE IV.9 : Signal LINEAIRE.....	57
FIGURE IV.10 : Signal LOGARITHMIQUE	57
FIGURE IV.11 : Signal LINEAIRE	58
FIGURE IV.12 : <i>Signal</i> LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°03 DANS LA DIRECTION AXIALE	58
FIGURE IV.13: <i>Signal</i> TEMPORAIRES PRISE SUR LE PALIER N°3 DANS LA DIRECTION HORIZONTALE.....	59
FIGURE IV.14 : ZOOM SPECTRALE TEMPORAIRES PRISE SUR LE PALIER N°3	59
FIGURE IV.15 : <i>Signal</i> LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°04 DANS LA DIRECTION HORIZONTALE	60
FIGURE IV.16 : ZOOM DE SPECTRAL LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°04.....	60
FIGURE IV.17 : <i>Signal</i> LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°04 DANS LA DIRECTION HORIZONTALE.....	61
FIGURE IV.18 : ZOOM DE SPECTRAL LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°04 DANS LA DIRECTION HORIZONTAL	61
FIGURE IV.19 : Signal TEMPORAIRES PRISE SUR LE PALIER N°7 ET PALIER N°6	62
FIGURE IV.20 : Signal EN CASCADE ET LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°3 DE REDUCTEUR MAAG	65
FIGURE IV.21 : IMAGE SPECTRALE SUPERPOSE LINEAIRE PRISE SUR LE PALIER N°07	66
FIGURE IV.22 : Signal LINEAIRE SUPERPOSE PRISE SUR LE PALIER N°05	66
FIGURE IV.23 : COURBE DE TENDANCE SUR LE PALIES DE STAGE 1 DE REDUCTEUR MAAG.....	67
FIGURE IV.24 : COURBE DE TENDANCE SUR LE PALIES DE STAGE 1 DE REDUCTEUR MAAG	67
FIGURE IV.25 : COURBE DE TENDANCE SUR LE PALIES DE STAGE 2 DE REDUCTEUR MAAG.....	68
FIGURE IV.26 : COURBE DE TENDANCE SUR LE PALIES DE STAGE 2 DE REDUCTEUR MAAG.....	68
FIGURE IV.27 : Signal LINEAIRE EN CASCADE EN MOYENNE FREQUENCE (2-2000Hz) PALIER N°03	69
FIGURE IV.28 : Signal LINEAIRE EN CASCADE EN MOYENNE FREQUENCE (2-1000Hz) . PALIER N°05	69

CHAPITRE V : CONCEPTION ET SIMULATION DU BROEUR

Figure V.1 : dessin stage 1 de réducteur maag	72
Figure V.2 : Graph de fréquence propre	73
Figure V.3 : Déplacement total mode 1.....	74
Figure V.4 : Déplacement total mode 2.....	74
Figure V.5 : Déplacement total mode 3.....	74
Figure V.6 : Déplacement total mode 4.....	75
Figure V.7 : Déplacement total mode 5.....	75
Figure V8 : Déplacement total mode 6.....	75
Figure V.9 : Déplacement total mode 7.....	76

Liste des figures

Figure V.10 : Déplacement total mode 8.....	76
Figure V.11 : Appliquer une pression sur l'arbre.....	77
Figure V.12 : Représentation graphique de la réponse harmonique (déplacement total).....	77
Figure V.13 : Représentation graphique de la réponse harmonique (déformation élastique équivalente).	78
Figure V.14 : Représentation graphique de la réponse harmonique (déformation élastique équivalente).	78
Figure V.15 : Représentation graphique de la réponse harmonique (contrainte équivalente).....	78
Figure V.16 : Représentation graphique de la contrainte équivalente.....	79
Figure V.17 : Représentation graphique de la contrainte équivalente.....	79
Figure V.18 : Représentation graphique du coefficient de sécurité.....	80
Figure V.19 : Représentation graphique du coefficient de sécurité autre vu.....	80
Figure V.20 : Graphe de réponse d'outil fatigue	81
Figure V.21 : Graphe de théorie de correction de la contrainte moyenne.....	81
Figure V.22 : Graph fréquence propre.....	82
Figure V.23 : Diagramme de campbell.....	82
Figure V.24 : Déplacement total 1.....	82
Figure V.25 : Déplacement total 2.....	83
Figure V.26 : Déplacement total 3.....	83
Figure V.27 : Déplacement total 4.....	84
Figure V.28 : Déplacement total 5.....	84
Figure V29 : Déplacement total 6.....	85

CHAPITRE IV: ÉTUDE EXPERIMENTALE

TABLEAU IV.1 : DES NIVEAUX VIBRATOIRES DE LA MACHINE EN VITESSE ET EN ACCELERATION 55

TABLEAU IV.2: DES NIVEAUX VIBRATOIRES DE LA MACHINE EN VITESSE ET EN ACCELERATION..... 64

CHAPITRE V : CONCEPTION ET SIMULATION DU BROYEUR

TABLEAU V.1 : FREQUENCE PROPRE DE ROTOR 73

TABLEAU V.2 : FREQUENCE PROPRE 77

TABLEAU V.3 : LA PRESSION APPLIQUEE..... 83

TABLEAU V.4 : VITESSE CRITIQUE..... 86

La maintenance optimale des machines tournantes en fonctionnement a une importance vitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie de ces machines. Les différentes méthodes de surveillance sont : l'analyse d'huile, l'analyse de température et L'analyse vibratoire... L'analyse vibratoire est la technique la plus utilisée pour réaliser une surveillance et un diagnostic fiable et pour détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques. Ces travaux de maintenance ont une importance économique, elles permettent de passer d'une maintenance systématique (fréquentielle) à une maintenance conditionnelle moins coûteuse.

Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les machines tournantes (pompes, compresseurs, turbines...) en fonctionnement engendrent des défauts tels que : un balourd, un désalignement, un défaut de roulement, un écaillage de dents d'engrenage, qui donnent des signaux vibratoires très compliqués.

Dans ce contexte, et dans le cadre de notre travail de mémoire de fin d'études, nous avons effectués un stage pratique au sein Société des Ciments de la Mitidja par Abréviation S.C.M.I.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres, suivis d'une conclusion générale :

Le chapitre 1 : Présentation générale.

Le chapitre 2 : Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur.

Le chapitre 3 : Analyse des défauts du broyeur.

Le chapitre 4 : Étude expérimentale.

Le chapitre 5 : Conception et simulation du broyeur.

CHAPITRE I

PRESENTATION GENERALE

I. Introduction :

Dans la fabrication du ciment il existe deux voies de production, la voie humide et la voie sèche. Dans la cimenterie de MEFTAH seule la voie sèche est utilisée. Le but de ce chapitre est de mieux comprendre le fonctionnement d'une cimenterie.

I.1 Présentation générale : [1]

I.1.1 Présentation :

La SCMI est une entreprise algérienne filiale du groupe GICA, spécialisée dans la fabrication de ciment. Le réseau national de la SCMI lui permet de fournir ses produits sur tout le territoire. Son procédé de fabrication spécifique procure à son ciment une excellente qualité respectant les normes internationales de fiabilité et de respect de l'environnement. La culture de SCMI repose sur les valeurs fondamentales de respect, de confiance, de responsabilité et d'autonomie. [1]



Figure I.1 : La vue du SCMI [1]

I.1.2 Localisation :

La Cimenterie de MEFTAH est localisée à proximité de la route nationale n°29, reliant la commune de MEFTAH à celle de KHEMIS-EL-KHECHNA. Elle est implantée dans la commune de MEFTAH, daïra de MEFTAH, Wilaya de Blida. Elle est située à 27km au sud d'Alger. Elle est à une dizaine de kilomètres de la gare d'Oued SMAR et à une quinzaine de kilomètres de l'aéroport international d'Alger.[1]



Figure I.2 : Localisation.[1]

I.1.3 Historique :

La cimenterie est implantée dans la commune de MEFTAH, daïra de MEFTAH, Wilaya de Blida. L'usine est située à 60 m au-dessous du niveau de la mer, la carrière à 150 m. Le projet s'est inscrit dans le cadre du plan quadriennal 1970-1973, il a été individualisé par décision n° 71-20 DI du 10 mars 1971, la formule de réalisation retenue est celle du lot par lot, par l'ingénieur conseil canadien SURVEYER NENNINGER et CHENEVERT (S.N.C).

Date de mise en service :

- 31 janvier 1975 : démarrage de l'atelier cru.
- 06 mai 1975 : allumage du four.
- 01 septembre 1975 : production de ciment.
- Commercialisation du ciment : 06 novembre 1975.[1]

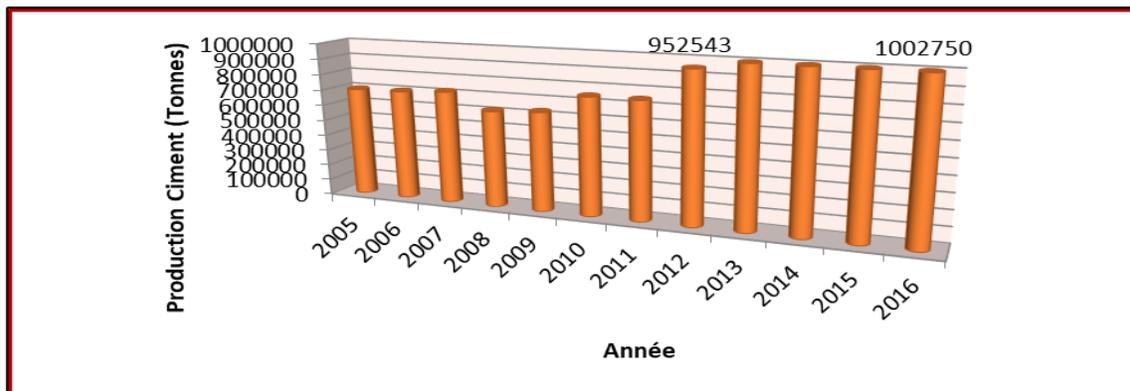


Figure I.3 : Réalisations de Ciment.[1]

I.1.4 Le processus de fabrication du ciment :

Le processus de fabrication du ciment consiste à « cuire » à haute température (1450 °C), un mélange de calcaire et d’argile, convenablement dosé et broyé sous la forme d’une « farine crue » pour le transformer en « clinker ». Le clinker est un produit granuleux qui après broyage fin avec des ajouts convenablement choisis (du gypse, tuf), devient le ciment bien connu de tous, pour les maçonneries, les travaux du bâtiment et les ouvrages d’art... La majorité des cimenteries modernes utilisent le procédé dit « en voie sèche », qui est le plus économique en consommation d’énergie (environ 0,9 KWh, par kg de clinker). C’est le procédé que nous retiendrons pour la suite du travail.

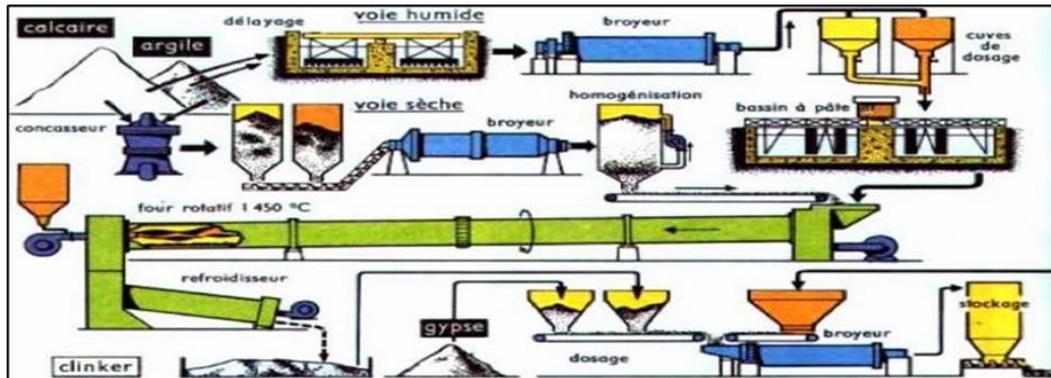


Figure 1.4 : Schéma du processus de fabrication du ciment.[1]

Pour simplifier ce schéma, on peut voir sur la figure (1.5) le schéma synoptique du processus defabrication du ciment au sein de la cimenterie de MEFTAH.[1]

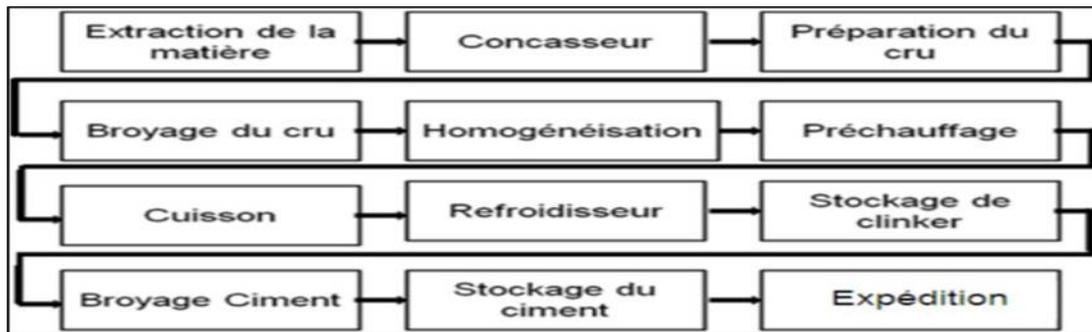


Figure I.5 : Schéma synoptique du processus de fabrication du ciment.[1]

Ce processus de fabrication du ciment est divisé en cinq zones :

- Zone I : Carrière calcaire.
- Zone II : Cru.
- Zone III : Cuisson.
- Zone IV : Ciment.

- Zone V : Expédition.

I.1.4.1 Zone I : Carrière calcaire :



Figure I.6 : Carrière calcaire.[1]

Dans la Zone I nous avons :

- L'extraction de la matière.
- Le chargement.
- Le transport.
- Le concassage.

I.1.4.2 Zone II : Zone Cru :

- Préparation de la matière.
- Hall calcaire.
- Hall ajout.
- Le broyeur à marteau.
- L'aspiration.
- Séparateur statique.
- Le broyeur à boulets.
- Elévateur à godets.
- L'homogénéisation.

I.1.4.3 Zone III : Cuisson :

La ligne de cuisson figure (1.7) est constituée :

- D'un pré chauffeur.
- D'un four rotatif.
- D'un refroidisseur.

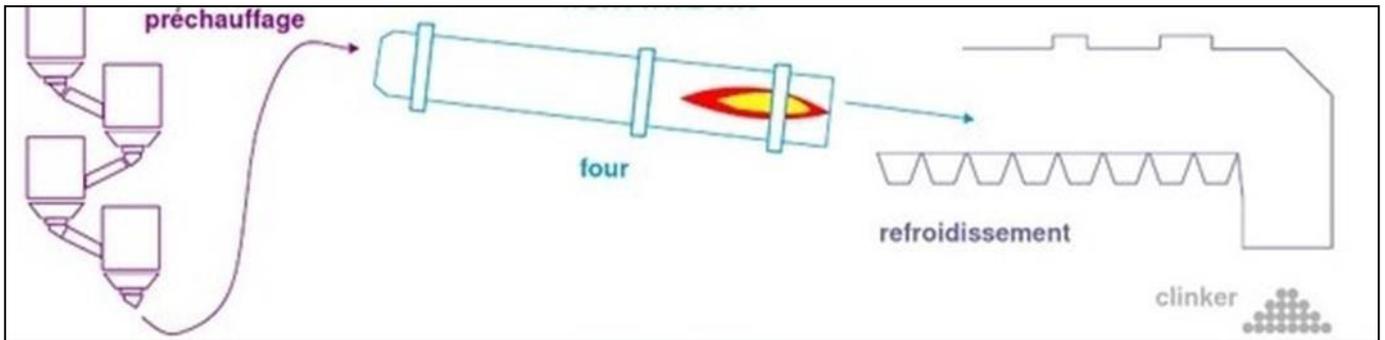


Figure I.7 : Cuisson.[1]

I.1.4.4 Zone IV : Ciment :

Cet atelier est composé de deux lignes électriques avec un débit de production de 90T/H pour chacune.

➤ Le remplissage des trémies (clinker gypse, tuf) :

- Remplissage par la trémie de réception.
- Remplissage par T 16.

➤ Broyages ciment :

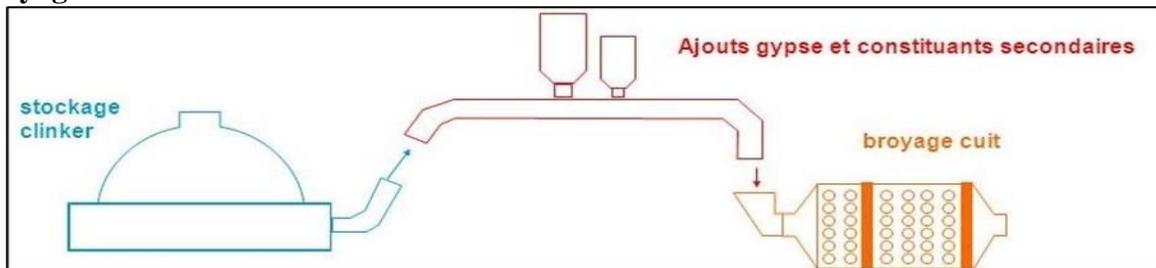


Figure I.8 : Broyage ciment.[1]

I.1.4.5 Zone V : Expédition :

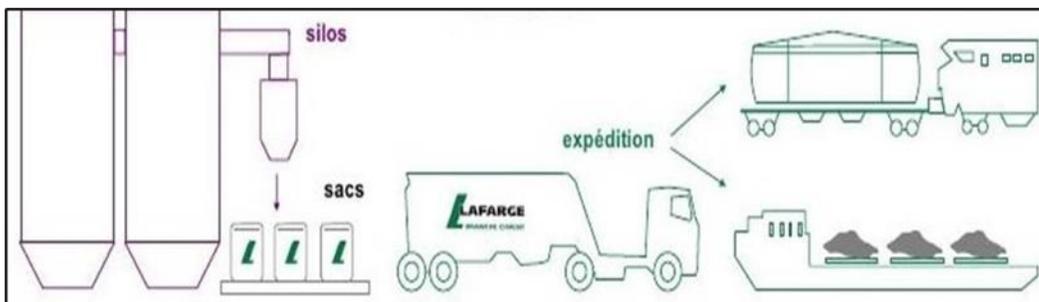


Figure I.9 : Expédition en sac ou vrac.[1]

I.2 PRESENTATION DE BROYEUR :

I.2.1 Introduction :

Les systèmes de broyage avec des broyeurs à boulets sont utilisés à travers le monde depuis des dizaines d'années. De nombreuses améliorations ont été apportées comme l'utilisation des nouvelles technologies.

L'importance du broyage en cimenterie est considérable, au niveau du cru, il conditionne une bonne part de la cuisson et au niveau du clinker il conditionne la qualité du ciment que l'on désire obtenir.

I.2.2 Présentation de sujet :

Le sujet qui nous a été proposé par la direction maintenance de la cimenterie de MEFTAH (S.C.M.I) consiste à faire une étude technologique du broyeur à boulets et d'élaborer son plan de maintenance. Le broyeur à boulet est un équipement stratégique et très complexe, ii est situé dans la zone Cru et ciment juste après le séparateur statique. Il fonctionne en parallèle avec le séparateur. Avec un mode de fonctionnement 24 heures par jour.

Le broyeur à boulets est un processus dans la chaîne de production du ciment. L'est constitué d'un cylindre en tôle forte, blindée à l'intérieur par des plaques en acier ou manganèse, reposant le plus souvent sur des tourillons. Le broyeur utilisé à MEFTAH est un broyeur à deux compartiments et à attaque centrale avec un seul réducteur assurant la liaison entre le broyeur lui-même et le moteur d'entraînement.



Figure I.10 : broyeur a boulet.[14]

I.2.2.1 Les caractéristiques principales : [14]

I.2.2.1.1 Description de l'unité d'intervention :

- Désignation : broyeur à boulets type : R10.

- N° commande : CM71-14.
- N° série : ML1238.

I.2.2.1.2 Dossier technique du broyeur à boulets :[14]

- Fournisseur : KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES (KHI).
- Système de broyage : circuit ferme.
- Débit : 240t/h.
- Longueur de la virole :12500mm.
- Diamètre intérieur : 4600mm.
- Epaisseur de la virole : 50mm.
- Poids :889000 KG.
- Vitesse de broyeur : 14.50 tr /min.
- Nombre de compartiment : 2.
- Corps bruyants nécessaire : 265 t (charge normale).

I.2.2.1.3 Caractéristique du moteur principale :

- Puissance : 4000 KW 5500V
- Vitesse de moteur : 750tr/min
- Puissance absorbée : 2700 KW (mesure en sous station)[14]

I.2.2.1.4 Caractéristique du réducteur :[14]

- Réducteur planétaire MAAG.
- Type : CPU30. 2 étages, 3 planétaires par étage, porte planétaire rotatif.
- Puissance : 4000 kW.
- Fournisseur : FLS.
- Vitesse d'entrée : 742.5 tr/min.
- Vitesse de sortie : 14.7 tr/min.
- Dimensions : Longueur : 3598mm.
- Largeur : 3310mm.
- Diamètre extérieur 2eme étage : 3120mm.
- Poids : Premier étage complet environ : 13000kg.
- Deuxième étage complet environ : 45000kg.
- Poids total environ 58000kg.

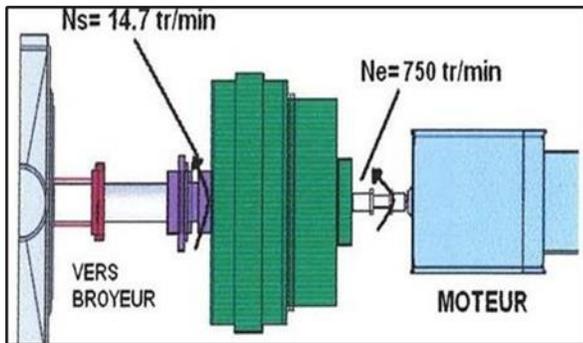


Figure I.11: Le réducteur de vitesse.[14]

I.2.2.2 Principe de fonctionnement :

La force motrice du moteur électrique (2) est transmise par le réducteur (3) qui réduit la vitesse de moteur de 742.5 tr/min à 14.7 tr/min, cette vitesse est transmise jusqu'à l'arbre de transmission du broyeur par l'accouplement rigide (4), qui fait tourner la virole du broyeur.

Le broyeur tourne avec sa charge de boulets à une vitesse d'environ 70% la vitesse critique, qui est celle à laquelle les boulets commencent à rouler sur toute la circonférence du cylindre. De cette manière, les matériaux (c'est-à-dire le calcaire, le gypse et les ajouts) sont concassés et pré-broyés entre les boulets et entre le revêtement et les boulets.

Dans le compartiment de broyage grossier, la granulométrie des matériaux passe de 25mm moyenne à une taille qui (immédiatement avant leur arrivée sur la cloison de séparation) rend possible leur broyage par les boulets bien plus petits qui se trouvent dans le compartiment de broyage fin.[14]

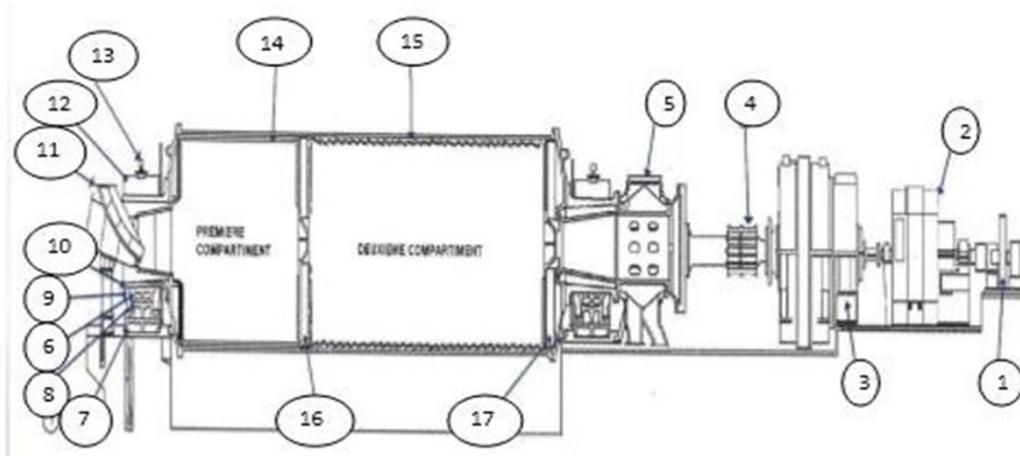


Figure I.12: La chaine de broyeur

Nomenclature :		
repère	Nombre	Désignation
1	1	Systeme de virage.
2	1	Moteur.
3	1	Réducteur.
4	3	Accouplement rigide.
5	1	Bâti d'évacuation.
6	2	Coquille de palier inférieur.
7	2	Embase du palier du tourillon.
8	2	Siège sphérique pour palier de tourillon.
9	2	Palier du tourillon
10	2	Portée du tourillon
11	1	chute d'alimentation.
12	2	Palier de tourillon du carter supérieur.
13	2	Extracteur de gaz pour palier du tourillon.
14	540	Blindage de concassage (releveurs).
15	446	Blindage auto classant.
16	1	Cloison intermédiaire.
17	1	Cloison de décharge.

Figure I.13 : Tableau de nomenclature de broyeur [14]

I.2.2.3 Procédés de broyage :[14]

Que ce soit pour le broyage du cru ou le broyage du clinker on peut rencontrer 2 types d'atelier de broyage :

- Le broyage en **CIRCUIT OUVERT**
- Le broyage en **CIRCUIT FERMÉ**

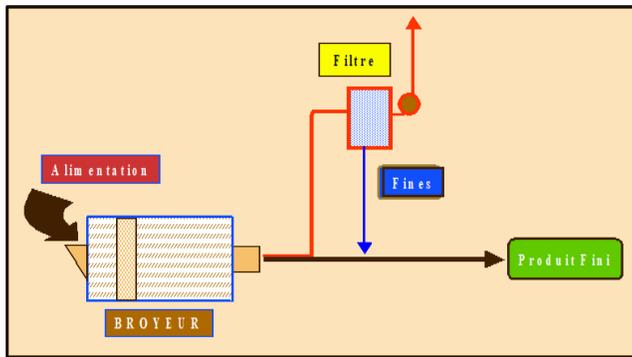


Figure 1.14 : Schéma du circuit ouvert.[14]

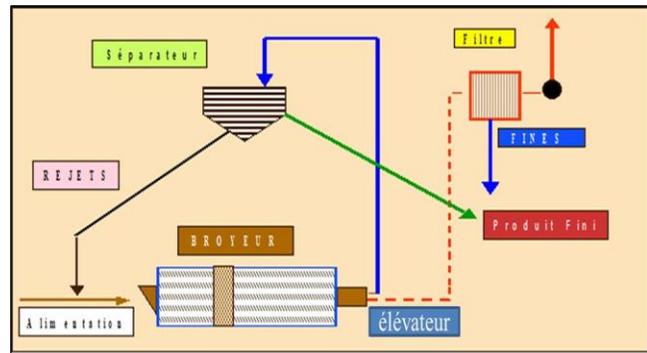


Figure I.15 : Schéma du circuit fermé.[14]

I.2.2.4 Les principaux composants du broyeur à boulets :[14]

- **La Virole :**
 - Les revêtements de la virole.
- **Les blindages :**
 - Le blindage releveur.
 - Le blindage classant.
- **La cloison :**
 - La cloison intermédiaire.
 - La cloison des décharges.
- **Paliers des tourillons .**
- **Les boulets .**

I.2.2.5 Vitesse critique du broyeur :

La vitesse critique d'un broyeur (**N**) est la vitesse à laquelle une particule de masse « m » se trouve à l'intérieur du broyeur et ne glissant pas sur la paroi sous l'effet de la force centrifuge, en d'autres termes, sa force de pesanteur (mg) serait égale à sa force centrifuge ($m \omega^2 R$).[14]

- $F = m \omega^2 R = mg$ avec $\omega^2 R = g$
- $[2 (N / 60)]^2 = 9.81$
- $N^2 = 4\pi^2 \cdot D / 9.81 \cdot 3600.3$
- $N = 20,64 \text{ tr/min}$

N : vitesse critique.

W : vitesse angulaire.

M : masse.

F : Force centrifuge.

G : gravité.

D : diamètre intérieur virole.

R : rayon.

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit le processus de fabrication du ciment qu'on a pu voir au sein de la cimenterie de MEFTAH. Afin de mieux cerner ce processus nous l'avons divisé en Cinq (5) zones principales, en commençant par la partie qui nous intéresse le plus c la zone crue. C'est cette partie sur laquelle se basera notre travail de migration et de supervision. Pour ce faire nous étourdirons dans le chapitre suivant le fonctionnement de système, et après nous avons basé notre recherche sur le broyeur a boulet, ses propriétés et son fonctionnement.

CHAPITRE II

APPLICATION DE LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE SUR LE BROYEUR

II Introduction :

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion des méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels. Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de maintenance, nous donnons les différents types de maintenance et les méthodes d'analyse.

II.1 Machine tournante :[5]

Est un convertisseur électromécanique (convertie l'énergie électrique à l'énergie mécanique ou bien l'inverse).

Les machines tournantes peuvent se distinguer :

- Un rotor.
- Une structure.
- Des liaisons.
 - Un rotor : Le rotor est une structure dont les éléments tournent autour d'une ligne de rotation. Le rotor fait de plusieurs matériaux (acier, cuivre, bois, plastique...).
 - La structure : La structure non rotative comprend les éléments essentiels suivants :
 - Les coussinets : De faibles dimensions au droit des tourillons du rotor. Des bagues peuvent être substituées aux coussinets : Roulements.
 - Les paliers : Qui relie les coussinets (bague) au stator.
 - Le stator : Relie mes coussinets avec le stator.
 - Le massif : Interface adapté au stator.
 - Le radier : Est un élément spécifique aux systèmes terrestres. Il assure la liaison entre le massif et sols et a pour mission de diminuer les pressions exercées au sol dans des limites acceptables.
 - Les liaisons : Le rotor est lié à la structure non rotative par des liaisons qui assurent le guidage du rotor. Les liaisons sont classées dans trois ensembles :
 - Les liaisons à fluide.
 - Les liaisons à roulements.
 - Les liaisons magnétique

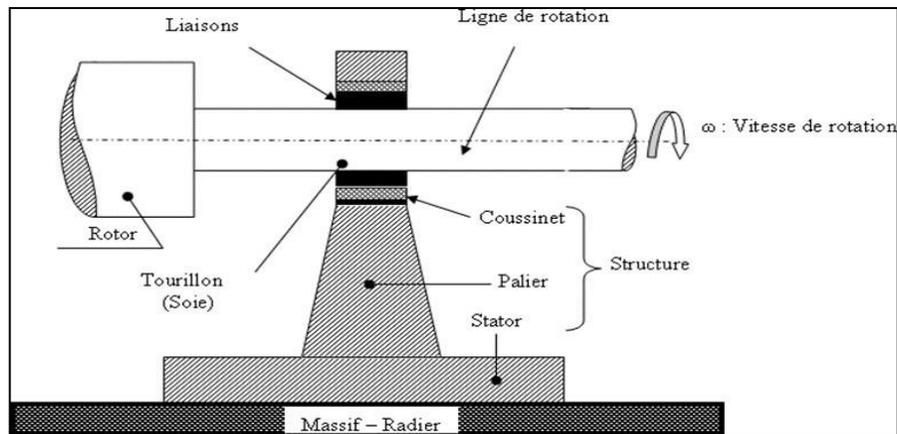


Figure II.1 : Elément générale des machines tournantes. [2]

II.1.1 Classement des machines :[5]

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

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

II.2 La Maintenance :

II.2.1 Définition de la maintenance :

D'après la norme AFNOR X60-010 :

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.[3]

II.2.1.1 Objectifs de la maintenance :[4]

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types :

- Objectifs financiers :
 - Réduire au minimum les dépenses de maintenance.
 - Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

- Objectifs opérationnels :
 - Maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles.
 - Assurer la disponibilité maximale de l'équipement à un prix minimum.
 - Augmenter la durée de vie des équipements.

II.2.2 Types de la maintenance :[4]

Les types de maintenance dépendent de l'utilisation du matériel, et généralement on distingue deux types de maintenance : Corrective et préventive (figure II.2).

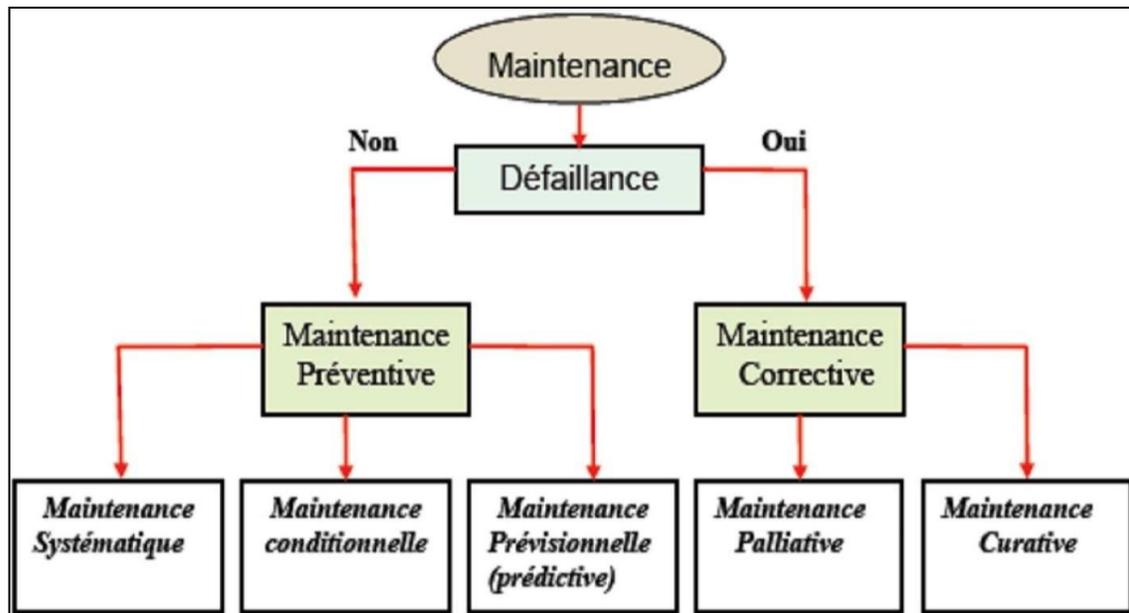


Figure II.2 : Types de maintenance. [3]

II.2.2.1 Maintenance préventive : [4] [6]

La définition donnée par l'AFNOR est la suivante : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

- **But de la maintenance préventive :**
 - Augmenter la durée de vie des matériels.
 - Diminuer la probabilité des défaillances en service.
 - Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.

II.2.2.1.1 Formes de maintenance Préventive :

Formes de maintenance Préventive peuvent être distinguées :

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

- Off Line : C'est le deuxième mode de la maintenance prédictive, il est conçu pour faire des contrôles s'assiste par des appareils portables.

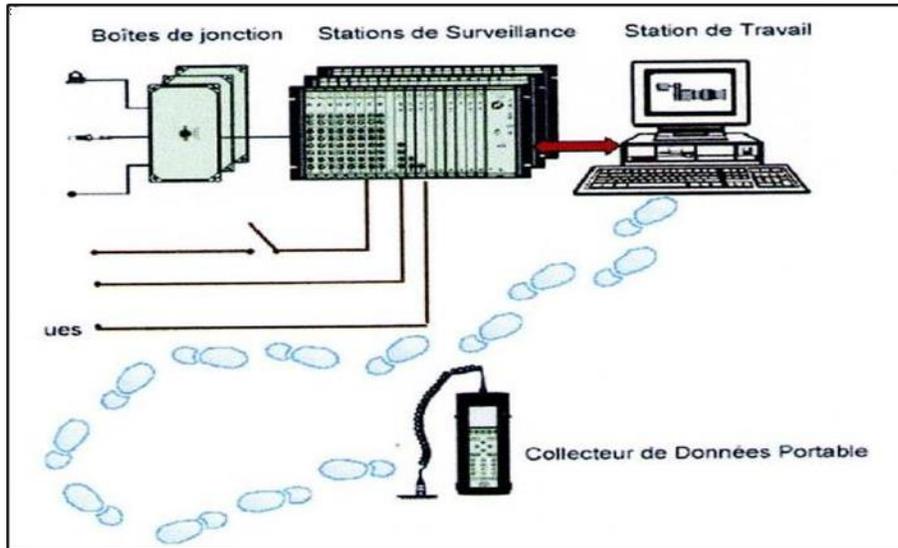


Figure II.4 : Maintenance Offline. [4]

II.2.2.1.2 Les avantages maintenance conditionnel :

- Bonne préparation de l'entretien.
- Durée d'immobilisation minimisée.
- Facilité de la programmation et le planning des travaux.
- Coûts directe et indirecte acceptable.

II.2.2.2 La maintenance corrective : [4] [5]

Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : Ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, le remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement. Elle se décompose en deux types :

II.2.2.2.1 Maintenance palliative :

Des réparations ou des remises en état à caractère provisoire sont effectuées.

II.2.2.2.2 Maintenance curative :

Activités de maintenance corrective destinées à permettre d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelé couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives.

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

II.2.2.3 Les avantages et les inconvénients de la maintenance corrective :

- Les avantages :
 - Budget de maintenance moyen.
 - Coûts directe minimisées.
 - Les frais de gestion de stocke moins important.
 - Simplicité du travail.
- Les inconvénients :
 - Temps d'arrêt et d'intervention relativement long
 - Coûts directe élevés.
 - Achat de pièce de rechange à prix élevés.
 - Organisation très difficile de l'intervention.

II.2.2.3 Maintenance améliorative :

Effectuée après une défaillance, elle a pour objet d'éviter le renouvellement de celle-ci par une action sur cause déterminante.

Effectuée avant que la défaillance ne devienne intolérable ou même qu'elle ne se manifeste, la maintenance constitue la démarche la plus évoluée de la maintenance.

Elle consiste à éviter les pannes et la défaillance ou tous au moins celles qui sont considérées comme prohibitives par une action sur les causes possible, y compris celles d'origine humaine.

II.2.3 Les opérations de la maintenance :

- Le dépannage : Le dépannage est une opération de maintenance corrective sur un bien en panne en Vue de le mettre en état de fonctionnement.
- La réparation : Intervention définitive et limitée de maintenance corrective.
- Les Inspection : Ce sont des activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des règles simples ne nécessite pas les outils spécifiques, ni L'arrêt de l'outil de production.
- Les visites : Ce sont des opérations de surveillance, qui rentrent dans le cadre de la maintenance préventive systématique, qui s'opèrent selon une procédure prédéterminée.
- Les contrôles : Ce sont des vérifications de conformité par rapport à des données fournis à l'avance et suivies d'un jugement.
- Les révisions : L'ensemble des actions d'examens de contrôle les interventions effectuées.

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

II.2.4 Les différents niveaux de maintenance :

Les opérations à réaliser sont classées, selon leur complexité, en cinq niveaux :

- Première niveau de maintenance : Il s'agit essentiellement de contrôle et de relevés du paramètre de fonctionnement des machines. Par exemple : Niveau d'huile. Niveau d'eau. Niveau de la réserve d'huile. Régime du moteur. Température de l'eau de refroidissement.

En règle générale les interventions de premiers niveaux sont intégrées à la conduite Des machines.

- Deuxième niveau de maintenance : Il s'agit des opérations de maintenance préventive qui sont régulièrement effectuées sur les équipements, par exemple : Remplacement des filtres à huile moteur. Remplacement des filtres à air. Vidange de l'huile de moteur. Analyse de liquide de refroidissement. Contrôle des points signalés pour le premier niveau.

Les pièces de rechange sont essentiellement du type Consommable, filtre, joints, huile, liquide de refroidissement.

- Troisième niveau de maintenance : Il s'agit des opérations de maintenance préventive, curative, de réglages et de Réparations mécanique ou électriques mineurs.

Les opérations réalisées peuvent nécessiter un diagnostic de panne par exemple : Contrôle des sécurités moteur.

Contrôle et réglage des protections électrique. Contrôle des refroidisseurs. Contrôle du démarreur. Contrôle et révision des pompes. Contrôle de l'isolement électrique. Remplacement d'une bobine de commande.

Toutes les opérations se font avec l'aide d'instructions de maintenance et d'outils spécifiques tels que les Appareils de mesure ou de calibrage. Ces opérations peuvent conduire à des opérations de quatrième niveau.

- Quatrième niveau de maintenance : Il s'agit d'opérations importantes ou complexes de la reconstruction de l'équipement.

Déculasser (révisions, rectification). Révision de la cylindrée. Contrôle d'alignement du moteur. Changement des pôles d'un disjoncteur.....

Les opérations sont réalisées par des techniciens bénéficiant d'un encadrement technique très spécialisé, d'un outillage général complet et d'un outillage spécifique. Elles font aussi appel à des ateliers spécialisés (rectification, résinage).

- Cinquième niveau de maintenance : Il s'agit d'opérations lourdes de rénovation ou de reconstruction d'un équipement. Ces opérations entraînent le démontage de l'équipement et son transport dans un atelier spécialisé.

Le cinquième niveau de maintenance est réservé au constructeur ou reconstruteur. Il nécessite des moyens similaires à ceux utilisés en fabrication.

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

II.2.5 Critère de choix de la forme de maintenance : [7]

Le choix de la forme de maintenance se fera en fonction de divers critères, résumés en :

- Connaissance sur le comportement du matériel.
- Historique.
- Banque de données et retour d'expérience.
- Coûts importants entraînés par les défaillances.
- Coûts inconnus.
- Panne totalement aléatoire.

II.3 Technique de surveillance :

Il existe plusieurs méthodes d'analyse tel que :

II.3.1 L'analyse d'huile : [8]

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 cette caractéristique 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. On prend comme référence les caractéristiques de l'huile neuve et on compare le résultat obtenu 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. [8]

II.3.2 Thermographie infrarouge : [9]

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 thermogramme, 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. [9]

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

II.3.3 Analyse vibratoire :

II.3.3.1 Introduction :

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. 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.). [8]

II.3.3.2 Notion sur vibrations mécaniques :

II.3.3.2.1 Définition de vibration :

C'est un mouvement autour d'une position d'équilibre .

II.3.3.2.1 Définition : (norme AFNOR) :

« Variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence ».

II.3.3.3 Les grandeurs de mesure : [10]

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

II.3.3.3.1 Déplacement vibratoire X (t) :

Le déplacement x (t) d'une vibration est décrit par l'équation :

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

Avec :

- X (t) : signal temporel.
- X₀ : amplitude maximale du signal.
- ω : Pulsation;
- ω = 2π f

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

- F : fréquence du signal
- ϕ : Déphasage par rapport à l'origine des temps.
- L'unité couramment utilisée est le micromètre [μm].

II.3.3.2 Vitesse vibratoire V (t) :

La vitesse v (t) de cette vibration s'obtient par dérivation du déplacement :

$$V(t) = d(x)/d(t) = x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\Rightarrow V(t) = V_0 \cdot \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (2.3)$$

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

II.3.3.3 Accélération vibratoire a(t) :

L'accélération a (t) de cette vibration s'obtient par dérivation de la vitesse :

$$A(t) = d(v)/d(t) = A_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \phi + H/2) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\Rightarrow a(t) = A_0 \cdot \sin(\omega t + \phi) \dots\dots\dots (2.5)$$

Les unités couramment utilisées sont [m/s^2] ou le [g], le g étant l'unité d'accélération de la pesanteur.

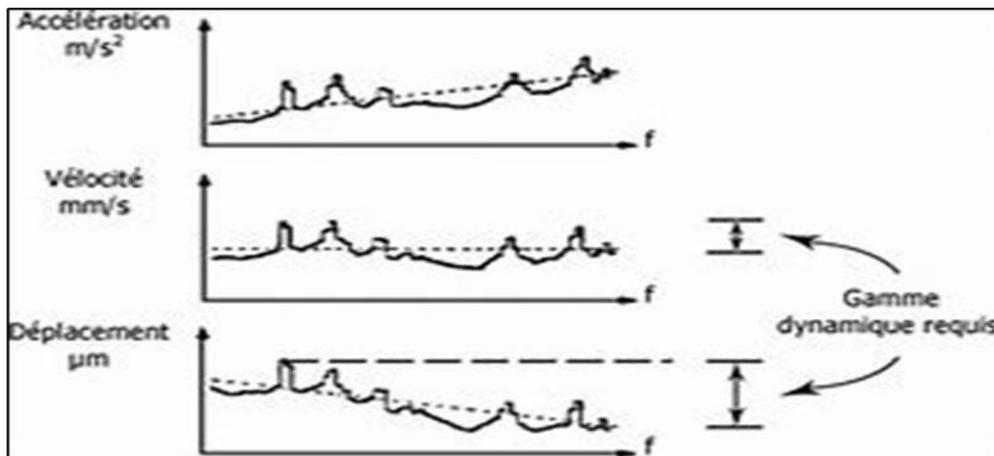


Figure II.5 : Les grandeurs des mesures. [10]

II.3.3.4 Caractéristiques d'une vibration : [10]

II.3.3.4.1 La fréquence :

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz.

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ cycle par seconde}$$

II.3.3.4.2 Relation entre fréquence et période :

Le Hertz est la fréquence d'un phénomène dont la période est d'une seconde (Source : Norme française NFX 02-202).

Si la fréquence (f) d'un phénomène est de 50 Hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou période T) est de $1/50^e$ de seconde soit 20 ms. Ainsi dans cet exemple :

$$F = 50 \text{ Hertz (50 Hz)} \quad T = 1/50^e \text{ de seconde}$$

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

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

II.3.3.4.3 Les unités :

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

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

Il est intéressant parfois d'exprimer des phénomènes liés à la rotation en multiple ou ordre de cette fréquence. Cette formulation présente l'intérêt de lier le phénomène vibratoire à une fréquence de référence (souvent la fréquence de rotation de la ligne d'arbres qui l'induit) et de pouvoir suivre l'amplitude de ses harmoniques (harmonique = composante dont la fréquence est un multiple d'une fréquence donnée), ce qui est très intéressant dans le cas de la surveillance de comportement vibratoire d'installations à vitesse de rotation variable. [10]

II.3.3.4.4 Grandeurs :

Comme tout mouvement, une vibration peut être étudiée selon trois grandeurs :

- Le Déplacement
- La Vitesse
- L'Accélération

Ces grandeurs physiques sont liées entre elles par des relations mathématiques. Influence de la

Chapitre II Application de la maintenance conditionnelle sur le broyeur

grandeur utilisée.

II.3.3.4.5 Amplitude :

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

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

De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs pour caractériser son amplitude. [10]

- L'amplitude crête (A_C) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.
- L'amplitude crête à crête (A_{C-C}) : appelée « peak to peak » (A_{p-p}) en anglais. Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée « amplitude double » ($A_{C-C} = 2A_C$).
- L'amplitude efficace (A_{eff}) : ou RMS en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

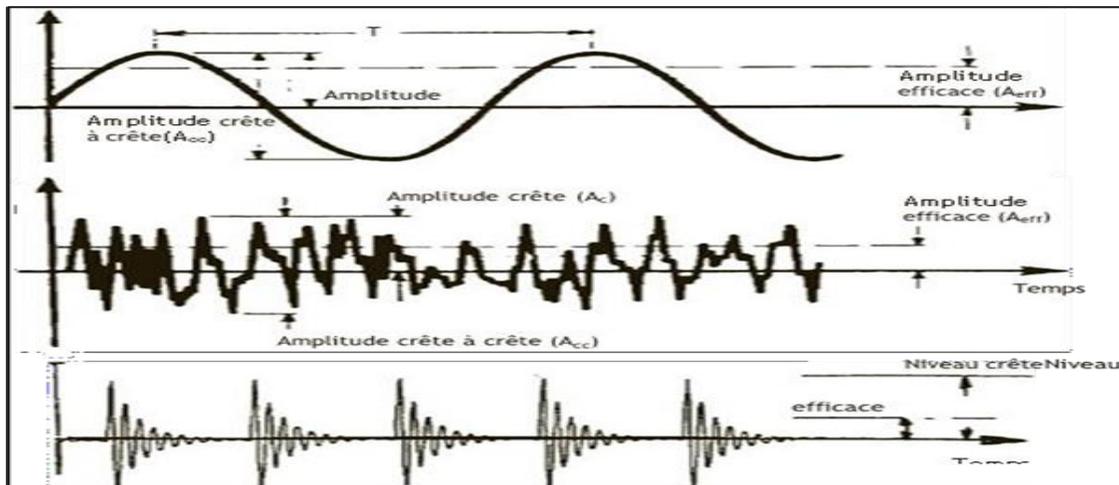


Figure II.6 : Représentation des différentes amplitudes. [10]

II.3.3.5 Les différentes Type des signaux vibratoire :

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité). On distingue ainsi les vibrations :

- Harmoniques.
- Périodiques.
- Transitoire.

II.3.3.5.1 Régime harmoniques :

Un signal harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps (Figure II.7) est représenté par une sinusoïde.

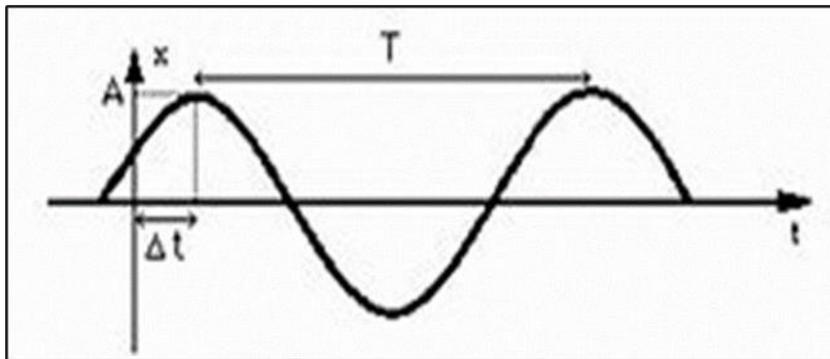


Figure II.7 : Signal vibratoire harmonique. [10]

Elle est décrite par l'équation suivante :

$$X(t) = X \sin(\omega t + \varphi)$$

- ω : vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$).
- F : fréquence du mouvement.
- φ : phase de mouvement par rapport à un repère dans le temps.

II.3.3.5.2 Régime Transitoire :

Un signal apériodique est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est à dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps.

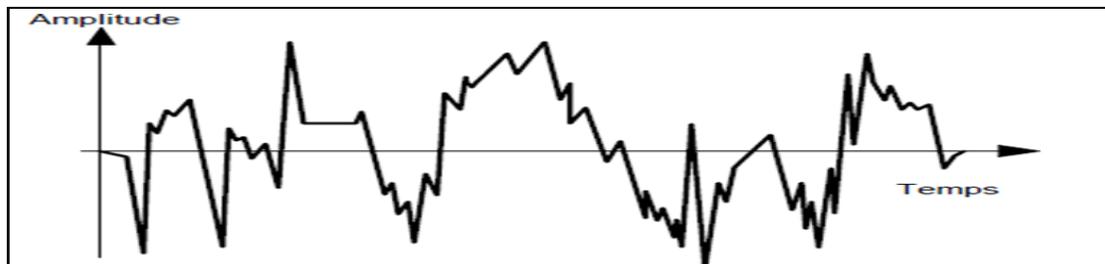


Figure II.8 : Signal vibratoire apériodique. [10]

II.3.3.5.3 Régime périodiques :

Un signal périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période. Une telle vibration est créée par excitation, elle a le même périodique. C'est le cas le plus fréquemment rencontré sur les machines. Une vibration périodique est la composée de plusieurs vibrations harmoniques. [10]

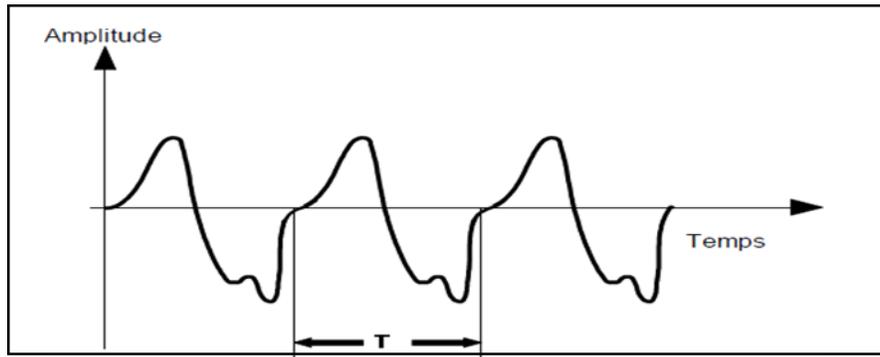


Figure II.9 : Signal vibratoire périodique. [10]

II.3.3.6 Les différentes représentations du signal :

II.3.3.6.1 Représentation temporelle :

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

Ce type de représentation temporelle est aisé à exploiter lorsque le signal délivré par le capteur est simple (par exemple, signal délivré par un capteur de proximité représentant le déplacement relatif d'un arbre dans son palier (vibration de type sinusoïdal induite par le balourd du rotor) ...). Il est encore facile à exploiter lorsque ce signal a fait l'objet d'un traitement approprié (filtrage, moyennage synchrone), mais il devient hélas vite inextricable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples. [11]

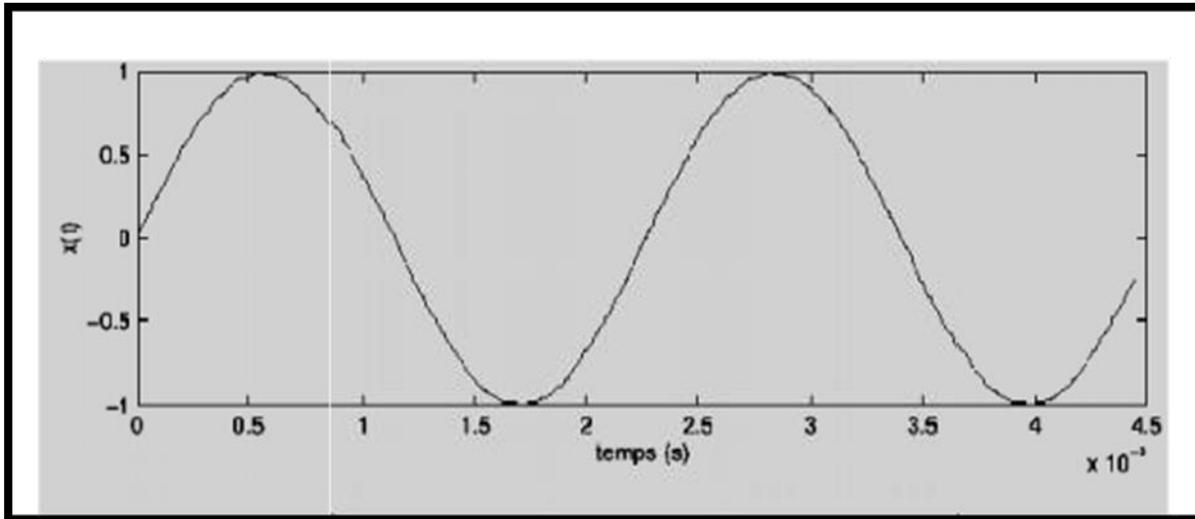


Figure II.10 : Représentation temporelle.

II.3.3.6.1 Représentation vectorielle :

Le signal est la somme vectorielle de deux vecteurs imaginaires tournant en sens inverse à la fréquence f_0 et d'amplitude $A/2$.

A chaque instant t , les parties imaginaires des deux vecteurs s'annulent. Les parties réelles s'additionnent et valent ensemble. [11]

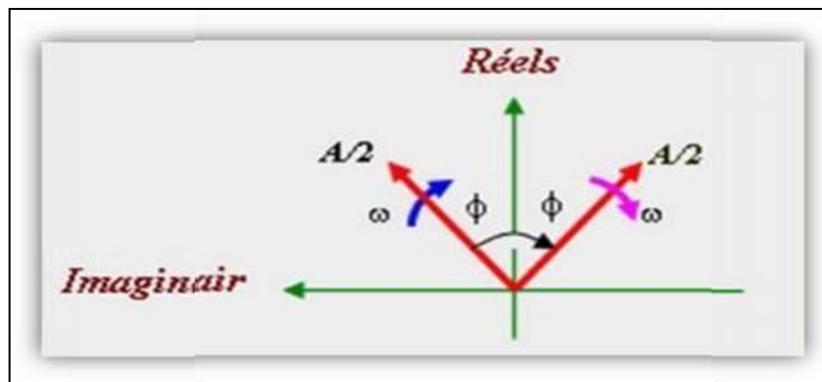


Figure II.11 : Représentation vectorielle.

II.3.3.6.2 Représentation spectrale :

Faute de pouvoir représenter le signal vibratoire en fonction du temps sous une forme facilement exploitable, on a recherché à le représenter dans un diagramme amplitudes/fréquences appelé spectre (parce qu'intemporel). Avec ce type de représentation, chacune des composantes sinusoïdales élémentaires constituant le signal est parfaitement définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale du signal. [11]

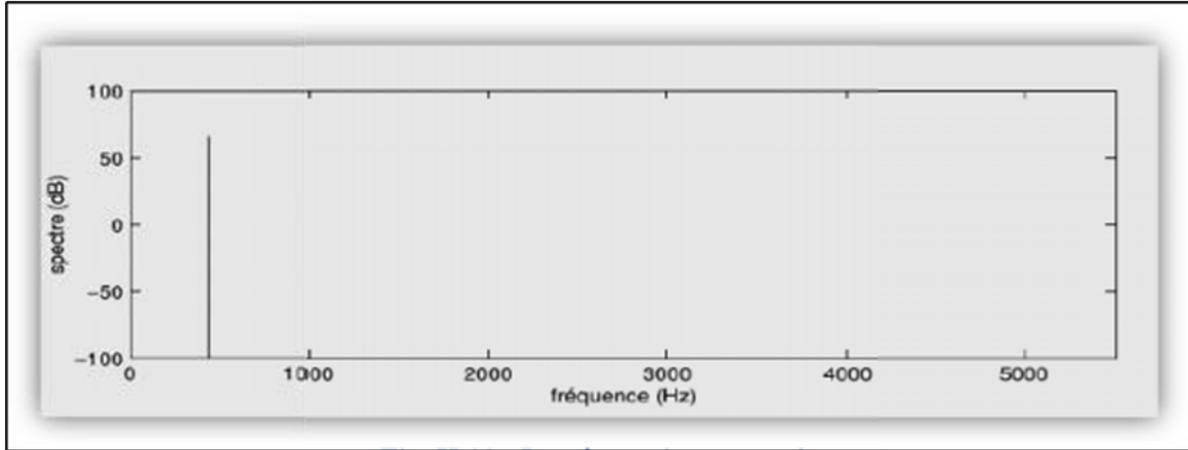


Figure II.12 : Représentation spectrale.

II.3.3.7 La chaine de mesure de vibration :

Le signal électrique doit être conditionné pour être traité par les appareils d'analyse. Ce conditionnement est donné par les différents points suivants :

- L'amplification du signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable, réalisée par le préamplificateur.
- L'intégration du signal pour passer à la vitesse ou au déplacement réalisée par l'intégrateur.
- La limitation de la plage de fréquences du signal, réalisée par les filtres passe-haut et passe-bas. [11]

II.4 Conclusion :

La maintenance pose à la fois un problème d'économie et de performance. En effet, certaines machines ne peuvent s'arrêter de fonctionner sous peine d'engendrer d'énormes pertes financières, mais un défaut technique peut aussi nuire à la qualité d'un produit. Dans ce cas, la maintenance corrective est insuffisante et la maintenance préventive devient indispensable. Cependant, la maintenance systématique est coûteuse car l'usure des pièces dépend beaucoup des conditions de fonctionnement.

CHAPITRE III

L'ANALYSE DES DEFAUTS DU BROYEUR

III Introduction :

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

III.1 Défaut de balourd :

Le balourd est le résultat d'un ensemble de forces engendrées par les écarts existant entre les centres de gravité des différents éléments constituant le rotor et son axe de rotation. Cette force centrifuge, issue de ces défauts de « non-concentricité » ou d'ajustage, est proportionnelle à la masse de matière qui crée ce déséquilibre et au carré de la vitesse. [10]

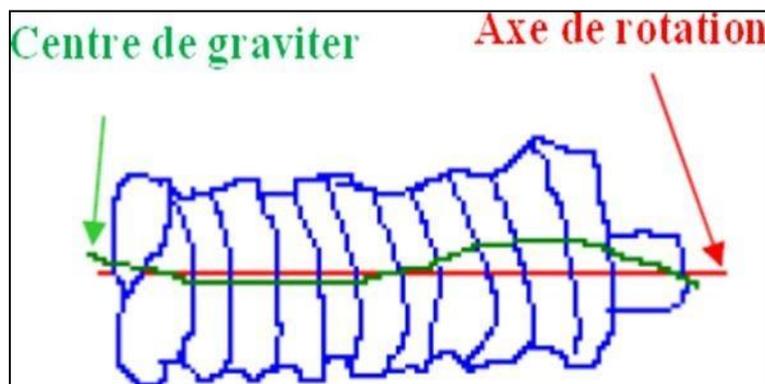


Figure III.1 : Tolérances d'usinage sur un rotor. [12]

Ce balourd provient généralement de défauts d'usinage, d'assemblage et de montage, ou sont la conséquence :

- D'une altération mécanique : Perte d'ailette, érosion ou encrassement.
- D'une altération thermique : Déformation suite à des dilatations différentes, des matériaux constituant le rotor ou a des différences de température localisées ... [12]

III.1.1 Différents types de balourd :

De même que l'analyse des déphasages entre composantes vibratoires d'ordre 1 de la fréquence de rotation selon deux directions radiales orthogonales d'un même palier permet de distinguer effort tournant et effort directionnel, l'analyse des déphasages entre ces mêmes composantes pour deux paliers consécutifs permettra de distinguer un balourd statique ne nécessitant qu'un équilibrage monoplan d'un balourd dynamique nécessitant un équilibrage multiplan.[10]

➤ **Balourd statique :**

Les deux paliers supportant le rotor vont subir, en même temps, l'effort centrifuge dû au déséquilibre. Il n'y aura donc aucun déphasage entre les mesures prises au même point sur les deux paliers.

- L'axe d'inertie est parallèle à l'axe de rotation,
- Même phase sur chaque roulement.
- Principalement des vibrations radiales.[1]

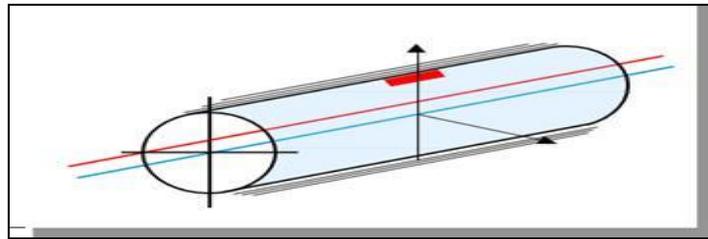


Figure III.2: balourd statique. [13]

➤ **Balourd de couple :**

- L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle.
- Vibrations radiales et horizontales à la fois.
- Souvent un balourd (déséquilibre) statique et dynamique à la fois.

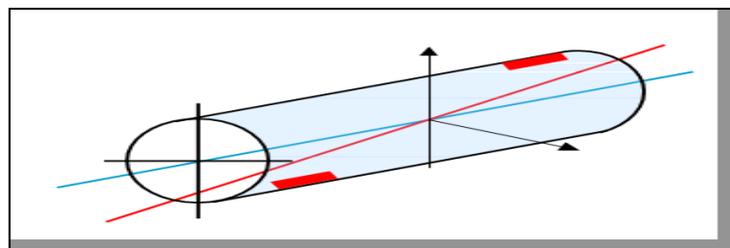


Figure III.3 : Balourd de couple. [13]

➤ **Balourd dynamique :**

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

- C'est une combinaison des deux premiers, il correspond au cas réel le plus fréquent.
- Déphasage de 180° autour du roulement.
- Principalement des vibrations radiales. [10]

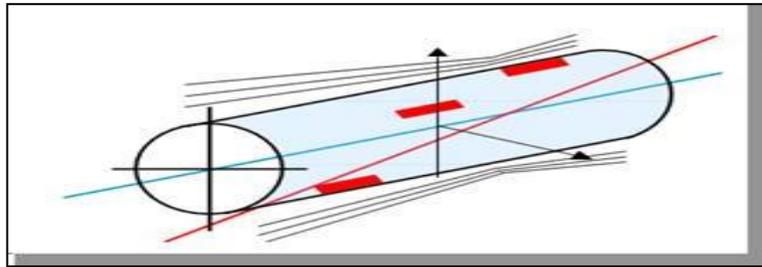


Figure III.4 : balourd dynamique. [13]

III.1.2 Mesure :

Généralement, le spectre est issu d'une mesure prise radialement (souvent dans la direction radiale horizontale), excepté pour les rotors en porte-à-faux pour lesquels on peut constater également une vibration dans la direction axiale.[12]

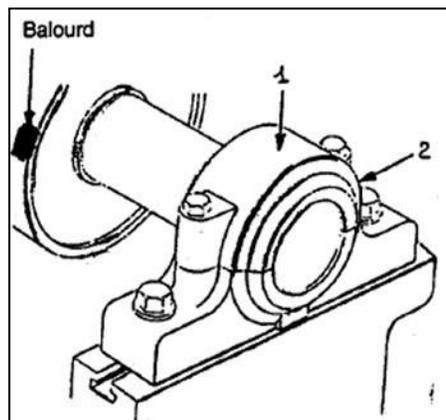


Figure III.5 : Points de mesure pour un défaut de balourd. [12]

Si on mesure l'amplitude du signal vibratoire délivré par un capteur placé sur le palier supportant un rotor déséquilibré, on remarque que l'amplitude sera maximale lorsque la masse sera en haut du rotor et elle sera minimale lorsqu'elle sera en bas, et ainsi de suite, à chaque tour du rotor. Le signal vibratoire est par unité de temps, donc de fréquence égale à la fréquence de rotation du rotor.[12]

III.1.3 Spectre typologique :

Le balourd va induire, dans un plan radial, une vibration dont le spectre présente une composante dont la fréquence de base correspond à la fréquence de rotation f_0 . Elle représente alors le pic le plus élevé avec des pics d'amplitudes plus faibles sur les harmoniques de f_0 . [12]

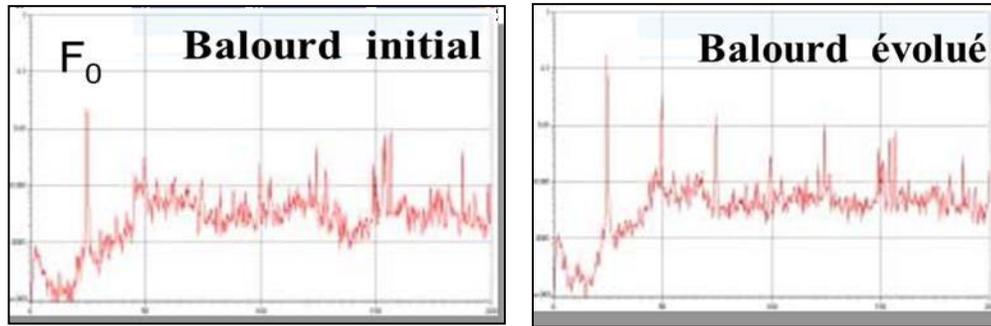


Figure III.6 : Spectre d'un défaut de balourd.[13]

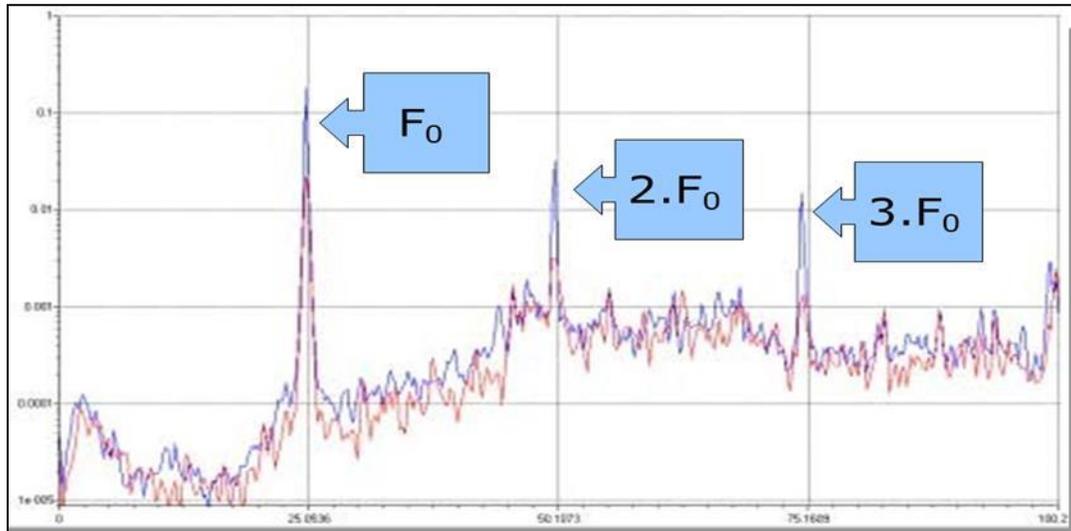


Figure III.7 : Spectres d'un défaut de balourd.[13]

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

- Jeux sur les paliers trop importants.
- (problème de fixation).
- Défaut rotorique sur un moteur asynchrone (barres, anneau).
- Déformation d'un rotor (effet thermique).
- Résonance de la structure.

III.2 Défaut d'alignement :

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe.[12]

Lorsque la machine fonctionne et que les arbres tournent, les signes suivants peuvent indiquer les défauts d'alignement :

- Une oscillation des arbres.

- Des vibrations excessives.
- Une température des paliers est élevée.
- Des bruits inhabituels.

III.2.1 Désalignement d'arbres accouplés :

Les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement ou un désalignement radial (défaut de concentricité) ou la combinaison des deux (figure. III.8).[12]

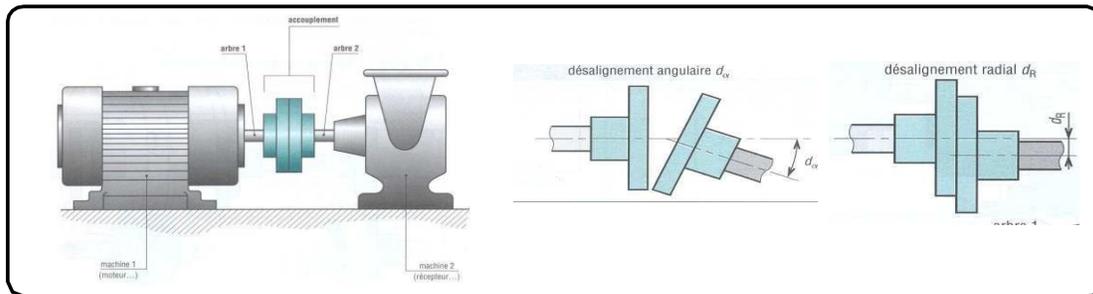


Figure III.8 : Défauts d'alignement d'arbres.[12]

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

III.2.2 Typologie du délignage :

Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à 2.F0, 3.F0 ou 4.F0 dans toutes les directions de mesurages.

L'évolution du défaut de lignage entraîne l'augmentation des raies caractéristiques.

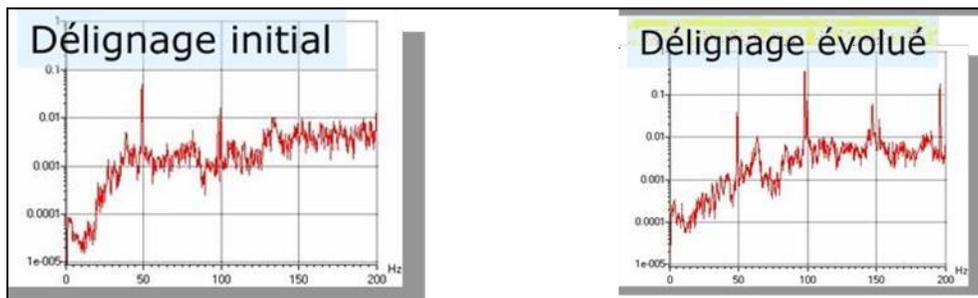


Figure III.9 : spectre réel d'un défaut d'alignement. [13]

Spectres superposés :

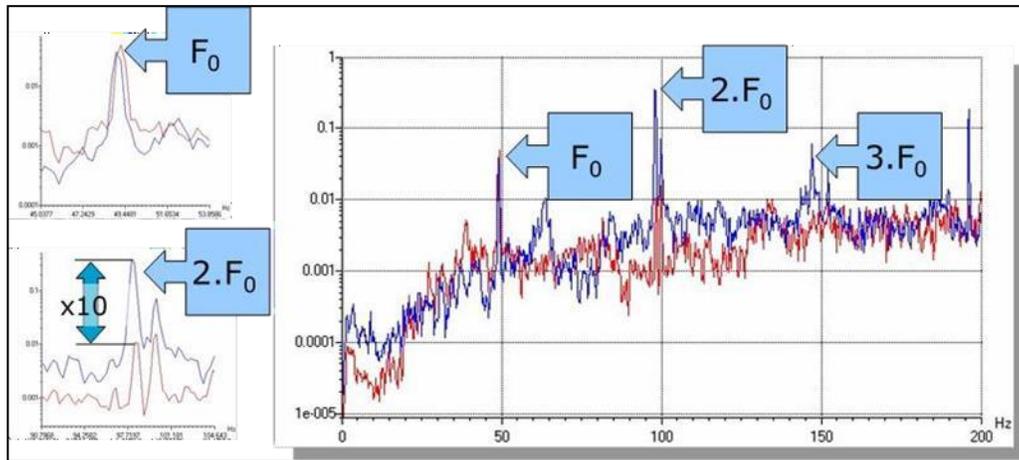


Figure III.10 : spectres superposés d'un défaut d'alignement. [13]

III.2.3 Désalignement des paliers :

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques [figure III.11]. Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier, mais également d'un mauvais calage des pattes de fixation ou d'une déformation de châssis (par exemple à la suite de contraintes thermiques), qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.[10]

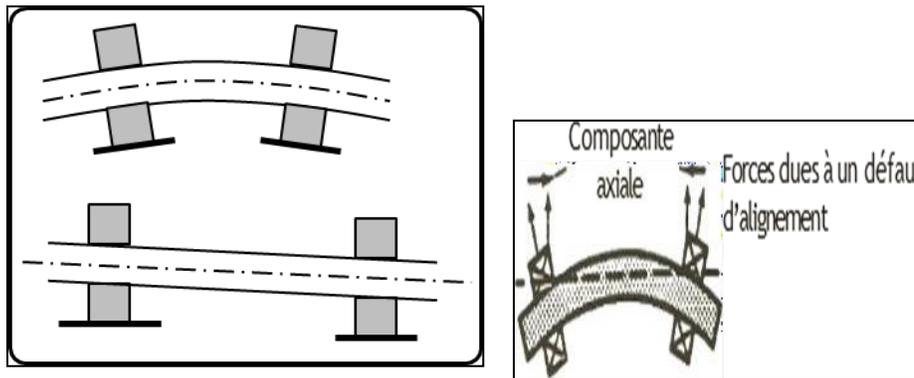


Figure III.11 : Désalignement de paliers se traduisant par une flexion de l'arbre. [13]

III.2.4 Origines du délignage et 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.

III.3 Défauts desserrage :

L'image vibratoire induite par un desserrage ou par une fissuration d'ancrage ou de bâti est également caractérisée par la présence d'une composante d'amplitude prépondérante dont la fréquence peut également correspondre à l'ordre 1 de la fréquence de rotation. Toutefois, un desserrage ou une fissuration d'ancrage ou de bâti se traduisent par une diminution de raideurs modales avec, pour conséquence dynamique, une diminution significative de fréquence de certains modes propres, fréquences qui peuvent alors coïncider avec un des premiers ordres de la fréquence de rotation dont l'amplitude sera alors prépondérante. Cependant, dans certains cas de desserrage associé à un défaut de balourd ou de désalignement, le mouvement originel de type sinusoïdal du décollement du palier ou du bâti sera brusquement stoppé en fin de course du desserrage créant ce que l'on appelle une troncature du signal. Son image spectrale sera constituée d'un peigne de raies dont le pas correspondra toujours à la fréquence de rotation et dont l'amplitude et l'étendue spectrale dépendront de l'importance de la troncature. Le déphasage relatif pour deux composantes radiales orthogonales sera voisin de zéro ou de 180° , selon la position des capteurs par rapport au plan de desserrage ou de fissuration. [10]

III.4 Les défauts des engrenages :

Un engrenage est composé de l'ensemble de deux roues dentées engrenant l'une avec l'autre, permettant de transmettre de la puissance entre deux arbres rapprochés avec un rapport de vitesse constant. Selon la position relative des deux arbres, on distingue trois classes d'engrenages [figure III.12] :

- **Les engrenages à axes parallèles :** Ce type est nommé aussi cylindrique dont Les deux arbres sont parallèles. Diverses catégories sont distinguées selon la géométrie des dents suivant la génératrice. On trouve les dentures droites, les dentures hélicoïdales, etc....
- **Les engrenages à axes concourants :** Ce type est nommé aussi conique dont les arbres sont tels que leurs axes de rotation se coupent. Selon la géométrie des dents, on distingue les sous catégories des : Dentures droites, hélicoïdales, spirales.
- **Les engrenages à axes quelconques :** Ces engrenages sont nommés aussi gauches dont les axes des arbres n'ont pas un point commun et occupe une position relative quelconque. Dans cette catégorie se retrouvent par exemple les dentures hypoides. [12]

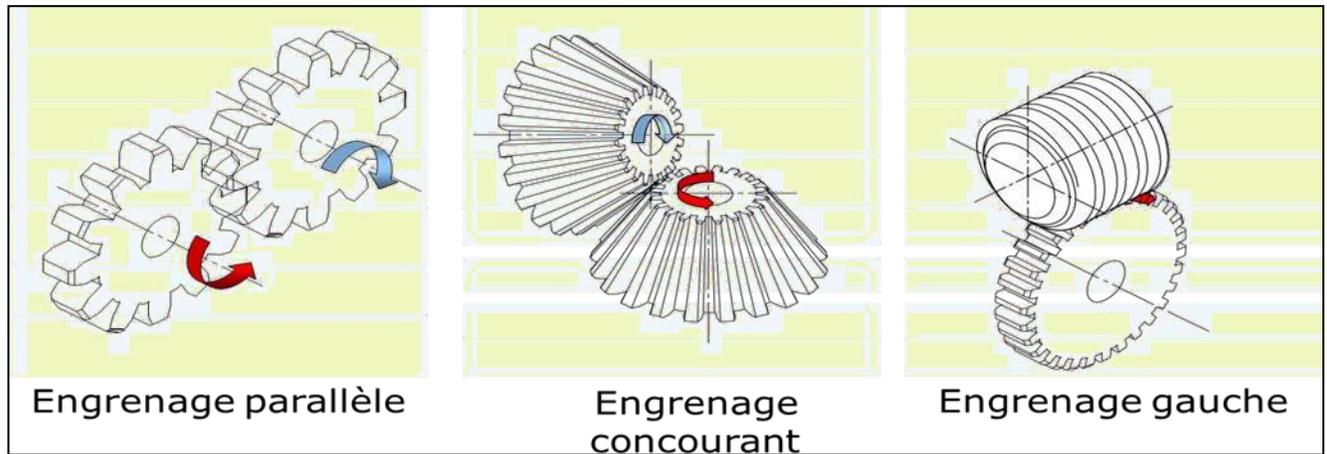


Figure III.12 : Différents types d'engrenage. [13]

Les dentures d'engrenage peuvent être droites, hélicoïdales ou à chevrons [figure III.13]. Les efforts, en conséquence, sont :

- Uniquement radiaux sur les engrenages parallèles, à denture droite ou à chevrons,
- Mixtes (radiaux et axiaux) sur les engrenages à denture hélicoïdales, les engrenages coniques et les engrenages à roue et vis sans fin.[12]

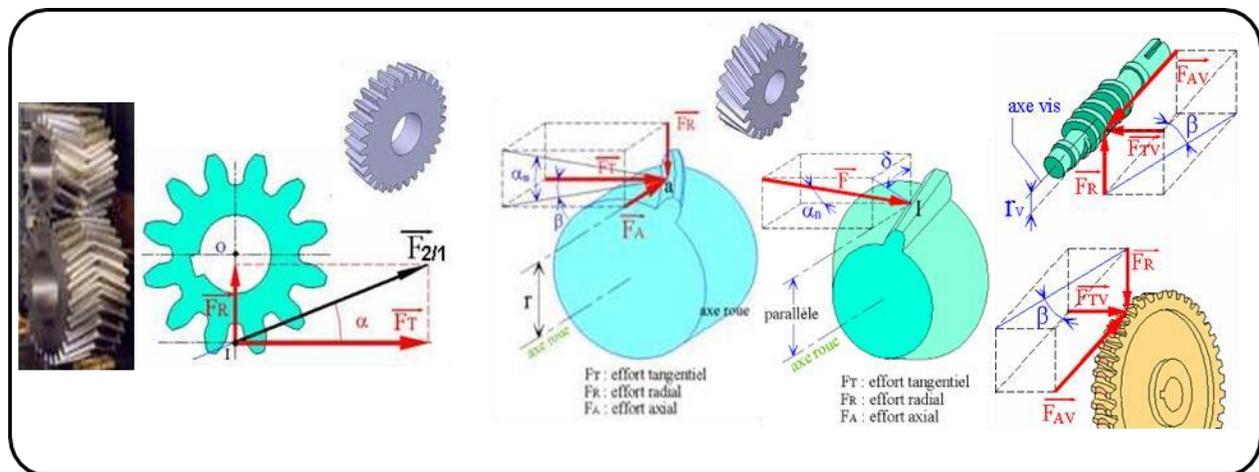


Figure III.13 : Efforts sur les dents d'engrenage selon le type de denture. [12]

III.4.1 Fréquence d'engrènement :

Observons un engrenage, composé de deux roues dentées 1 et 2, présentant N_1 et N_2 dents et tournant aux fréquences f_1 et f_2 . Chaque fois qu'une dent de la roue menante 1 s'engage dans la roue menée 2, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement f_e égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents.

$$f_e = N_1 \cdot f_1 = N_2 \cdot f_2$$

- f_e : Fréquence d'engrènement.
- f_1 et f_2 : fréquences de rotations des roues 1 et 2.
- N_1 et N_2 : Nombre des dents des roues 1 et 2.

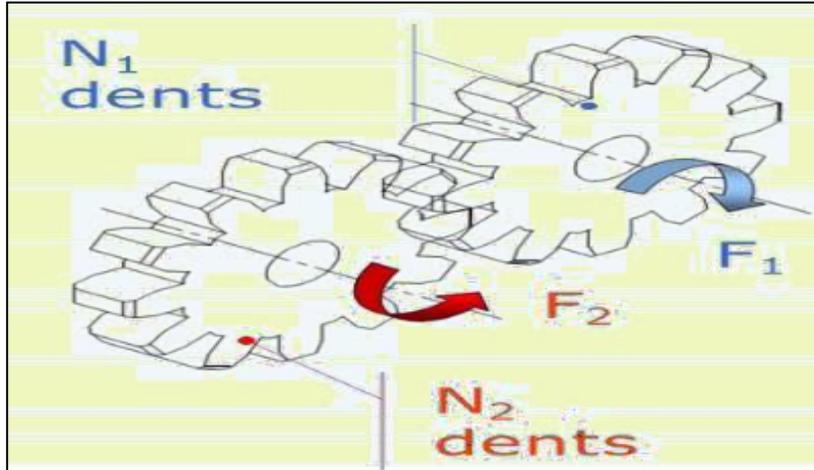


Figure III.14 : Fréquence d'engrènement. [13]

Le rapport des vitesses des deux arbres est lié au nombre de dents de chacun des pignons en contact :

$$N_1 \cdot F_1 = N_2 \cdot F_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

III.4.2 Signatures vibratoires des défauts d'engrènement :

➤ Usure généralisée de la denture :

L'usure générale de la denture se traduit par un matage du profil des dents. On obtient un choc périodique à la fréquence d'engrènement, qui génère un peigne de raies d'amplitudes décroissantes.

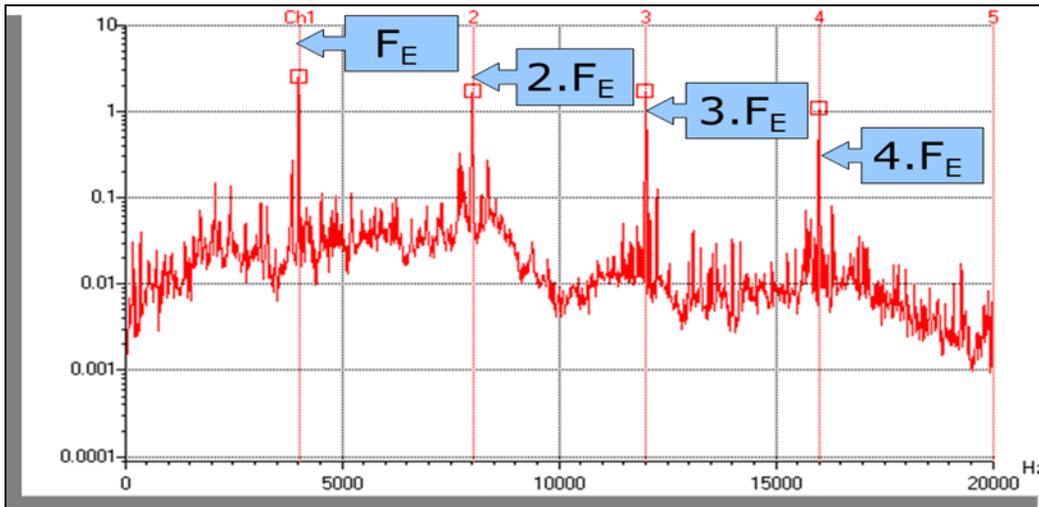


Figure III.15 : spectre théorique de l'usure généralisée de la denture.[13]

➤ **Entraxe insuffisant (jeu insuffisant au fond de denture) :**

Si l'entraxe des arbres portant les deux roues est insuffisant, il se produit un engrenement en fond de denture. La dent menante force à l'engagement et au déengagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture.

En analyse spectrale ce phénomène se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement F_e et la disparition partielle, voire totale de l'amplitude à cette fréquence [figure III.18].

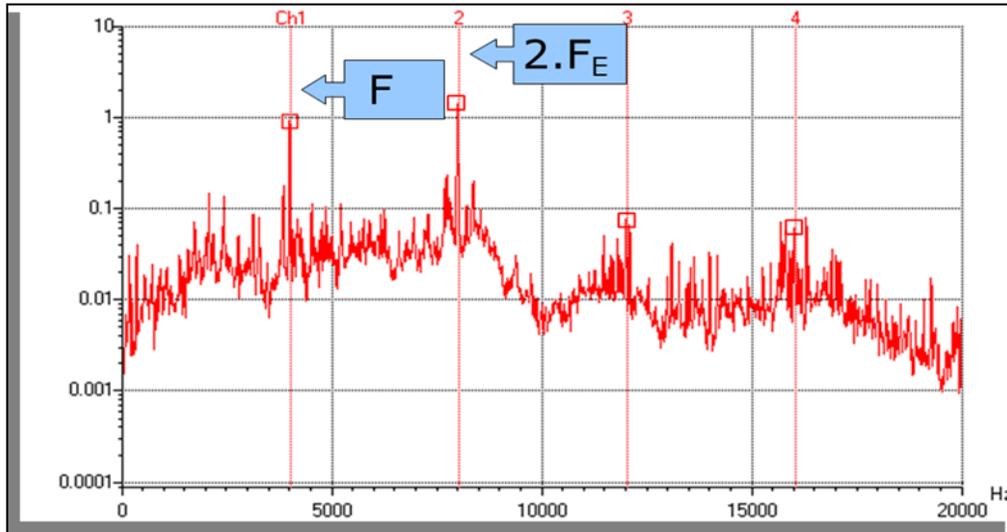


Figure III.16 : Spectre d'un engrenage présentant un jeu insuffisant.[13]

➤ **Jeu de fond de denture trop grand :**

On obtient alors un spectre de choc dur périodique, à la fréquence d'engrènement (présence de nombreuses harmoniques de niveau du même ordre de grandeur) (figure III.19).[12]

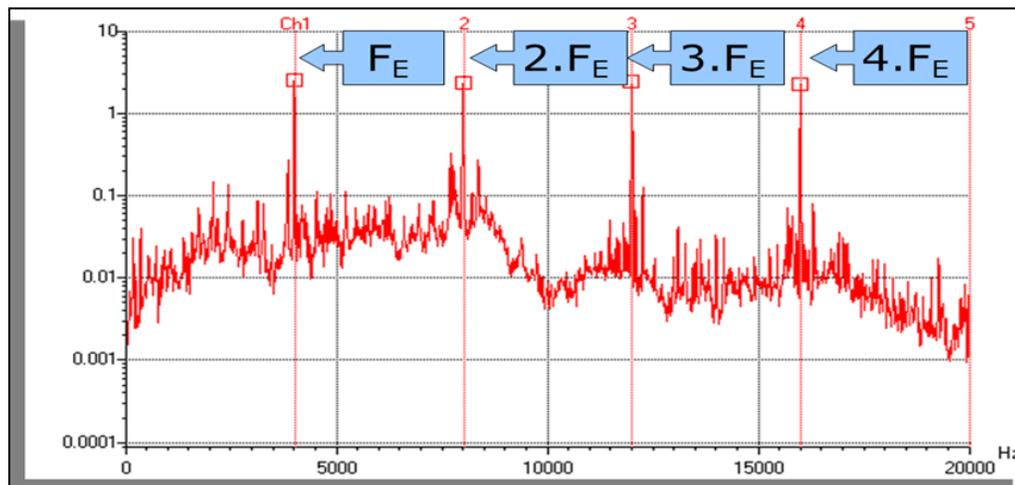


Figure III.17 : Spectre d'un engrenage présentant un jeu de denture.[13]

Ce jeu trop grand peut être :

- Une conséquence de l'usure de la surface de denture, le spectre est alors une "suite logique" de celui (nombre et niveau des harmoniques élevées).
- Dû au montage, le spectre apparaît dès l'origine

III.5 Les paliers lisses hydrodynamiques :

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.

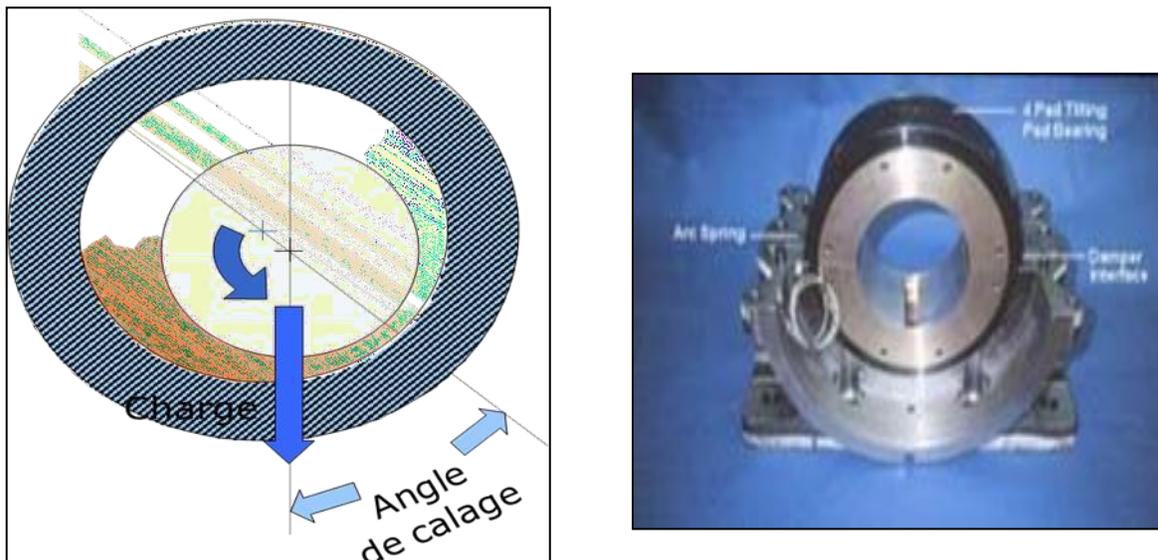


Figure III.18 : paliers lisses hydrodynamiques.[3]

III.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 :

- Charge appliquée au rotor
- Vitesse de rotation
- Viscosité de l'huile

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

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre en conclure : Pour l'identification d'anomalies à un stade précoce, le suivi de leurs évolutions et le diagnostic de l'état d'une machine ne sont possibles que si préalablement, l'on connaît les symptômes vibratoires associés à chaque défaut susceptible de l'affecter, c'est-à-dire si l'on connaît les images vibratoires induites par ces défauts.

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV. Partie théorique :**IV.1. Introduction :**

Les capteurs de vibration contrôlent des machines dans les processus de production et aident la personne responsable à protéger les installations de surcharge. Les capteurs de vibration détectent les vibrations d'une machine et transforment le signal en un signal normalisé. Cela permet une intervention immédiate dans le processus de production pour protéger les machines et, dans certains cas, éviter les pannes pendant la production.

IV.1.1. Chaîne de mesure : [9]

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

1. Transformer la vibration mécanique en un signal électrique. C'est le rôle du capteur. La grandeur électrique délivrée peut être : – une tension comme dans le cas d'un signal issu d'un accéléromètre à électronique incorporée (ICP) ou d'un vélocimètre inductif. La sensibilité du capteur s'exprime alors en mV (millivolts) par unité physique, – une charge électrique comme dans le cas d'un accéléromètre piézoélectrique dont la sensibilité s'exprime en pico-coulomb par g ou en m/s^2 (mètres par seconde carrée).
2. Conditionner le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable. C'est le rôle du préamplificateur. Indispensable pour les accéléromètres piézoélectriques, le préamplificateur peut être ou non incorporé au capteur et il permet soit une simple amplification de la tension de sortie du capteur (amplificateur de tension), soit une transformation de la charge électrique en tension avant son amplification (convertisseur charge-tension improprement appelé préamplificateur de charge).
3. Intégrer le signal. Cette opération permet de transformer si nécessaire le signal délivré par un accéléromètre en un signal représentant la vitesse ou le déplacement du mouvement vibratoire (ou encore, pour un vélocimètre, en un signal représentant le déplacement).
4. Limiter la plage de fréquences du signal. C'est le rôle des filtres passe-haut, passe-bas, ou passe-bande, à fréquences de coupure fixes ou réglables par l'utilisateur. Cette opération permet de réduire l'influence des composantes hautes ou basses fréquences du signal jugées indésirables, de concentrer l'analyse du signal dans une plage de fréquences définies ou d'effectuer des mesures selon les spécifications d'une norme.
5. Amplifier de nouveau le signal obtenu. Cette amplification permet d'adapter la gamme dynamique d'entrée du convertisseur pour avoir la meilleure qualité de signal sans le tronquer.
6. Numériser le signal. C'est le rôle du convertisseur analogique/numérique (CAN) qui transforme le signal en données numériques avant de les transmettre : – à une unité de mesure de grandeurs scalaires (amplitudes crête, crête à crête et efficace, paramètres dits spécifiques au suivi des roulements...), – à un collecteur de données informatisées ou à un analyseur, – à une éventuelle unité de conservation du signal temporel pour un traitement différé des signaux (post-traitement). [9]

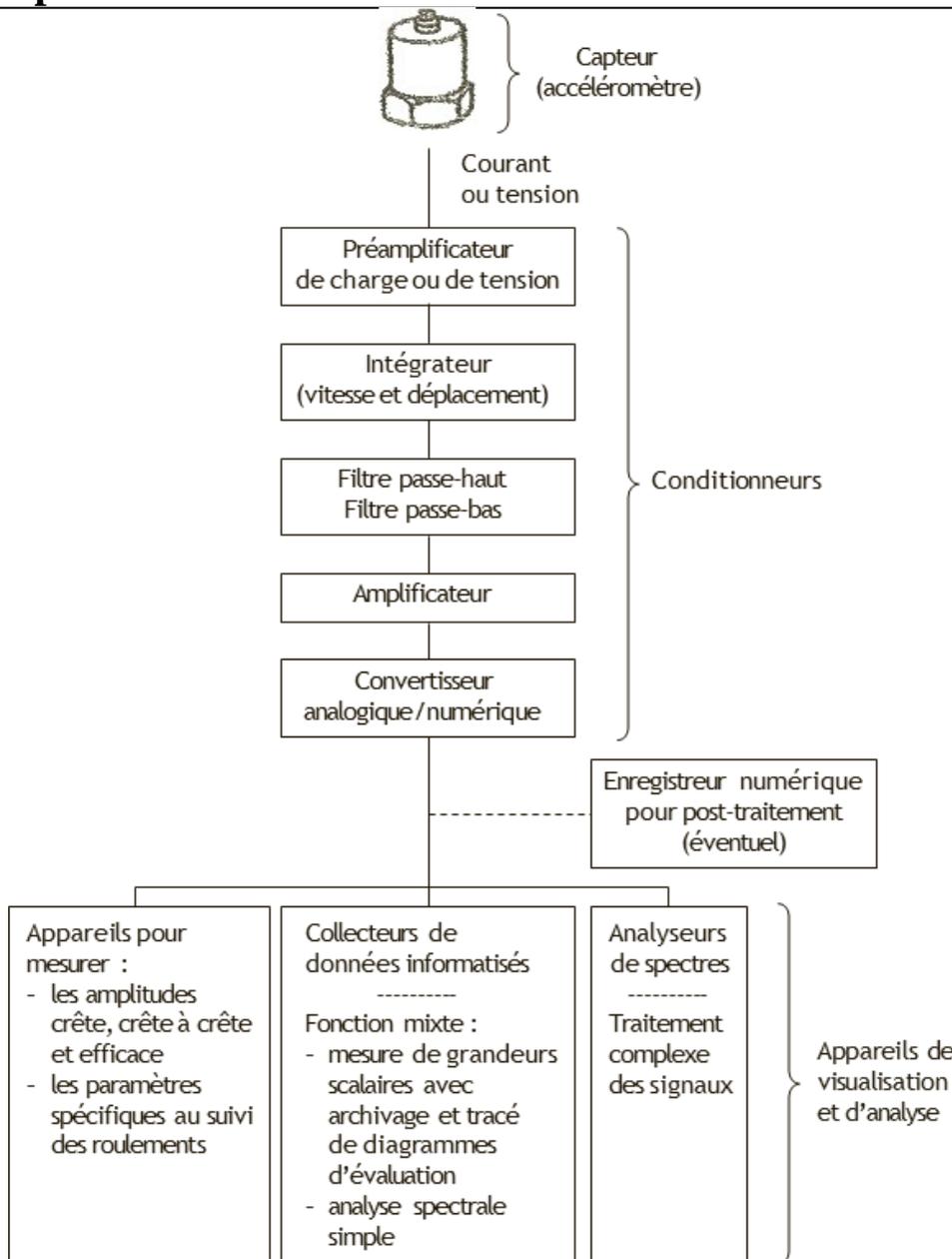


Figure IV.1. Chaîne de mesure munie d'un accéléromètre [9]

La figure IV.1. Donne un exemple de chaîne fonctionnelle type équipée d'un capteur d'accélération (accéléromètre).

IV.1.2. Capteurs de vibration :

Le capteur, quelle que soit la nature du signal qu'il délivre (accélération, vitesse, déplacement...) constitue le premier maillon de la chaîne de mesure. Sa fonction est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique. Un capteur se caractérise principalement par :

Sa bande passante. La bande passante est la plage de fréquences (par exemple [3-8 000 Hz]) à l'intérieur de laquelle la constitution du capteur permet une mesure de l'amplitude en rapport direct avec les forces génératrices du mouvement vibratoire à mesurer (Avec une précision de tolérance conventionnelle ou affichée par le constructeur (± 1 dB soit 12,2 %) par exemple). C'est en fait la plage dite de linéarité du capteur ou bande passante en dehors de laquelle la réponse du capteur n'est plus directement proportionnelle à l'amplitude du mouvement vibratoire qui la génère (voir plus loin l'exemple de bande passante sur un accéléromètre).

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

Sa sensibilité. C'est la relation qui lie la grandeur électrique délivrée par le capteur à l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple, 10 pico-coulombs par g ou 10 millivolts par μm). Ainsi, selon le type de capteur de vibrations utilisé, cette sensibilité s'exprimera en mV (millivolts) par unité physique ou en pC (pico-coulomb) par unité physique. Ce qui signifie que si le capteur est un proximètre de sensibilité de $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$, alors à une tension de 800 mV correspond un déplacement de $100 \mu\text{m}$. La sensibilité est une donnée fournie par le constructeur du capteur et doit faire l'objet d'une vérification périodique. La sensibilité d'un capteur se choisit en fonction de son utilisation et du niveau vibratoire à mesurer. Elle sera donc différente pour surveiller une ligne d'arbres à vitesse de rotation lente ou rapide, pour une machine-outil, un compresseur à vis ou un broyeur à marteaux.

Sa tenue en température. Elle est précisée par le constructeur. Au-delà d'un certain point qui est fonction du type de capteur et des matériaux le constituant, la température peut sensiblement modifier la sensibilité du capteur et même dans le cas d'un capteur piézoélectrique le détruire lorsqu'elle atteint le point de Curie du matériau sensible le constituant.

Ses grandeurs d'influence. Le capteur, selon ses conditions d'utilisation, peut être sensible non seulement à la grandeur physique pour laquelle il a été conçu mais aussi à d'autres grandeurs physiques, appelées « grandeurs d'influence », susceptibles d'avoir une action non négligeable sur la justesse des mesures. [9]

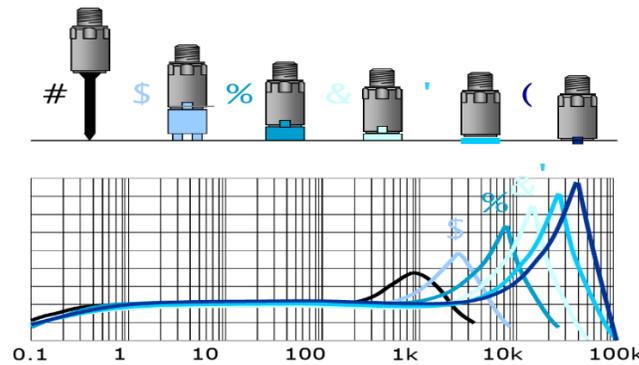
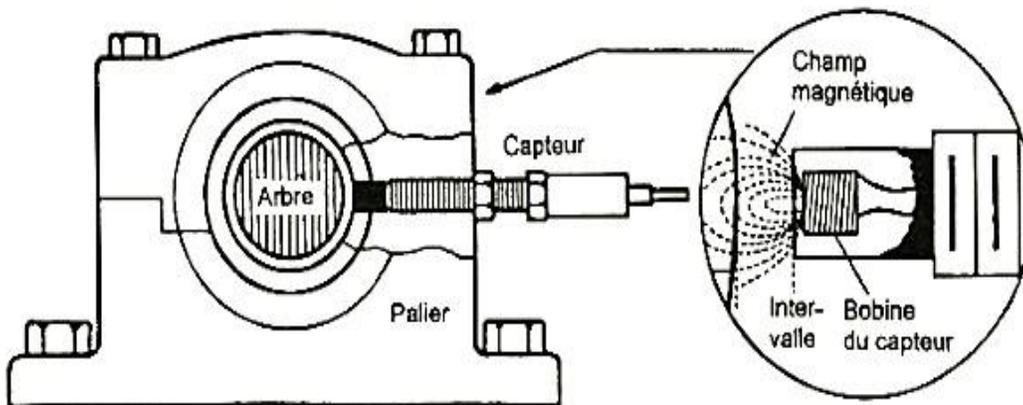


Figure IV.2. Capteurs de vibration

IV.1.2.1 Type de capteurs :

IV.1.2.1.1. Les proximètres:

le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur. Il est constitué d'une bobine parcourue par un courant électrique « hautes fréquences ». Le champ magnétique ainsi créé induit, à la surface de l'arbre, des courants appelés courants de Foucault qui modifient l'impédance de la bobine. [9]



La figure IV.3. Principe du capteur inductif à courants de Foucault. [9]

Ces variations d'impédance sont transformées en :

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

IV.1.2.1.1. Intérêts et limites d'utilisation des proximètres :

L'utilisation privilégiée de ces capteurs est la surveillance des machines à paliers à film d'huile, soit pour surveiller le déplacement axial de l'arbre, soit pour mesurer son mouvement radial relatif et déterminer la position de son axe de rotation par rapport au centre du palier.

IV.1.2.1.2. Les vélocimètres :

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté. Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine

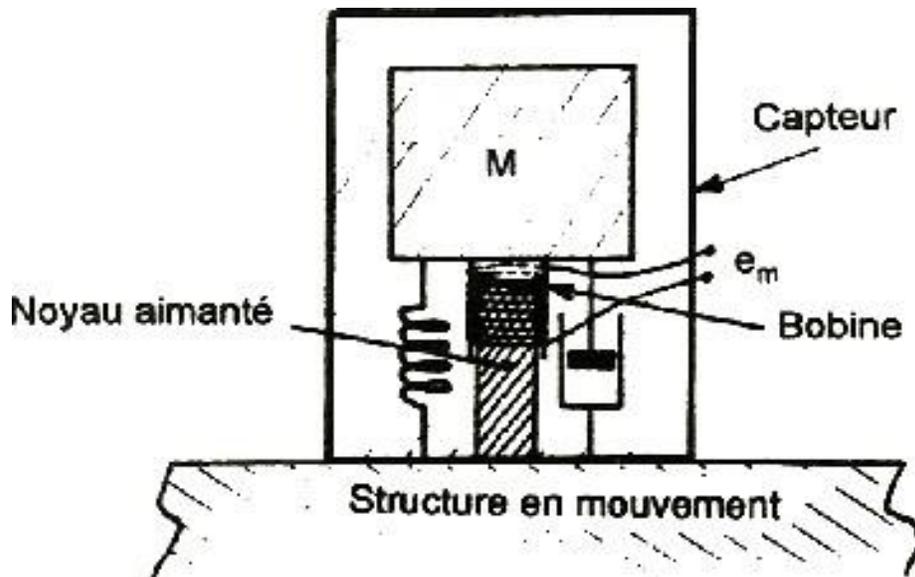
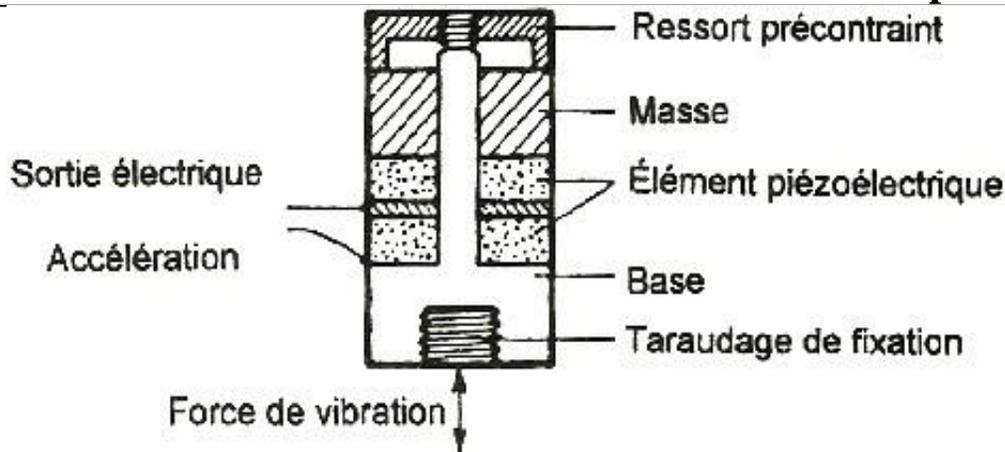


Figure IV.4. Principe d'un vélocimètre [9]

IV.1.2.1.3. Les accéléromètres :

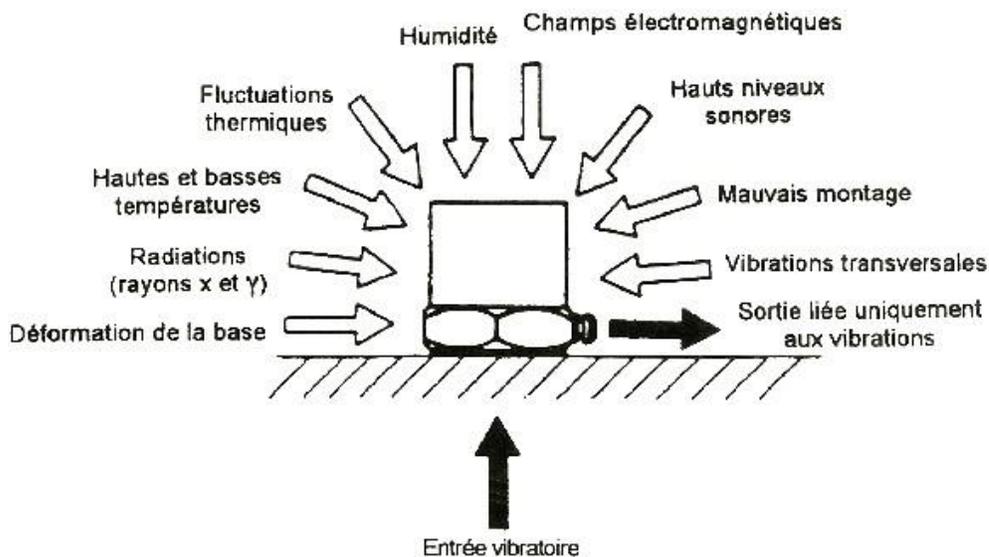
Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézoélectriques de générer une charge électrique proportionnelle à la contrainte de compression ou de cisaillement subie. Schématiquement un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. [9]



La figure IV.5. Principe de fonctionnement d'un accéléromètre [9]

L'accéléromètre présente de nombreux avantages :

- l'étendue de la bande passante,
- une gamme dynamique très étendue
- l'obtention de la vitesse vibratoire et du déplacement instantanés par intégration,
- une excellente précision pour un large « éventail » de conditions environnementales,
- une excellente fiabilité dans le temps puisqu'aucun élément n'est mobile,
- un faible encombrement et un grand rapport sensibilité/masse.



La figure IV.6. Grandeurs d'influence sur un accéléromètre [9]

Mais aussi quelques inconvénients :

- principalement la forte dépendance de sa bande passante avec la rigidité de sa liaison avec la surface vibrante,
- les difficultés inhérentes à l'analyse de comportements vibratoires très basses fréquences qui se manifestent par des déplacements importants, mais aussi par des accélérations extrêmement faibles. Cette particularité rend nécessaire l'utilisation d'accéléromètres de grande sensibilité (1 000 mV/g par exemple) dont la sortie risque, en absence d'un filtrage passe-haut correctement positionné, d'être saturée par les composantes vibratoires de fréquences plus élevées.

IV.2 Partie pratique :

IV.2.1 Introduction :

Cette partie présente le procédé d'une analyse vibratoire qu'on a fait après examiner le tableau des

interventions effectuées sur le broyeur cru au cours des quatre dernières années on a trouvé des problèmes qui se répètent souvent dans la chaîne du réducteur exactement dans le palier d'entrée du réducteur due à un désalignement entre les deux arbres moteur et entrée réducteur qui peut entraîner une détérioration dans l'état du réducteur.

Pour cela on a programmé deux mesures vibratoires sur des périodes séparées (10 jour) consiste à découvrir les défauts possibles et leur évolution dans le temps.

TABLEAU DES TRAVAUX EFFECTUENT SUR LA CHAINE DENTRAINMENT DE BROYEUR CRU :

<p><u>17/06/2018</u></p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un choc très marqué à la vitesse de rotation sur le palier entrée réducteur en position axial « N°03AX ». • Un désalignement entre l'arbre Moteur et l'arbre entrée réducteur. <p>Les actions à entreprendre :</p> <ul style="list-style-type: none"> • graissage l'accouplement entre le Moteur et le réducteur. • Contrôle l'état de coussinet sur le palier Moteur coté attaque« N°02 ». • L'alignement les deux arbres « Moteur/réducteur ». <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration des niveaux vibratoire en vitesse et en accélération sur le palier « 03AX » entrée réducteur en position axiale.
<p><u>28/04/2019</u></p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un balourd à la vitesse de rotation sur le palier entrée réducteur en position axial « N°03AX ». • Echauffement du palier entrée réducteur. • Un désalignement entre l'arbre Moteur et l'arbre entrée réducteur. <p>Les actions à entreprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Changement du coussinet Moteur coté attaque. • L'alignement les deux arbres « Moteur/réducteur ». <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration des niveaux vibratoire en vitesse et en accélération sur le palier « 03AX » entrée réducteur en position axiale • Amélioration De la température sur le palier « 03 » entrée réducteur en position « de 70C° jusqu'à 30C°
<p><u>29/03/2020</u></p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un choc très marqué à la vitesse de rotation sur le palier entrée réducteur en position axial « N°03AX ». <p>Les actions à entreprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Graissage l'accouplement « a denture » entre le Moteur et le Réducteur. <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'amélioration du spectre synonyme du choc vibratoires en vitesse sur le palier entrée réducteur en position axiale« N°03AX ».
<p><u>03/06/2022</u></p>	<p>Résultats d'analyse :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Un balourd à la vitesse de rotation sur le palier entrée réducteur en position axial « N°03AX ». • Echauffement du palier Moteur coté attaque. • Un désalignement entre l'arbre Moteur et l'arbre entrée réducteur. <p>Les actions à entreprendre</p> <ul style="list-style-type: none"> • Changement du coussinet Moteur coté attaque et refaire L'alignement les deux arbres « Moteur/réducteur ». <p>Résultats après intervention :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amélioration des niveaux vibratoire en vitesse et en accélération sur le palier « 03AX » entrée réducteur en position axiale • Amélioration du température sur le palier « 03 » entrée réducteur en position « de 78C° jusqu'à 35C°.

IV.2.1 Les points de mesure :

Le placement de l'accéléromètre sur les machines est très important dans la mesure ou un phénomène mécanique peut donner des images sensiblement différentes en fonction du point de mesure. Pour cela, il est nécessaire de coller sur les machines des « pastilles filetées » aux emplacements définis. Pour avoir une image complète des vibrations, il faut prendre les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque ligne d'arbre de la machine surveillée : Deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale.

Sur le moteur : 1RH.1RV ,2RH.2RV.2AX.

Sur le réducteur MAAG : 1^{ère} stage 3RH.3RV.3AX & 4RH.4RV.

2^{ème} stage 5RH.5RV, 6RH.6RV& 7RH.7RV. 7AX

- ❖ Le broyeur appartient au « **ISO 10816** », installée sur une fondation rigide avec une puissance deKw
- ❖ Selon la notice de constructeur (MAAG) (voir l'annexe)

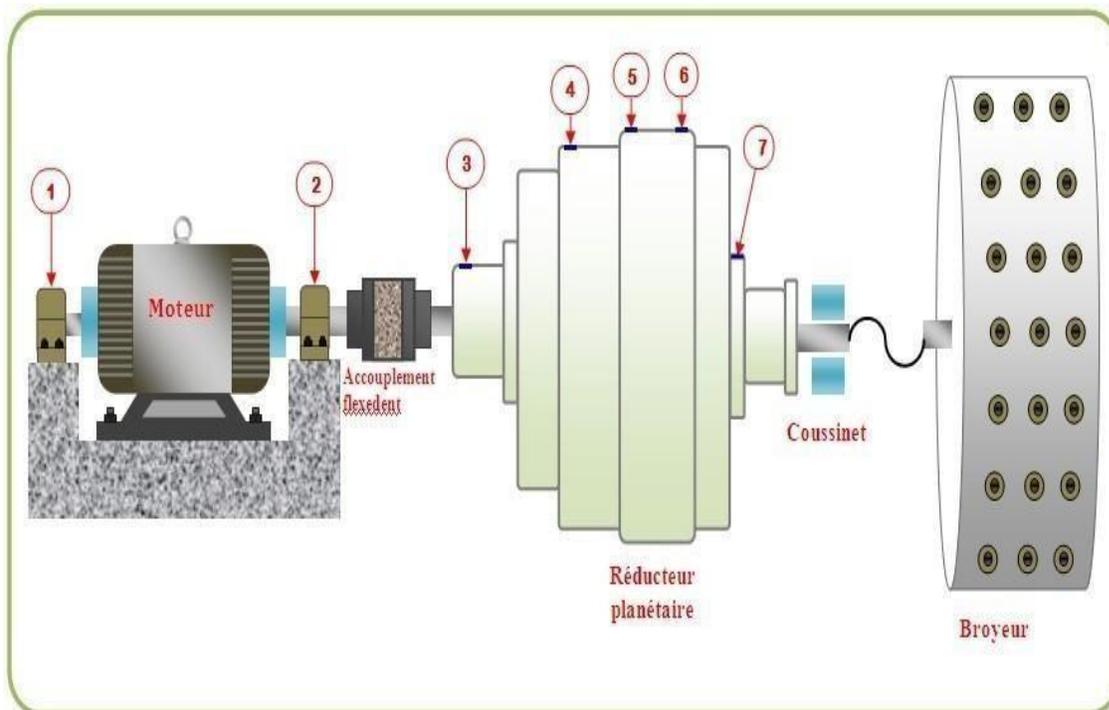


Figure IV.7 Point des mesures sur les paliers.

Figure IV.8 Dans la direction Horizontale



Figure IV.9 Dans la direction axiale



Figure IV.10 Dans la direction VERTICALE



IV.2.2 Matériels utilisés :

IV.2.2.1 Capteur de vibration utilisé : Accéléromètre

Accéléromètre compact certifié pour les zones dangereuses

Accéléromètre compact conforme à la norme API 670, sortie par le haut, connecteur MIL-C-5015, boîtier isolé, 100 mV/g, certifié pour une utilisation dans les zones dangereuses de Classe I, Division 2/Zone 2.



Figure. IV.11 Accéléromètre utilisé.

Caractéristiques :

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

IV.2.2.2 VB8 :

IV.2.2.2.1 Description

Le collecteur de données, analyseur et équilibreur portable vb8 est un collecteur de données de vibrations à quatre canaux, analyseur et équilibreur. Vous pouvez utiliser cet appareil pour la collecte de données en route et hors route, l'analyse côté machine et l'équilibrage. la collecte de données sur et hors route, l'analyse et le diagnostic côté machine ainsi que la correction de l'équilibre dynamique sur site.

Le collecteur de données, analyseur et équilibreur portable vb8 dispose d'une grande capacité de stockage et d'une longue autonomie. Une grande capacité de stockage et une longue durée de vie de la batterie. Garantie de cinq ans.

Le vb8 est l'un des équipements de surveillance matériels de Bentley Nevada qui fonctionnent avec le logiciel System 1.



Figure. IV.12 collecteur de donne (VB8)



Figure. IV.13 emplacement de capteur

IV.2.2.2.2 Le vb8 offre les fonctionnalités suivantes :

- Enregistrements simultanés sur quatre canaux.
- Équilibrage à deux plans avec jusqu'à 4 capteurs.
- Prise en charge de l'accélération, de la vitesse, du déplacement, du couplage CC, du courant et capteurs de sortie de tension.
- Résolution FFT de 12 800 lignes.
- Prend en charge 80 kHz Fmax.
- Enregistrements de spectre et de forme d'onde.
- Démodulation pour une détection précoce des problèmes de machines tournantes
Système d'enregistrement unique 6Pack.
- Capacités d'analyse complètes telles que calcul de moyenne, décélération et démarrage, test fonctionnel, phase entre canaux, tracé d'orbite et forme d'onde longue durée.
- Test d'impact modal et spectre cross-canal (ODS).
- Possibilité d'exporter des données au format Universal File Format (UFF) pour une analyse supplémentaire dans un logiciel ODS tel que Vibrant TechnologyME'scope.
- Fonction d'autotest du câble du capteur.
- Port hôte USB pour le transfert de données vers un port USB externe conduire.

IV.2.3 Logiciel d'analyse : Système 1 :

Le logiciel est une plate-forme brevetée et modulaire de gestion des machines pour optimisation des processus et des équipements, surveillance de l'état et diagnostic des événements.

La plate-forme System 1 permet aux opérateurs, ingénieurs d'équipement, ingénieurs de processus, techniciens d'instruments et autres membres du personnel de l'usine pour identifier, évaluer et répondre aux événements importants pour optimiser l'impact commercial. Cela augmente la disponibilité et la fiabilité des équipements et réduit les coûts de maintenance.

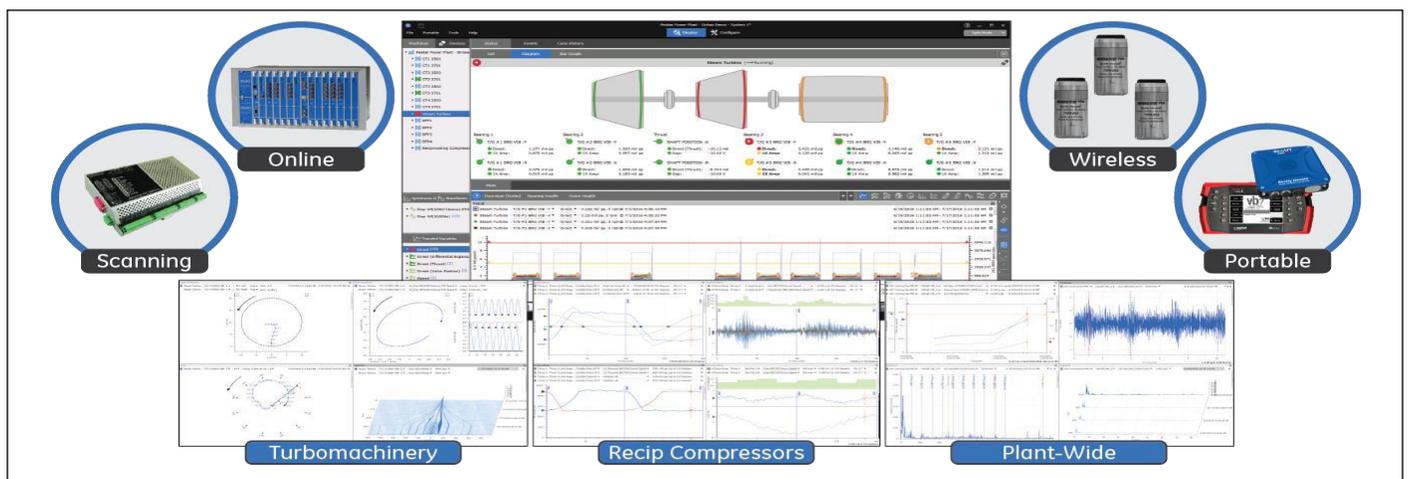


Figure. IV.14 Logiciel d'analyse Système 1

IV.2.3.1 Paramétrage sur logiciel :

- Creation de data base
- Ajoute les propriétés de la machine (réducteur MAAG)
 - Vitesse du fonctionnement (742/14.7)t/mn
 - Puissance 4000 KW
 - Fondation (rigide)
 - Fréquence d’engrenage 715 Hz
- Programmées la gamme des fréquences :
 - Basses fréquences < 200 Hz
 - 200 Hz < Moyennes fréquences < 2000 Hz
 - 2000 Hz < Hautes fréquences
 - Spectre temporelle
 - Spectre démodulation
- Calcule fréquence d’engrenage :

IV.2.3.2 Caractéristiques techniques :

REDUCTEUR (MAAG)	1er train (GV)	2ème train (PV)
Vitesse d’entrée N_1	742 tr/min	14,7 tr/min
Dents du pignon t_1	22	24
Dents d’un satellite t_2	66	51
Dents de la couronne t_3	155	126

IV.2.3.3 Calcule des fréquences sur le réducteur MAAG:

A. Premier train :

- 1- Pignon : Nombre de dent : $t_1 = 22$ dents //Vitesse : $N_1 = 742$ tr/min.
- 2- Satellite : $t_2 = 66$ dents
- 3- Couronne : $t_3 = 155$ dents
- 4- Porte satellite

- **Vitesse de rotation de porte satellite :**

$$N_4 = N_1 \frac{t_1}{t_1+t_2} = 742 \frac{22}{22+155} = 92.22 \text{ tr/min} = 1,537 \text{ HZ}$$

- Vitesse de rotation d'un planétaire :

$$N_2 = N_4 \frac{t_3}{t_2} = 92,22 \frac{155}{66} = 216,57 \text{ tr/min} = 3,611 \text{ HZ}$$

➤ Fréquences d'engrènement :

✚ Planétaire couronne :

$$f_1 = N_4 * t_3 = 1,537 * 155 = 238,39 \text{ Hz}$$

✚ Autres défauts possibles :

1- Sur le pignon :

$$f_2 = 3 \frac{t_3}{t_1} N_4 = 3 \frac{155}{22} 1,538 = 32,50 \text{ HZ}$$

2- Sur un planétaire :

$$f_3 = 2 \frac{t_3}{t_2} N_4 = 2 \frac{155}{66} 1,538 = 7,22 \text{ HZ}$$

3- Sur la couronne :

$$f_4 = \frac{N_4}{60} = 1,537 \text{ HZ}$$

B. Deuxième train :

- 1- Pignon : Nombre de dent : $t_1 = 24$ dents // Vitesse : $N_1 = 14,7$ tr/min
 2- Satellite : $t_2 = 51$ dents
 3- Couronne : $t_3 = 126$ dents
 4- Porte satellite

- Vitesse de rotation de porte satellite :

$$N_4 = N_1 \frac{t_1}{t_1 + t_3} = 14,7 \frac{24}{24 + 126} = 2,352 \text{ tr/min} = 0,0392 \text{ HZ}$$

- Vitesse de rotation d'un planétaire :

$$N_2 = N_4 \frac{t_3}{t_2} = 2,352 \frac{126}{51} = 5,81 \text{ tr/min} = 0,0968 \text{ HZ}$$

➤ Fréquences d'engrènement :

✚ Planétaire couronne :

$$f_1 = N_4 * t_3 = 0,0392 * 126 = 4,939 \text{ HZ}$$

✚ Autres défauts possibles :

1- Sur le pignon :

$$f_1 = N_4 * t_3 = 0,0392 * 126 = 4,939 \text{ HZ}$$

2- Sur un planétaire :

$$f_3 = 2 \frac{t_3}{t_2} N_4 = 2 \frac{126}{51} 0,0392 = 0,1936 \text{ HZ}$$

3- Sur la couronne:

$$f_4 = N_4 = 0,0392 \text{ HZ}$$

reducteur (MAAG)	Premier train (GV)	Deuxième train (PV)
Vitesse d'entrée N_1	742 tr/min	14,7 tr/min
Vitesse rotation satellite N_2	216.57 tr/min	5,81 tr/min
Vitesse de sortie N_4	92.22 tr/min	2,352 tr/min
Fréquence d'engrènement sur la couronne f_1	238,39 HZ	4,939 HZ
Fréquence d'engrènement sur le pignon f_2	32,5 HZ	0,6174 HZ
Fréquence d'engrènement sur la satellite F_3	7,223 HZ	0,1936 HZ

Mesure-le : 02/06/2022

Analyse de niveaux globale :

Les résultats obtenus par notre mesure effectuée sont données dans les tableaux suivants

Sev.	Point	Date	Mes (mm/s) RMS	Diagnostic	Mes (g) RMS	Diagnostic
AC MOTEUR	P1-H	02 juin 2022	2,018 mm/s	BON	0,319g	BON
	P1-V	02 juin 2022	1,767 mm/s	BON	0,228g	BON
	P2-H	02 juin 2022	1,852 mm/s	BON	0,363 g	BON
	P2-V	02 juin 2022	1,299 mm/s	BON	0,287 g	BON
	P2-A	02 juin 2022	2,113 mm/s	BON	0,345 g	BON
Réducteur MAAG	P3-H	02 juin 2022	4,199 mm/s	ALARME	0,881g	BON
	P3-V	02 juin 2022	4,585 mm/s	ALARME	0,835 g	BON
	P3-A	02 juin 2022	6,722 mm/s	DANDER	1,035 g	BON
	P4-H	02 juin 2022	3,204 mm/s	BON	0,787g	BON
	P4-V	02 juin 2022	3,095 mm/s	BON	1,05 g	BON
	P5-H	02 juin 2022	3,311 mm/s	BON	0,596 g	BON
	P5-V	02 juin 2022	1,795 mm/s	BON	0,437	
	P5-A	02 juin 2022	4,044 mm/s	ALARME	0,602 g	BON
	P6-H	02 juin 2022	6,100mm/s	ALARME	1,111 g	BON
	P6-V	02 juin 2022	2,507 mm/s	BON	0,333	
	P6-A	02 juin 2022	2,527 mm/s	BON	0,557 g	BON
	P7-H	02 juin 2022	2,297 mm/s	BON	0,413g	BON
	P7-V	02 juin 2022	1,950 mm/s	BON	0,504	
P7-	02 juin 2022	13,04mm/s	DANDER	2,365 g	BON	

TableauIV.1 : des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération

 **Résultats D'analyse :**

D'après les résultats mentionnés sur le tableau (IV.1) et en comparaison avec la norme ISO 10816-3 et la notice de constructeur de réducteur MAAG et par FLS.

Nous constatons ce qui ce suit :

Analyse vibratoire des mesures enregistrées sur tous les paliers de la cinématique du broyeur CRU, nous a permet de constater que les niveaux en vitesse (mm/s) et accélération (g) sur le moteur il est admissibles, mai sur le réducteur MAAG sont inadmissible,à l'exception toujours sue les deux paliers (palier de grande vitesse GV (PALIER N°3) et le petit vitesse PV (PALIER N°7) qui est au seuil de danger, suivant les normes vibratoire des machines tournantes.et selon la notice de constructeur (réducteur MAAG).

Analyse de spectrale :

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

SUR LE PLAIRE N°3

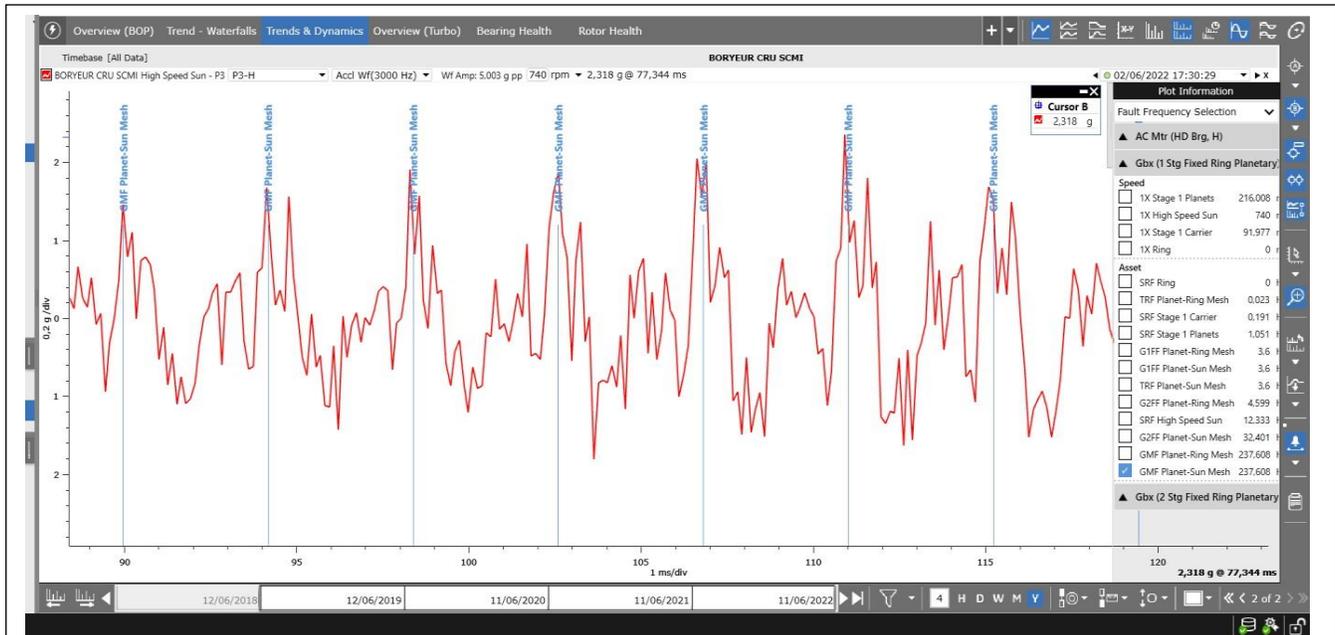


Figure IV.15 Signal temporele (basse fréquence (0-200) Hz) prise sur le palier N°3 en trois directions (H, V, A).

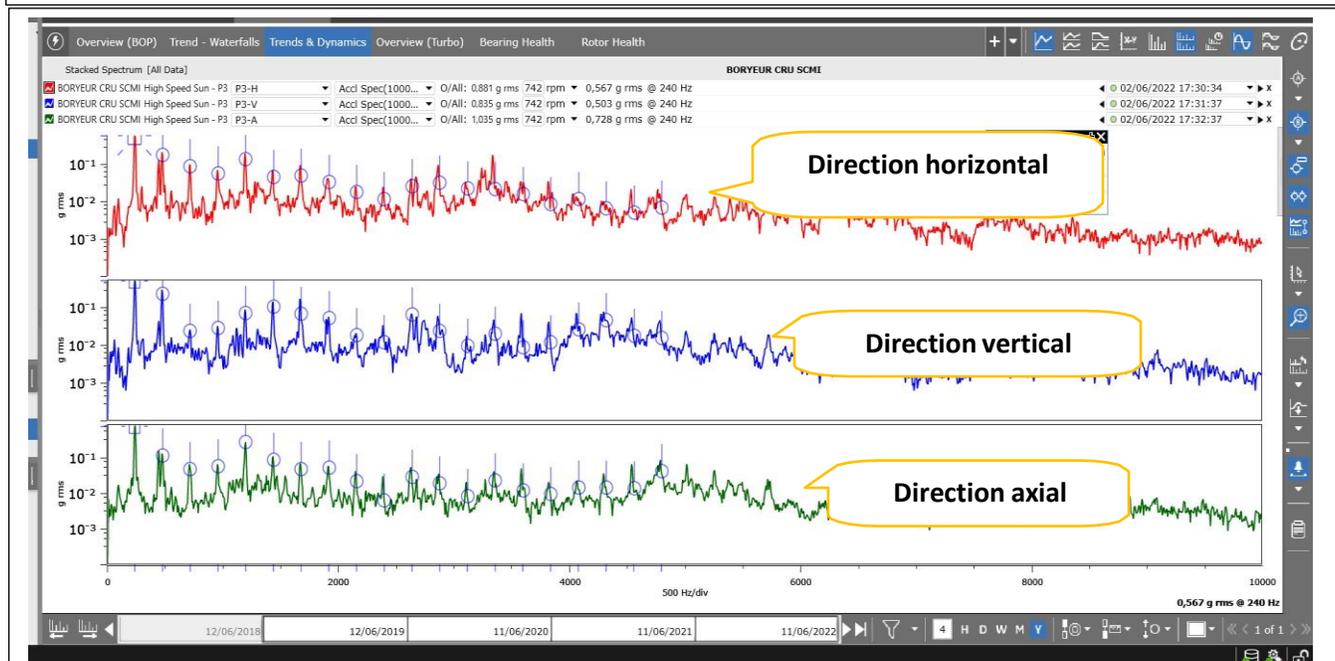


Figure IV.16 Spectre logarithmique (haute fréquence (2-10000) Hz) prise sur le palier N°3 en trois direction démontre un défaut d'engrenage sur lui.

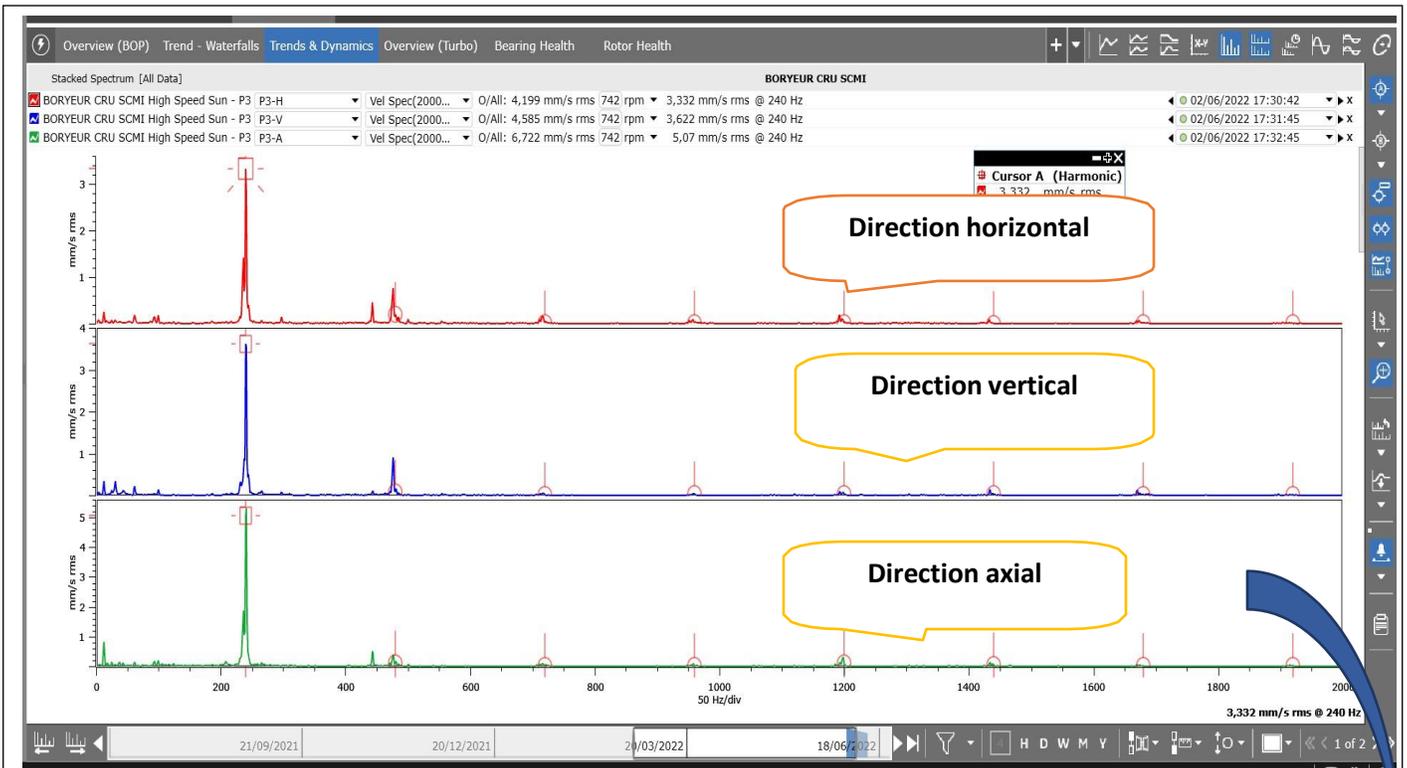


Figure IV.17 Spectre linéaire ((moyen fréquence (2-2000) Hz) prise sur le palier N°3 de réducteur MAAG en trois directions (H, V, A).

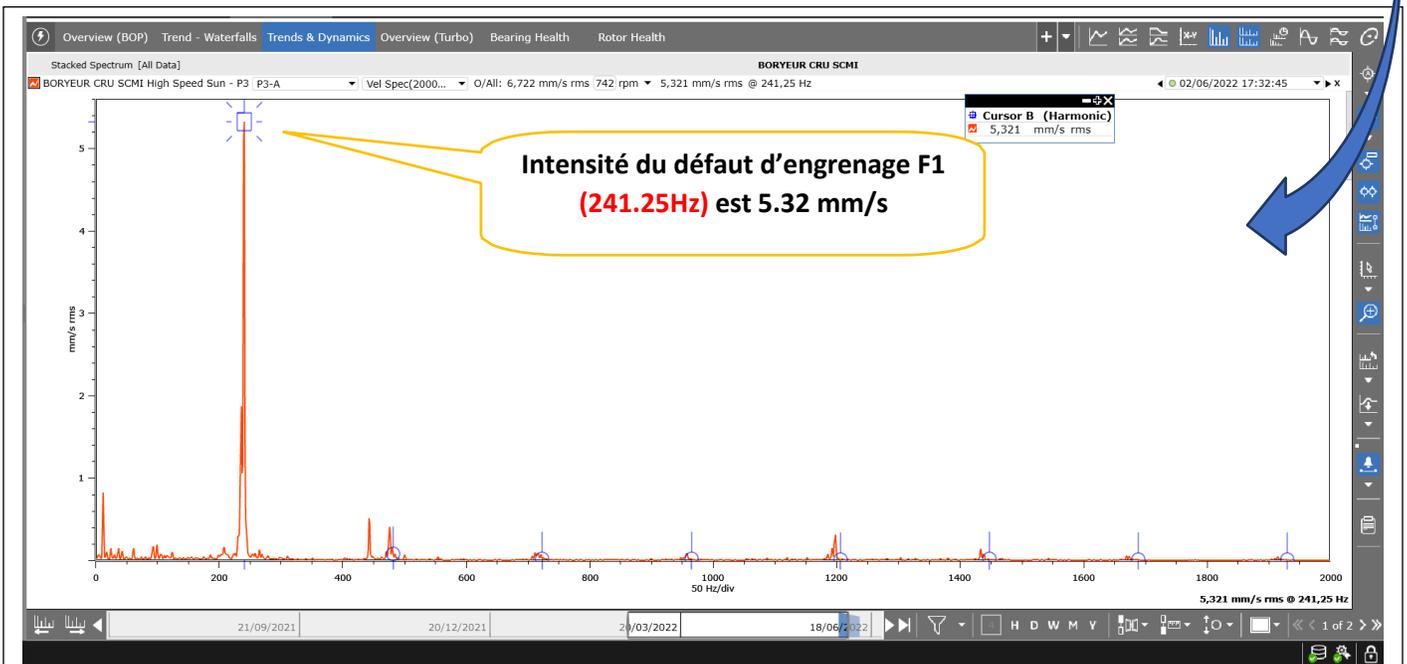


Figure IV.18 Spectre linéaire prise sur le palier N°03 dans la direction axiale, met en évidence le défaut d'engrènement à la fréquence d'engrenage **F1 (241,25 Hz)**.

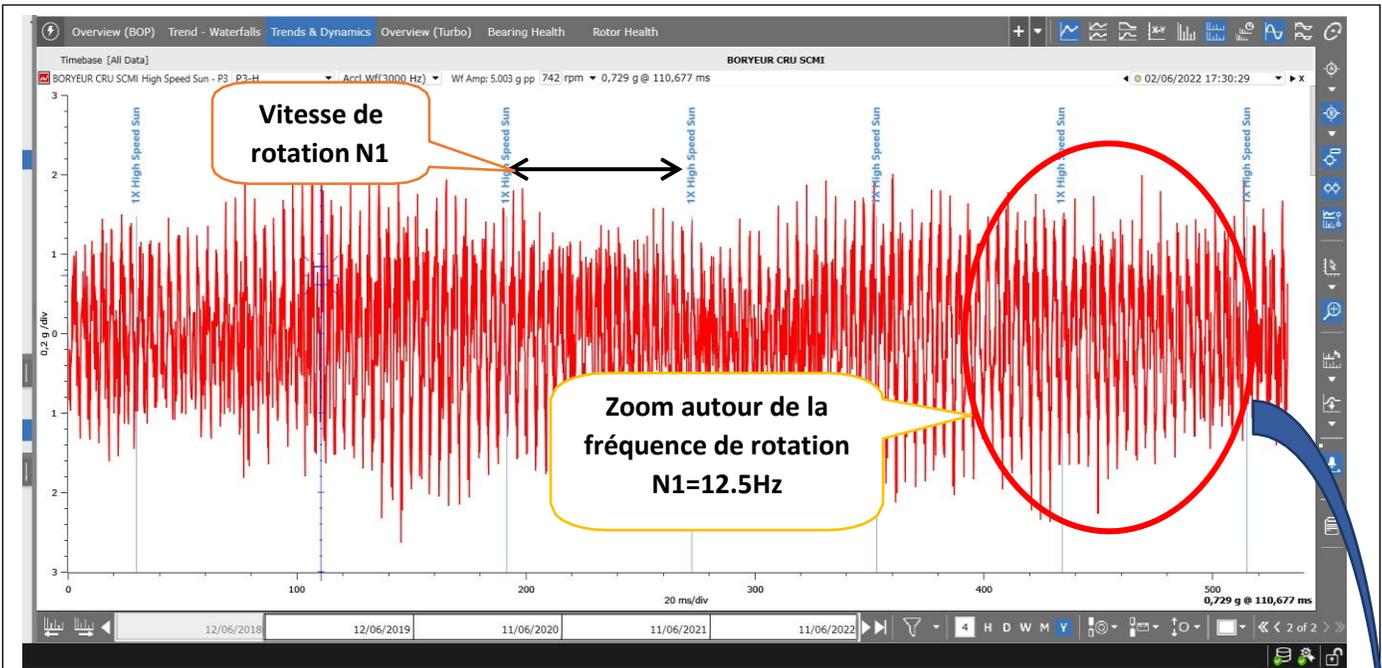


Figure IV.19 Signal temporelle prise sur le palier N°3 dans la direction Horizontale, illustre le choc non périodique.

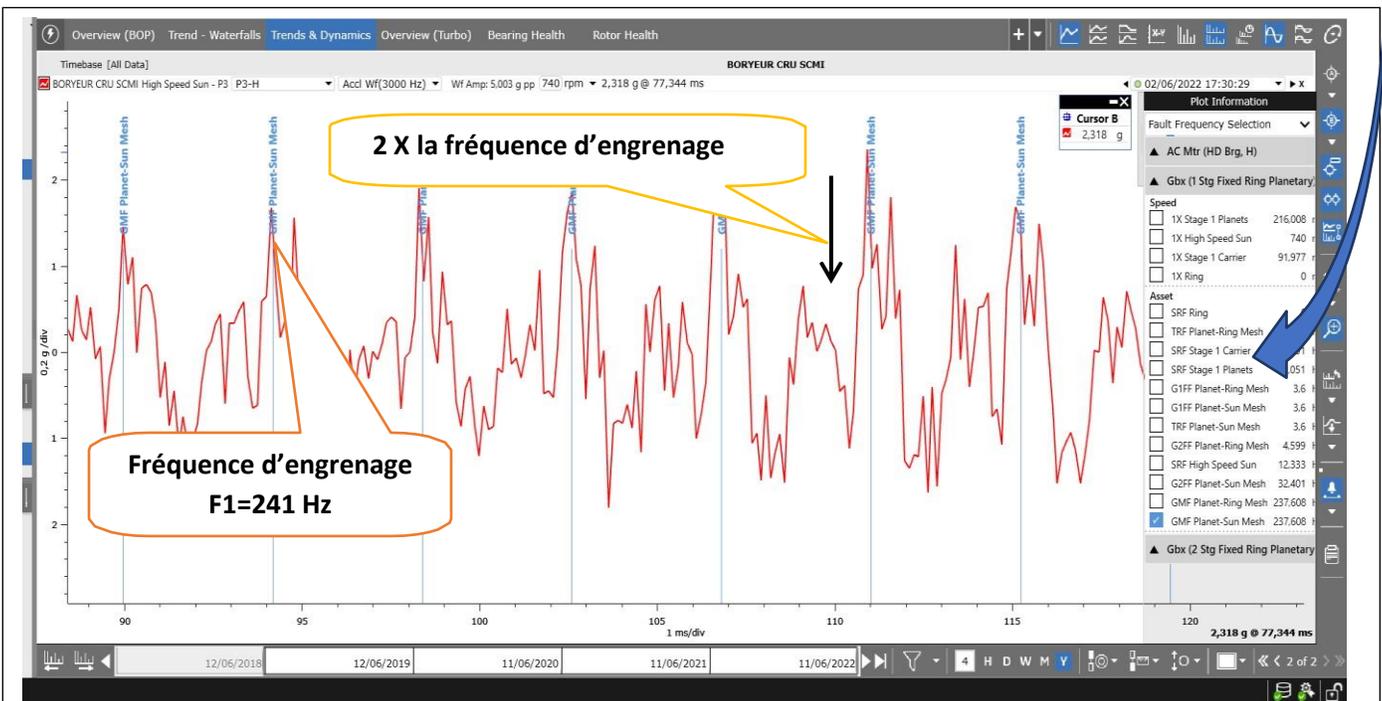
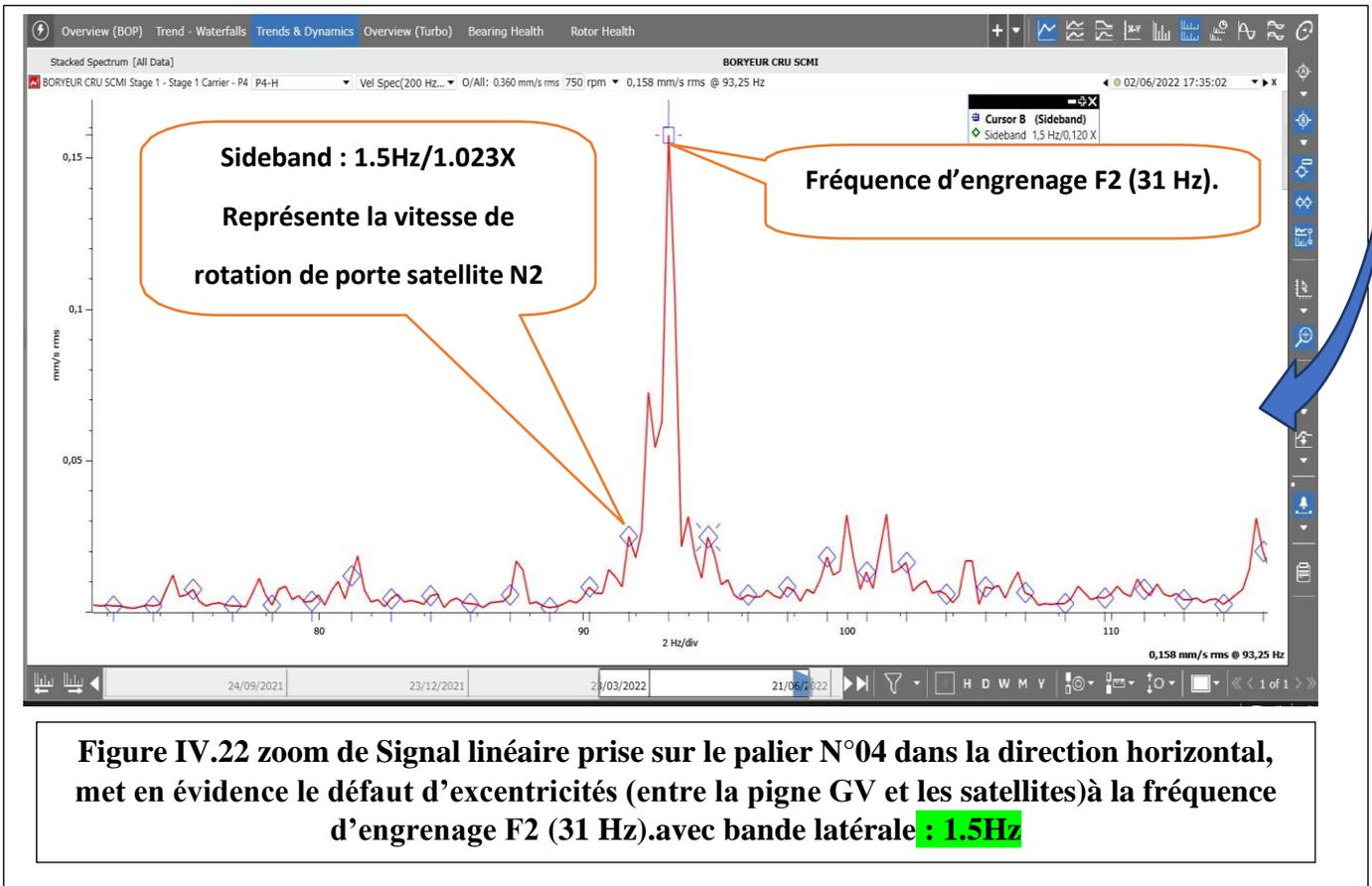
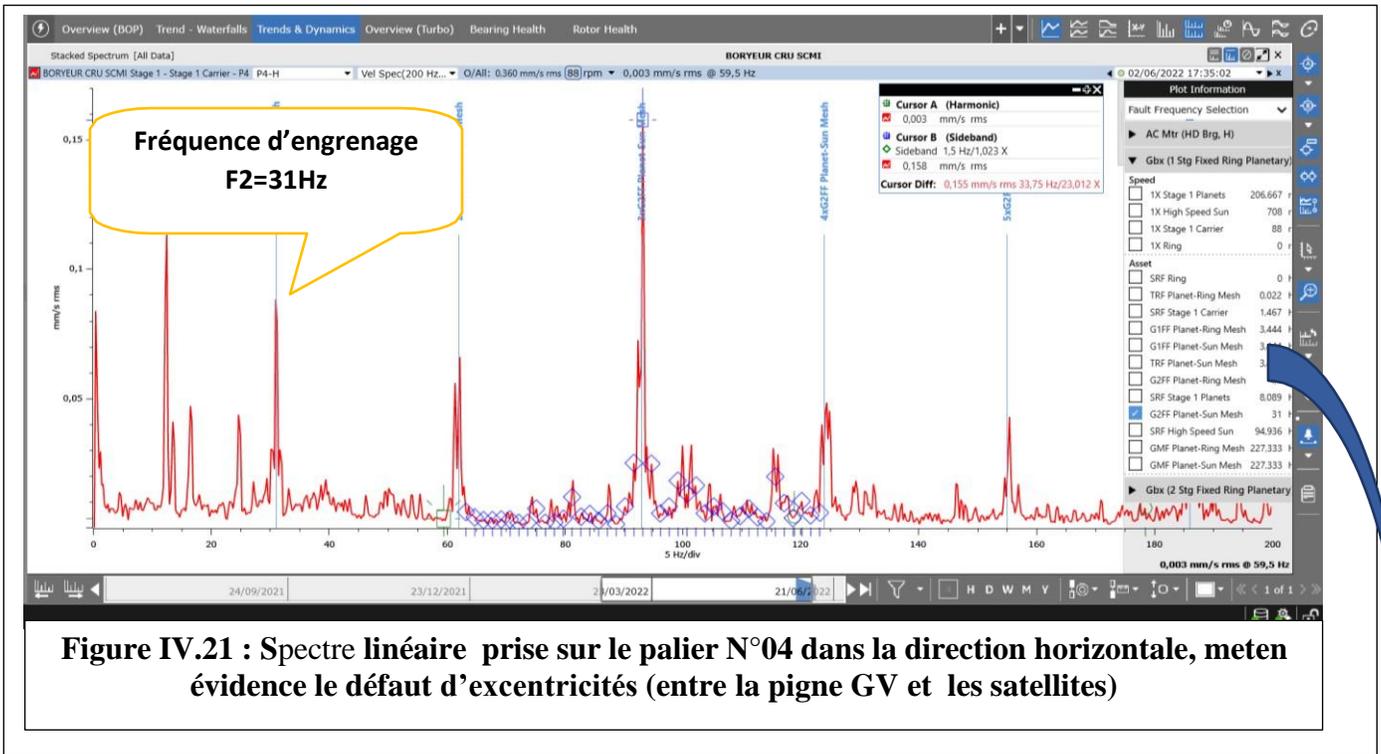


Figure IV.20 Zoom temporelle prise sur le palier N°3, démontre le défaut dedésalignent (entre l'engrenage le satellite et l'engrenage couronne).



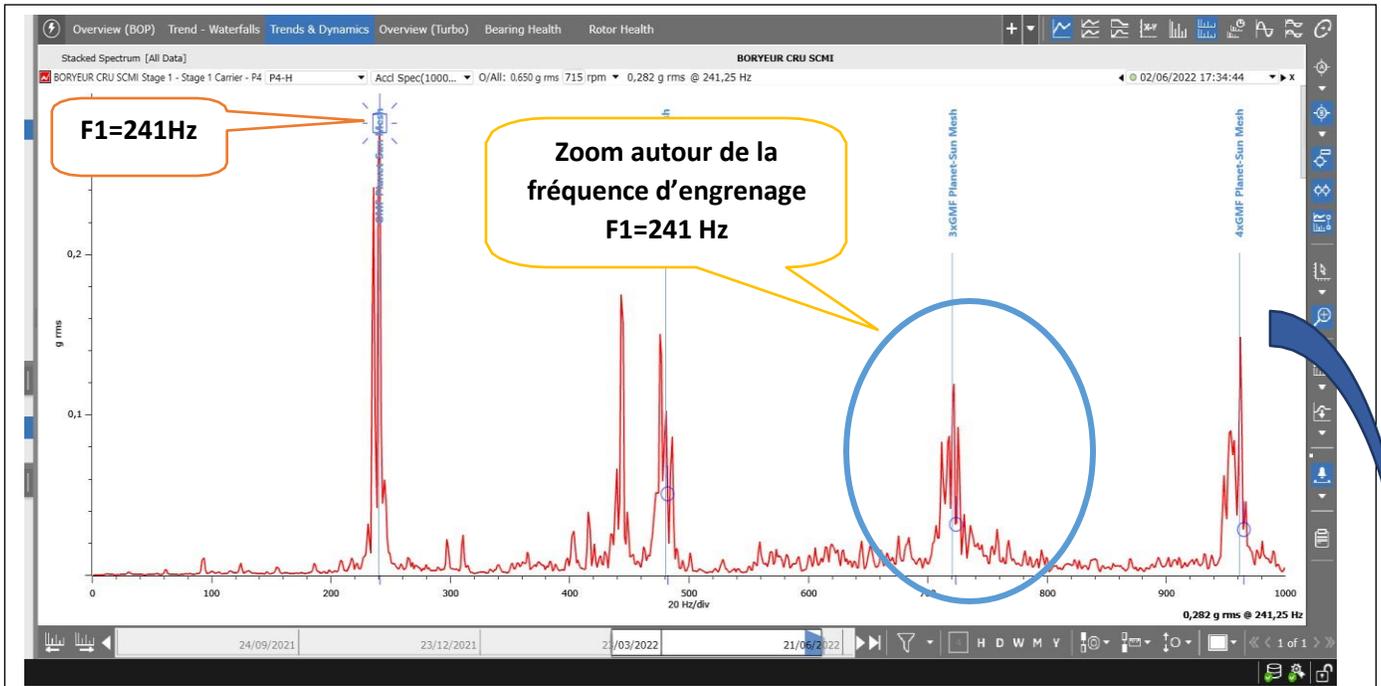


Figure IV.23 Spectre linéaire prise sur le palier N°04 dans la direction horizontale, met en évidence le défaut d'engrènement à la fréquence d'engrenage **F1 (241Hz)**.

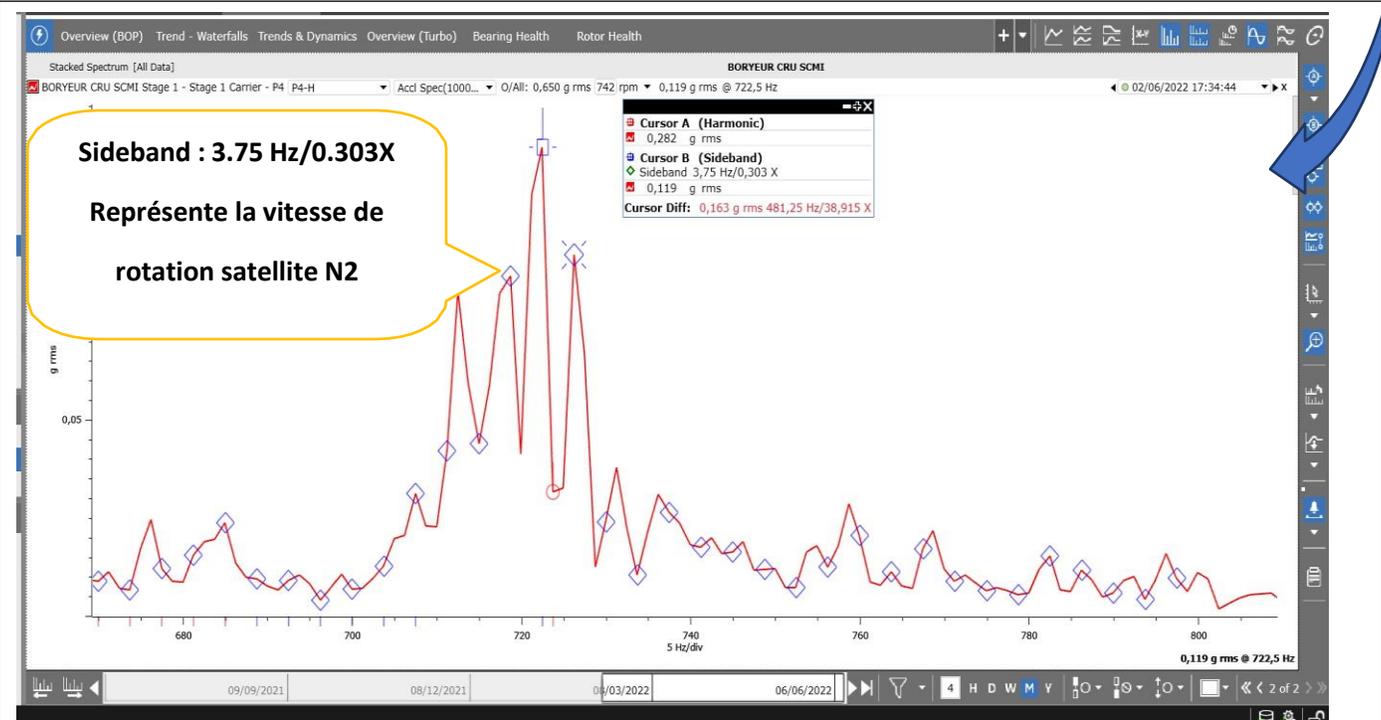


Figure IV.24 zoom de Signal linéaire prise sur le palier N°04 dans la direction horizontale, met en évidence le défaut d'engrènement à la fréquence d'engrenage F1 (241 Hz).avec bande latérale est : **3.75Hz**

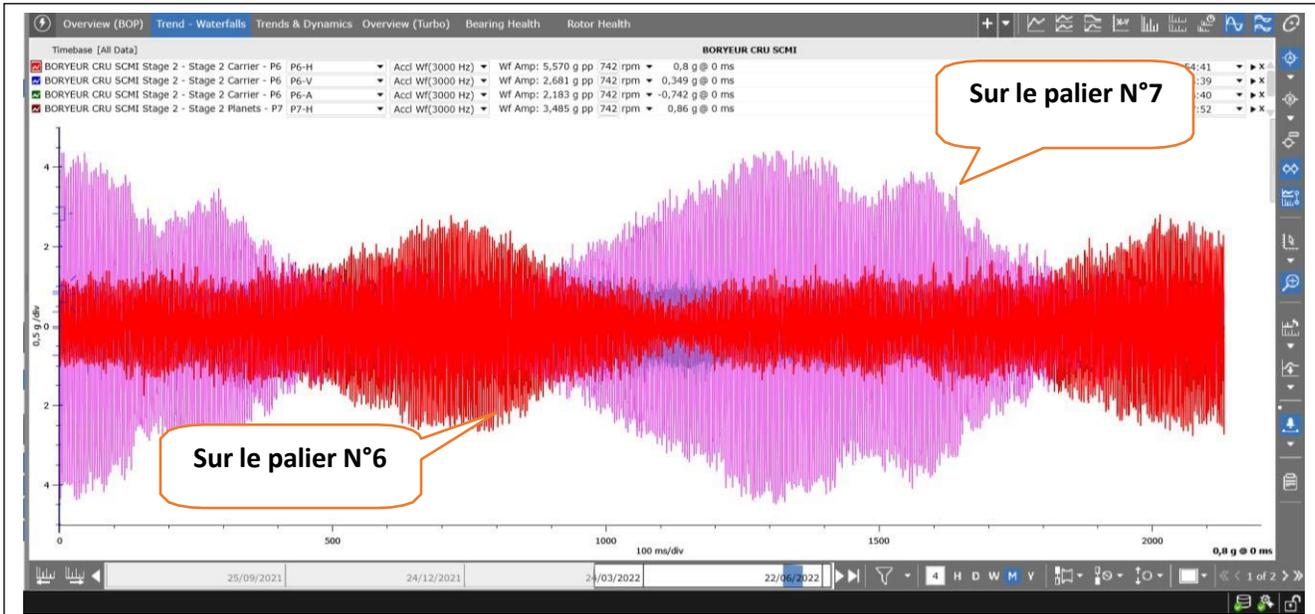


Figure IV.25 Signal temporelle prise sur le palier N°7 et palier N°6 dans la direction axiale, illustre le choc non périodique sur les deux palies.

Résultats d'analyse :

Le diagnostic vibratoire des spectres enregistrées sur l'ensemble des paliers de la commande broyeur cru, nous a permis de constater des niveaux vibratoires en vitesse «**mm/s**» et en accélération «**g**» inadmissible sur le réducteur planétaire ou il est au seuil de danger et sur le moteur est tolérable.

- Le diagnostic vibratoire par l'analyse spectrale de ces mesures révèle la présence des Anomalies suivantes :
- Un défaut d'engrènement très important sur la GV du réducteur à la fréquence (**F1=241**) Hz » Avec une bande latérale (**N2=3.75Hz**) autour de la fréquence d'engrenage, ce défaut domine toute la cinématique de la commande. (ce défaut représente sur la **figure IV.17** et le détail sur la **figure IV.18**).

ce défaut est causé principalement par le désalignement (excentricité) entre l'arbre portant les satellites et pigne d'attaque.

- Un défaut d'engrènement très important sur la GV du réducteur à la fréquence (**F2=31Hz**) » Avec une bande latérale (**N4=1.5Hz**) autour de la fréquence d'engrenage .(ce défaut représente sur la **figure IV.15** et le détail sur la **figure IV.16**) , il s'agit d'un entraxe insuffisant (entraxe d'arbres portant les deux roues est insuffisant) qui s'est traduit par la présence de la 2F2 et 3F2 ,(le pic à 3F2 augmentera en amplitude avec l'augmentation de l'usure des dents) ou elle est prépondérante, ce défaut crée un effort à l'engagement et au déengagement des dents ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture. ce dernier est généré par les défauts suivants :
 - 1- Défaut sur les coussinets portant les arbres des satellites.
 - 2- Défaut sur l'arbre (usure de la surface portant les satellites).
 - 3- Un choc sur le pignon d'attaque et les satellites à la fréquence des satellites d'où le jeu de paliers avec des niveaux en accélération excessif.

Les actions à entreprendre

Nous vous recommandons dans le meilleur délai de procéder aux actions suivantes :

- ✚ Inspection du réducteur, surtout la GV pour préparer la pièce de rechange.
- ✚ Inspection du réducteur, surtout la PV pour préparer la pièce de rechange.
- ✚ Contrôle de l'accouplement reliant le moteur au réducteur MAAG et l'alignement du moteur.

- ✚ Contrôle et inspecté l'accouplement reliant le réducteur MAAG au BROYEUR et refaire l'alignement entre le réducteur MAAG et broyeur CRU.

Mesure-le : 12/06/2022 : On a réalisé cette mesure pour contrôle la stabilité le comportement vibratoire et les niveaux vibratoires en vitesses et en accélération.

Analyse de niveaux globale :

Les résultats obtenus par notre mesure effectuée sont donnés dans les tableaux suivants

Sev.	Point	Date	Mes-1 (mm/s) RMS	Mes (mm/s) RMS	Diagnostic	Mes-1 (g) RMS	Mes (g) RMS	Diagnostic
AC MOTEUR	P1-H	12 juin 2022	2,018	2,131	BON	0,319	0,316	BON
	P1-V	12 juin 2022	1,767	1,680	BON	0,228	0,248	BON
	P2-H	12 juin 2022	1,852	1,711	BON	0,363	0,387	BON
	P2-V	12 juin 2022	1,299	2,048	BON	0,287	0,342	BON
	P2-A	12 juin 2022	2,113	2,445	BON	0,345	0,365	BON
Réducteur MAAG	P3-H	12 juin 2022	4,199	3,480	ALARME	0,881	0,861	ALARME
	P3-V	12 juin 2022	4,585	4,534	ALARME	0,835	0,925	ALARME
	P3-A	12 juin 2022	6,722	9,047	DANGER	1,035	1,435	DANGER
	P4-H	12 juin 2022	3,204	3,649	BON	0,787	0,922	ALARME
	P4-V	12 juin 2022	3,095	3,036	BON	1,05	0,869	ALARME
	P5-H	12 juin 2022	3,311	3,458	BON	0,596	0,675	BON
	P5-V	12 juin 2022	1,795	1,709	BON	0,437	0,399	BON
	P5-A	12 juin 2022	4,044	3,960	BON	0,602	0,674	BON
	P6-H	12 juin 2022	6,100	5,664	ALARME	1,111	1,510	DANGER
	P6-V	12 juin 2022	2,507	2,483	BON	0,333	0,357	BON
	P6-A	12 juin 2022	2,527	2,377	BON	0,557	0,348	BON
	P7-H	12 juin 2022	2,297	2,303	BON	0,413	0,413	BON
	P7-V	12 juin 2022	1,950	2,133	BON	0,504	0,504	BON
P7-A	12 juin 2022	11,04	10,95	DANGER	2,365	2,365	DANGER	

TableauIV.2 : des niveaux vibratoires de la machine en vitesse et en accélération

✚ Mes-1 : le 02/06/2022

✚ Mes-2 : le 12/06/2022

✚ Analyse spectrale :

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

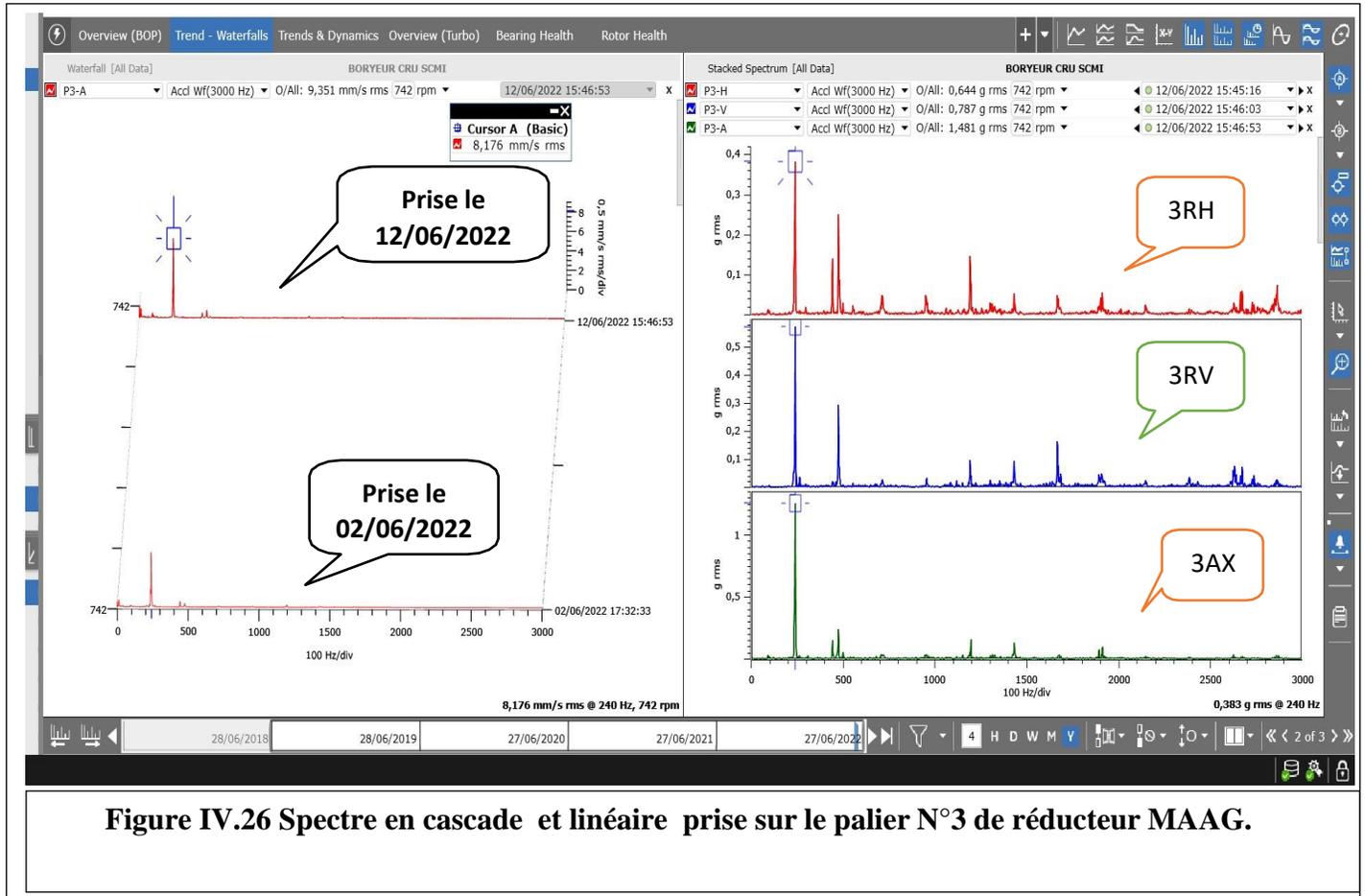


Figure IV.26 Spectre en cascade et linéaire prise sur le palier N°3 de réducteur MAAG.

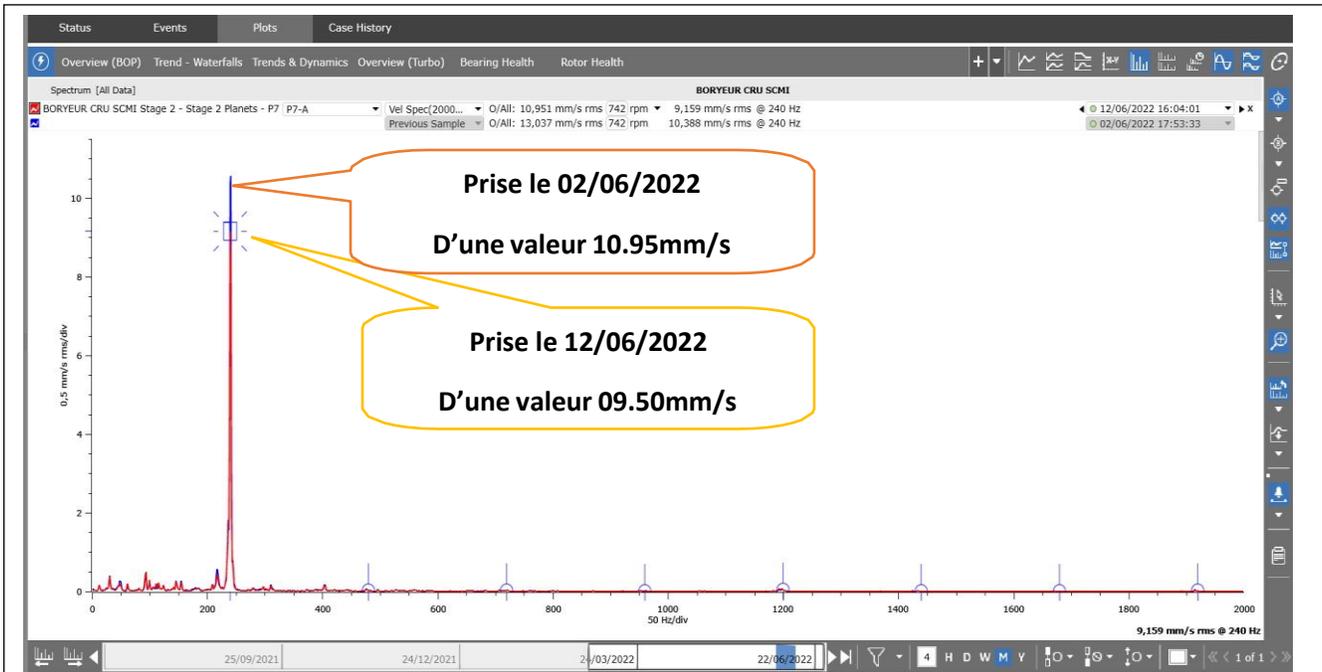


Figure IV.27 : Image spectrale superposé linéaire prise sur le palier N°07 dans la direction axiale, démontre diminution de l'intensité de de défaut d'engrènement à la fréquence d'engrenage F1 (241.25 Hz).

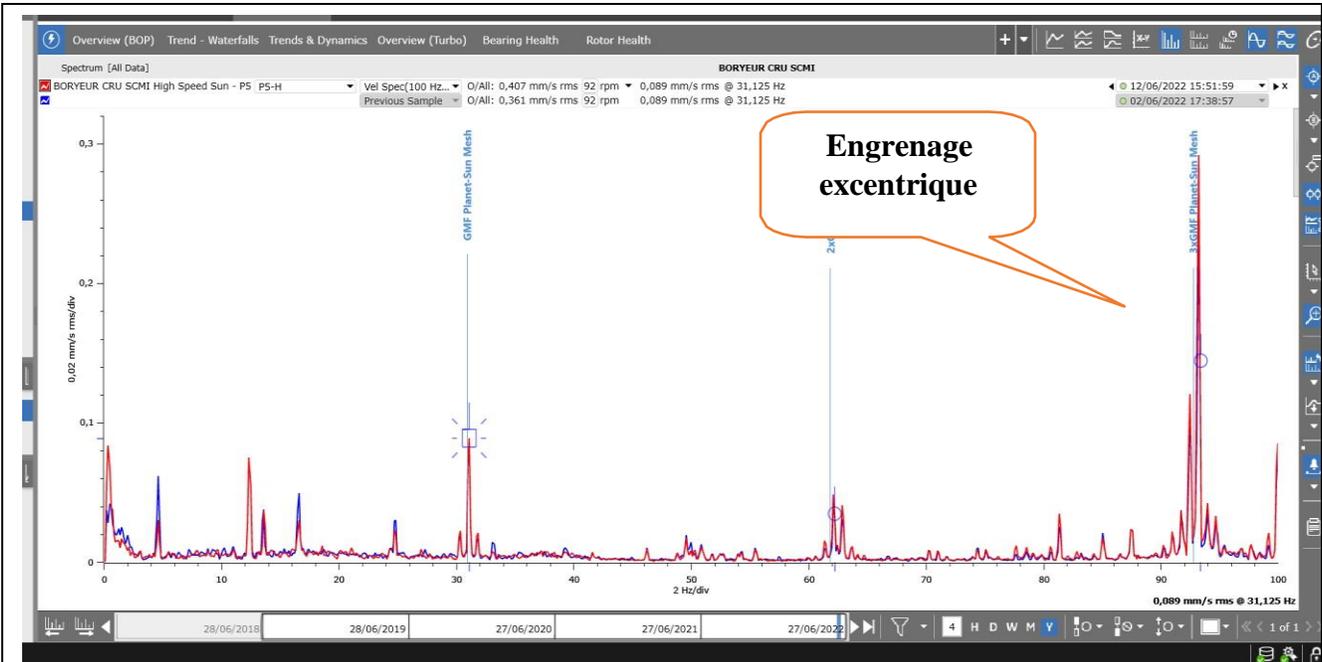


Figure IV.28 : Spectre linéaire superposé prise sur le palier N°05 dans la direction horizontale, met en évidence la stabilité de défaut d'excentricités (entre la pigne GV et les satellites)

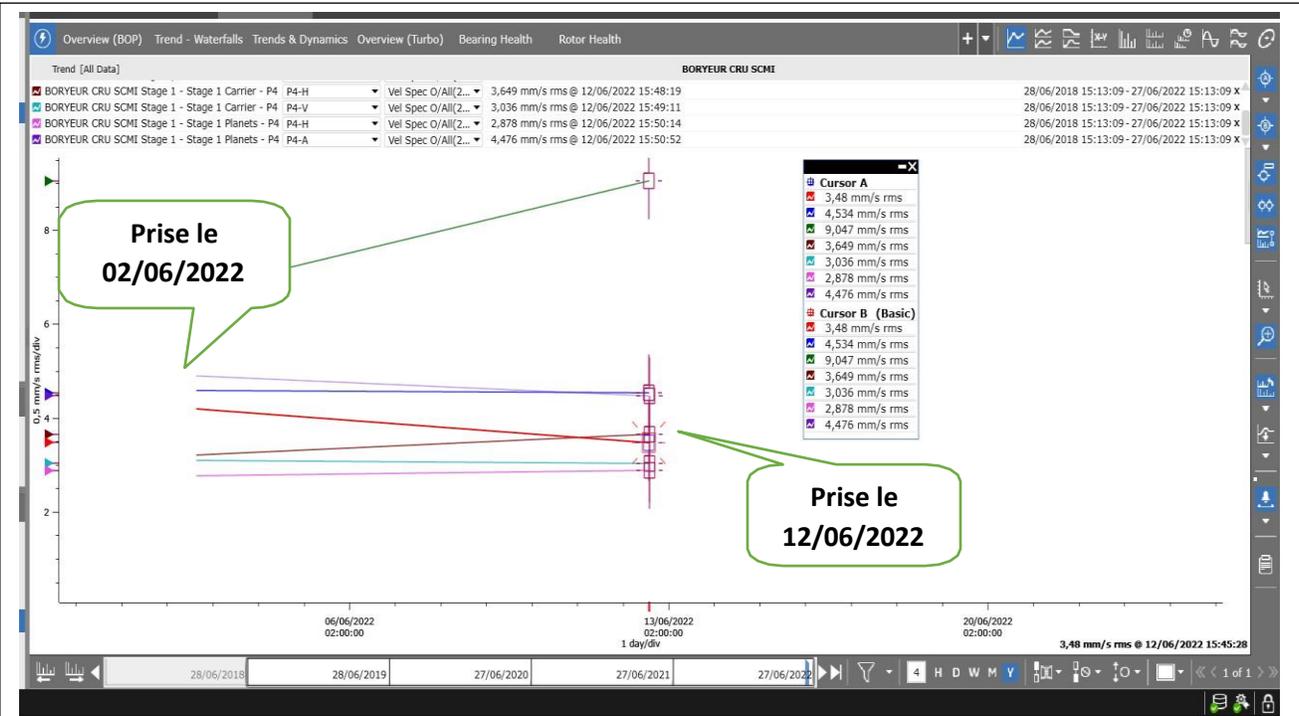


Figure IV.29 : Courbe de tendance sur le palies de **stage 1** de réducteur MAAG en trois directions (H, V, A), illustrant la stabilité du niveau vibratoire en vitesse «mm/s »



Figure IV.30 : Courbe de tendance sur le palies de **stage 1** de réducteur MAAG en trois directions (H, V, A), illustrant la stabilité du niveau vibratoire en accélération « g »

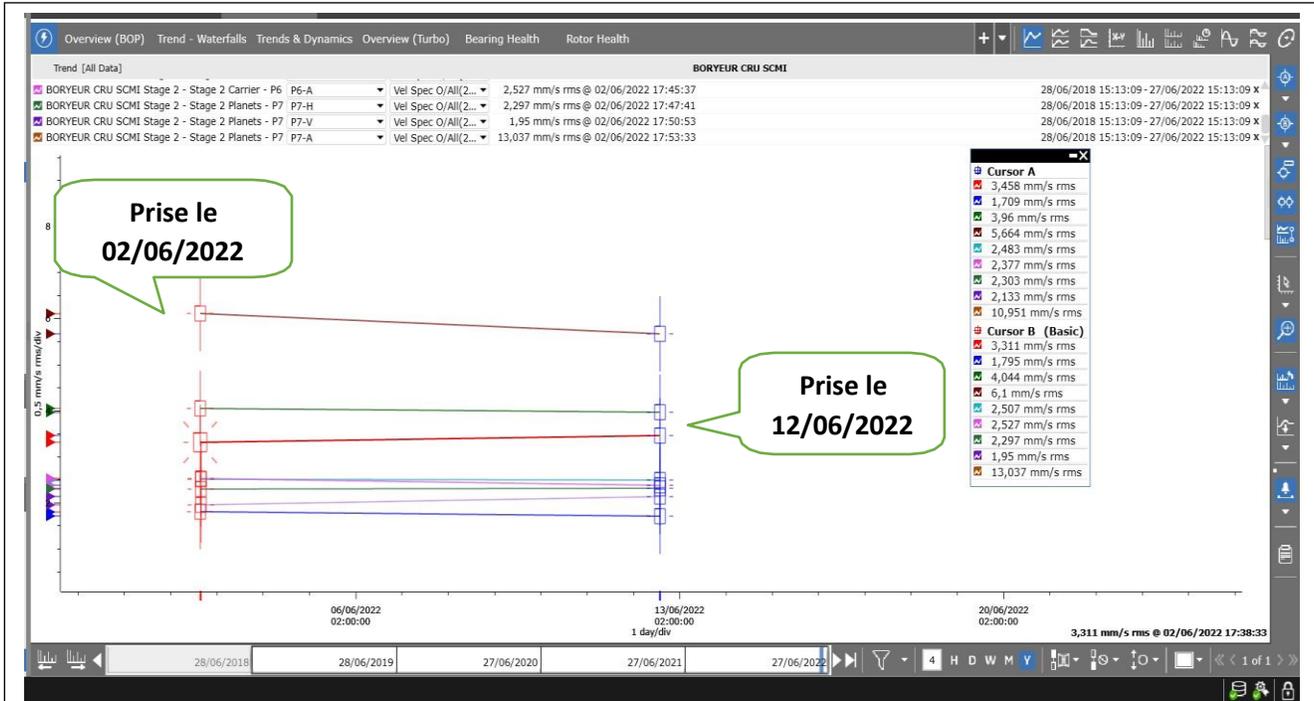
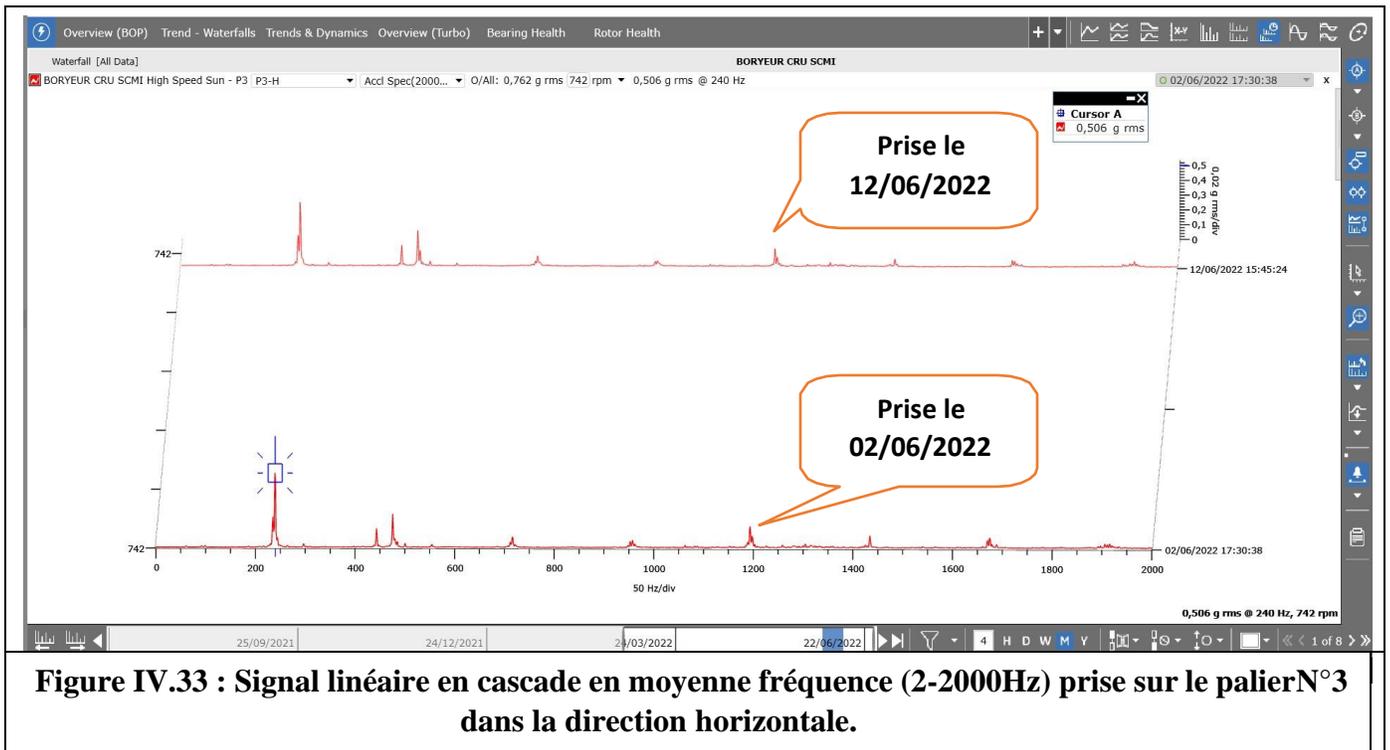


Figure IV.31 : Courbe de tendance sur le palies de **stage 2** de réducteur MAAG en trois directions (H, V, A), illustrant la stabilité du niveau vibratoire en vitesse «mm/s »

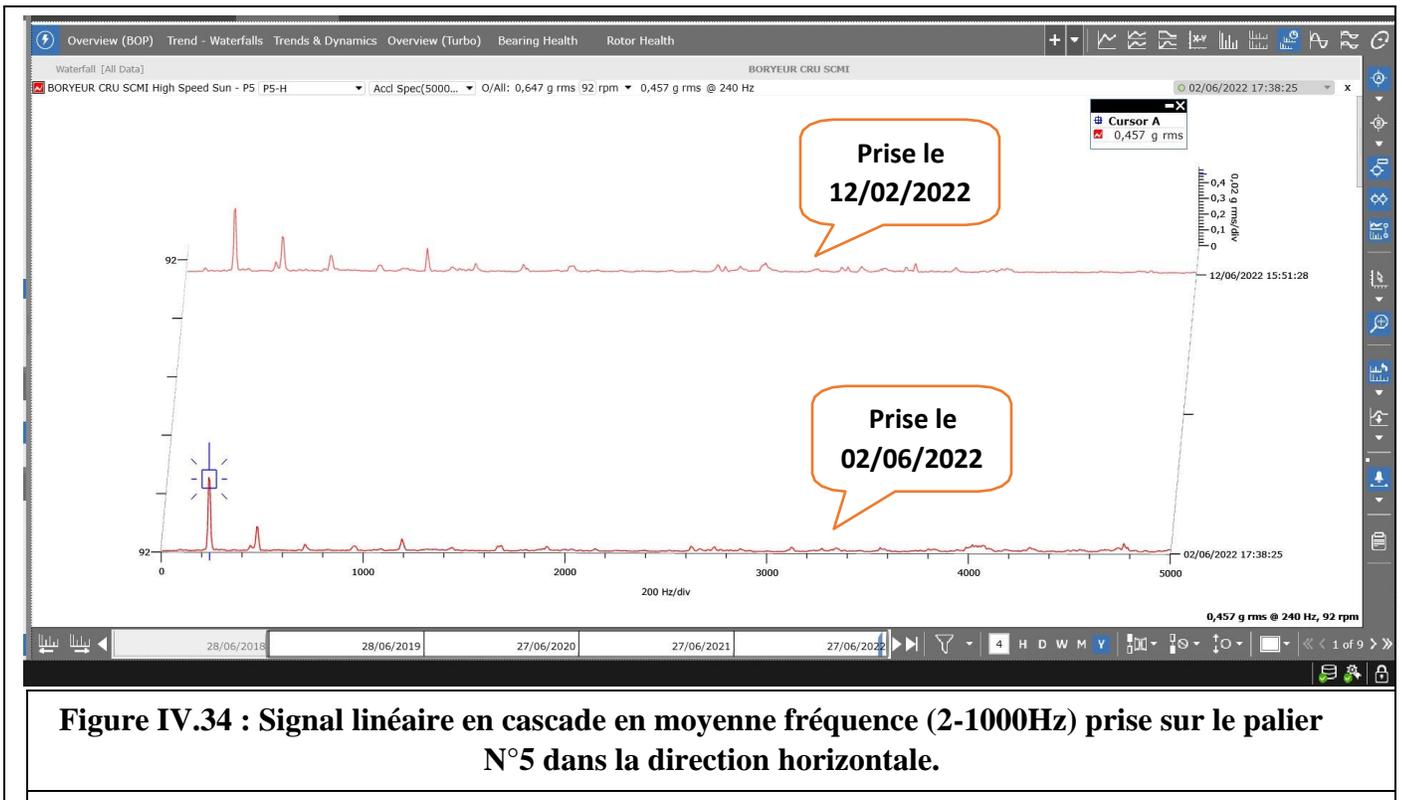


Figure IV.32 : Courbe de tendance sur le palies de **stage 2** de réducteur MAAG en trois directions (H, V, A), illustrant la stabilité du niveau vibratoire en accélération « g »

La partie de petite vitesse (stage 2) de réducteur MAAG



La partie de petite vitesse (stage 2) de réducteur MAAG



Résultats d'analyse

D'après les résultats mentionnés sur le tableau (IV.2) et en comparaison avec la norme ISO 10816-3 et la notice de constructeur de réducteur MAAG. Nous constatons ce qui se suit :

Les niveaux vibratoires en vitesse(mm/s) et en accélération (g) sur tous les paliers de la cinématique du BORYEUR CRU sont **stables**, nous a révélé aussi la stabilité des anomalies citées précédemment sur la mesure 02/06/2022.

NB : Les défauts d'engrenages sur les commandes de broyeurs sont proportionnels à la charge du broyeur (matière et boules.....ect).

IV.3 Conclusion

Pendant notre stage et d'après les résultats que on a obtenus et leurs interprétations, nous pouvons peut dire que :

- L'analyse vibratoire se considère comme la méthode la plus utilisable à cause de son efficacité et ses précise résultats après les mesures du spectre et les tableaux donnés par l'analyseur.

CHAPITRE V

CONCEPTION ET SIMULATION DU Réducteur

V Introduction :

La simulation numérique consiste à reproduire par le calcul le fonctionnement d'un système, préalablement décrit par un ensemble de modèle. Elle s'appuie sur des méthodes mathématiques et informatiques spécifiques. ANSYS est une méthode générale pour résoudre les problèmes industriels en construisant très efficacement des modèles de simulation la prise en compte simultanée de plusieurs composants conduit à une coordination précise pour une meilleure performance du système et un degré d'efficacité plus élevé. Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes étapes qui nous a permis de réaliser l'étude numérique, après les problèmes qu'on a trouvé dans étude expérimentale dans le stage 1 du réducteur MAAG on a décidé de faire une simulation avec le logiciel ANSYS Workbench pour cela il a fallu dessiner le système planétaire sur le logiciel SolidWorks afin d'avoir un prototype et après le transféré dans l'ANSYS.

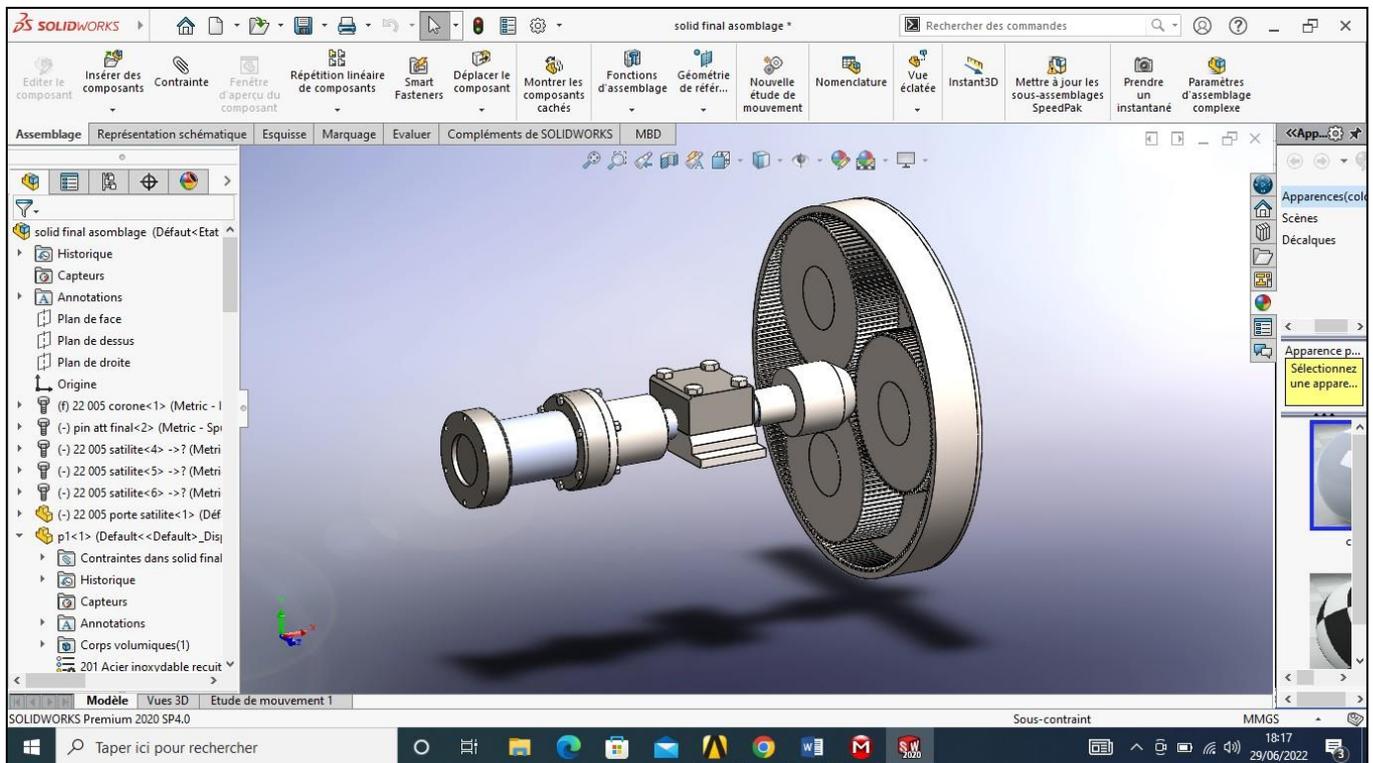


Figure V.1 : dessin stage 1 de réducteur maag

V.1 Les logiciels utilisés :

V.1.1 Le logiciel SOLIDWORKS :

SOLIDWORKS est un modèleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est repercutée vers tous les fichiers concernés.

V.1.2 Le logiciel ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation.

V.1.3 Le logiciel ANSYS Workbench :

ANSYS Workbench est la plateforme de simulation d'ANSYS dans laquelle sont organisés et pilotés les calculs multi-physiques. Elle offre une Interface graphique commune avec des passerelles vers les CAO courantes et des outils de maillage. 742 77.702

V.2 Résultat et interprétation :

V.2.1 Etude sur arbre d'attaque :

V.2.2 Analyse modale :

L'analyse modale établie dans deux cas, stationnaire et rotationnelle.

V.2.2.1 Cas stationnaire : vitesse de rotation = 0 tr/min

Dans le cas stationnaire on a déterminé les fréquences propres de rotor qui sont indiquées dans le tableau suivant :

N° de mode	1	2	3	4	5	6	7	8
Fréquence (HZ)	0	0,25722	26,567	26,619	180,44	253,53	255,85	332,78

Tableau V.1 : Fréquence propre de rotor.

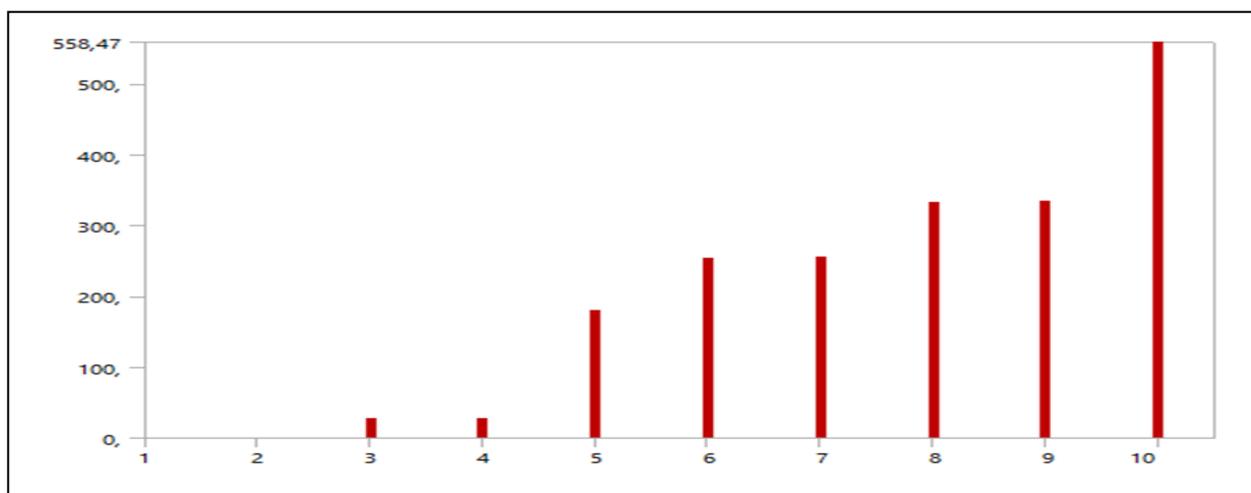


Figure V.2 : Graph de fréquence propre.

Ses déplacements totaux suivant les fréquences propres mentionnées dans le tableau précédent et illustré dans les figures suivant :

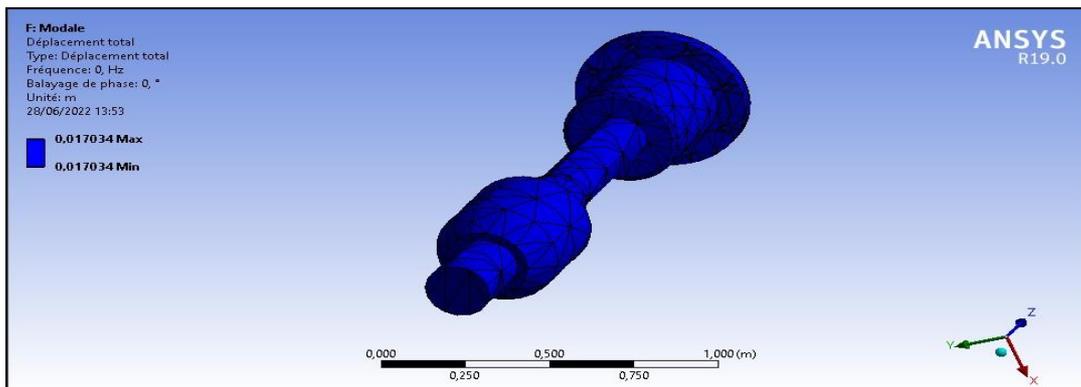


Figure V.3 : Déplacement total mode 1.

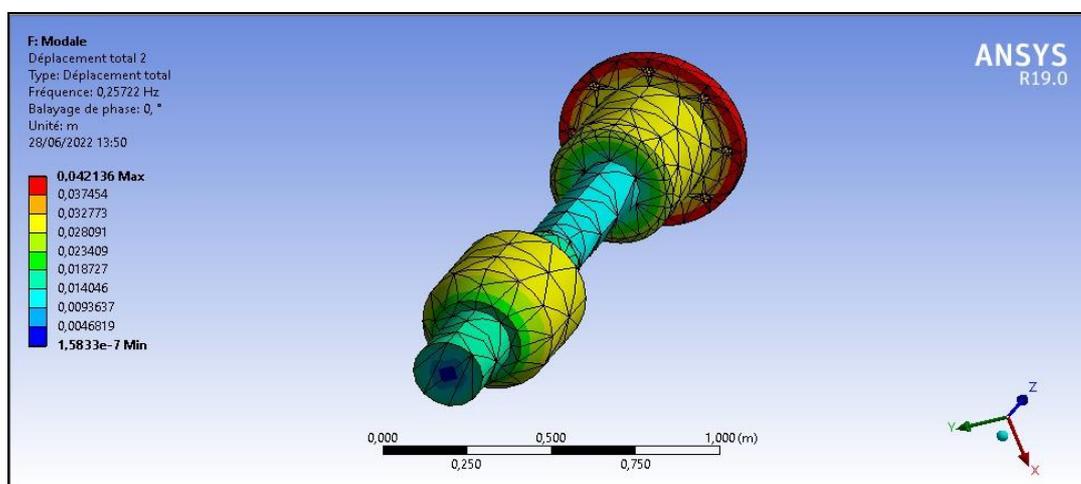


Figure V.4 : Déplacement total mode 2.

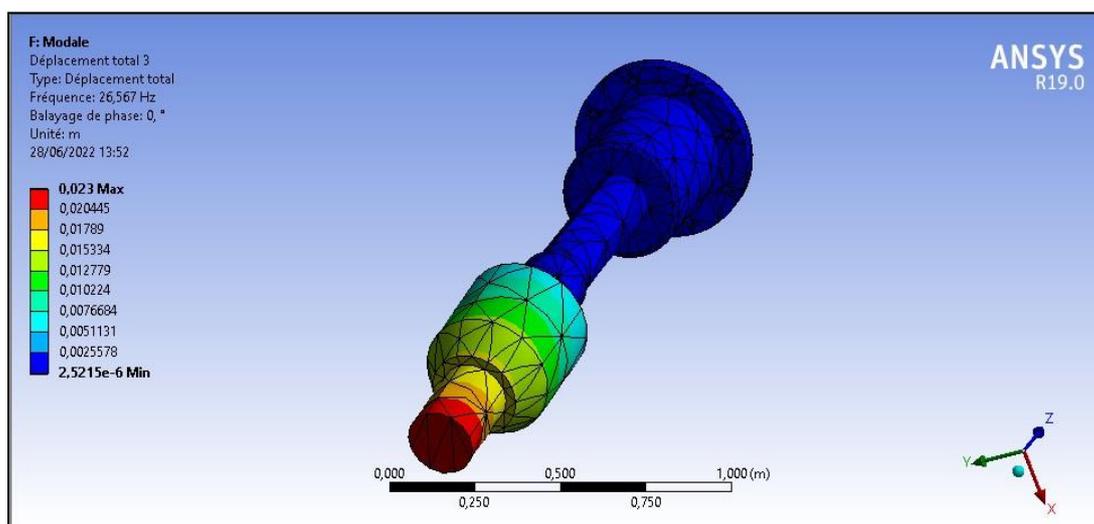


Figure V.5 : Déplacement total mode 3.

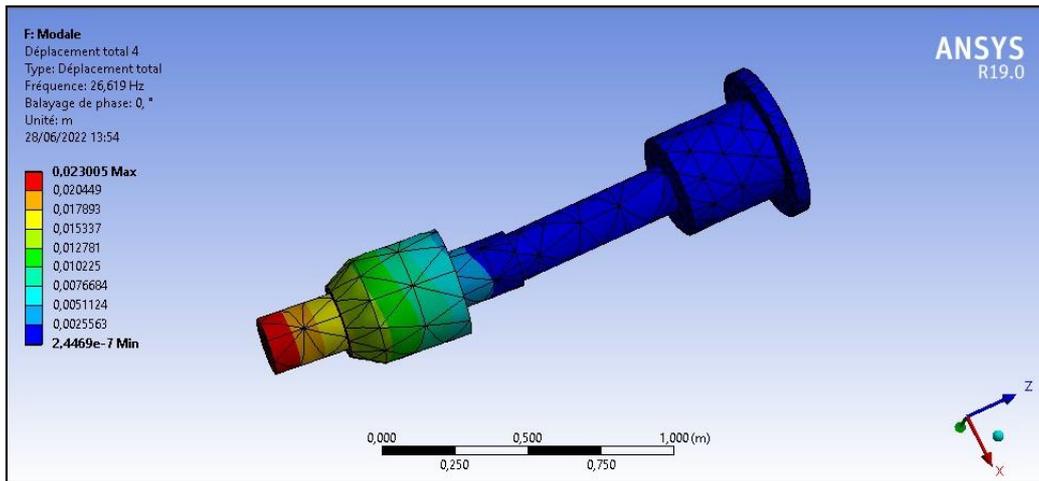


Figure V.6 : Déplacement total mode 4.

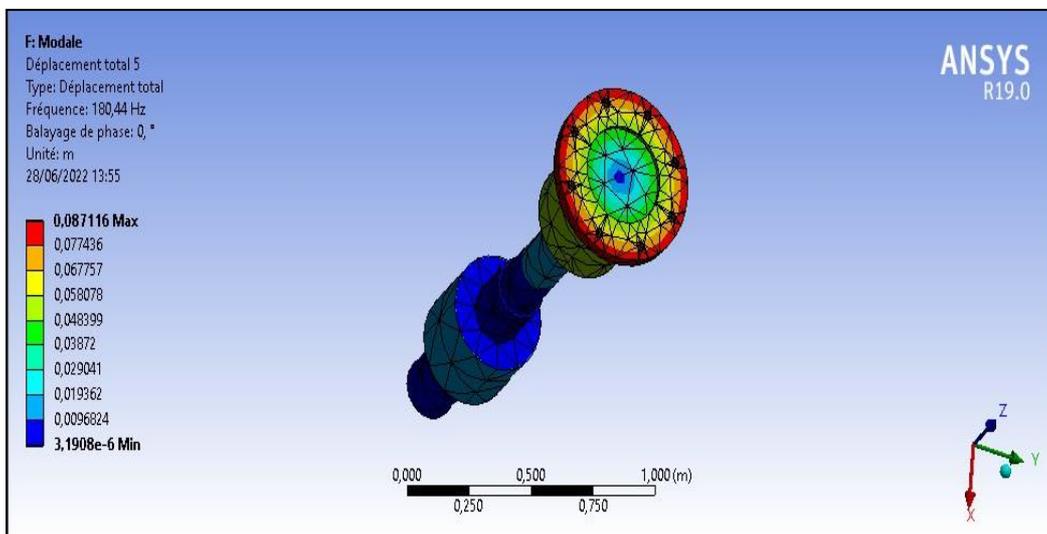


Figure V.7 : Déplacement total mode 5.

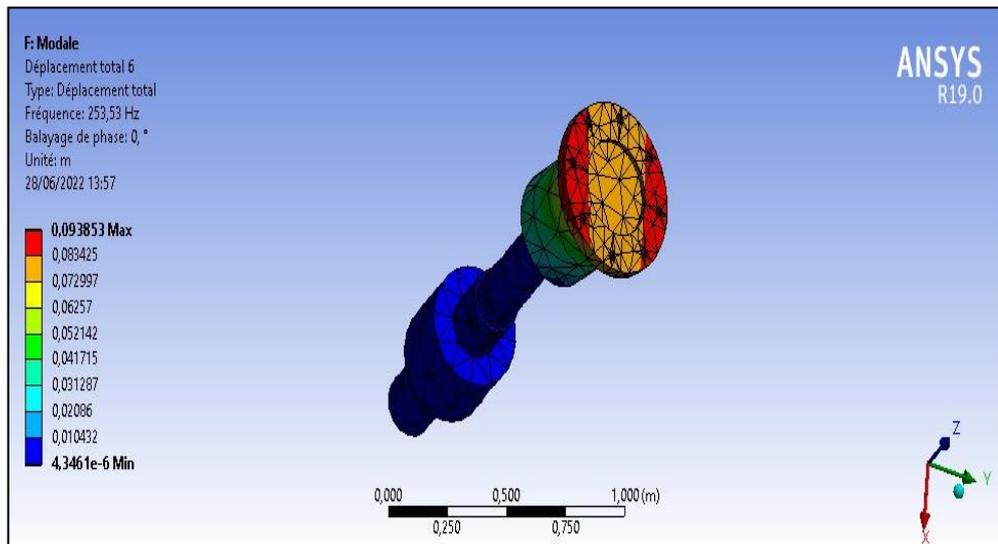


Figure V.8 : Déplacement total mode 6.

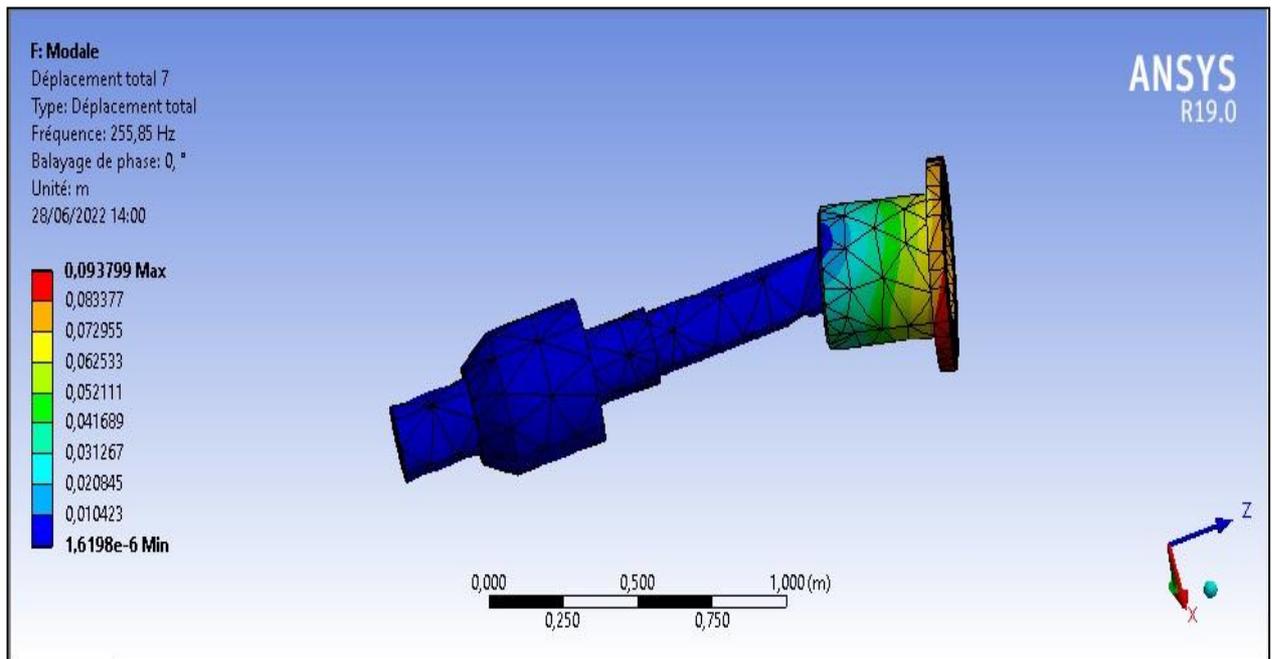


Figure V.9 : Déplacement total mode 7.

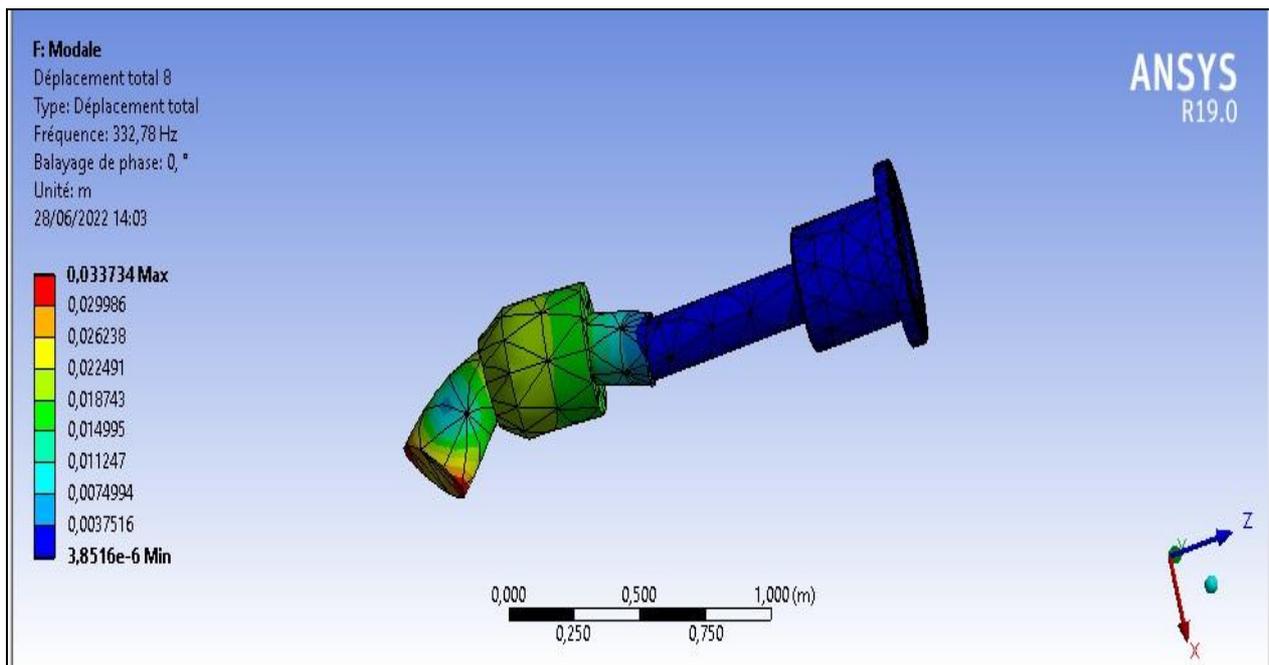


Figure V.10 : Déplacement total mode 8.

V.2.2.1.1 Analyse harmonique :

Dans ce cas :

- On applique une pression sur l'arbre.
- On présente quelque réponse graphique (déformation, déplacement, contrainte) et ses résultats.

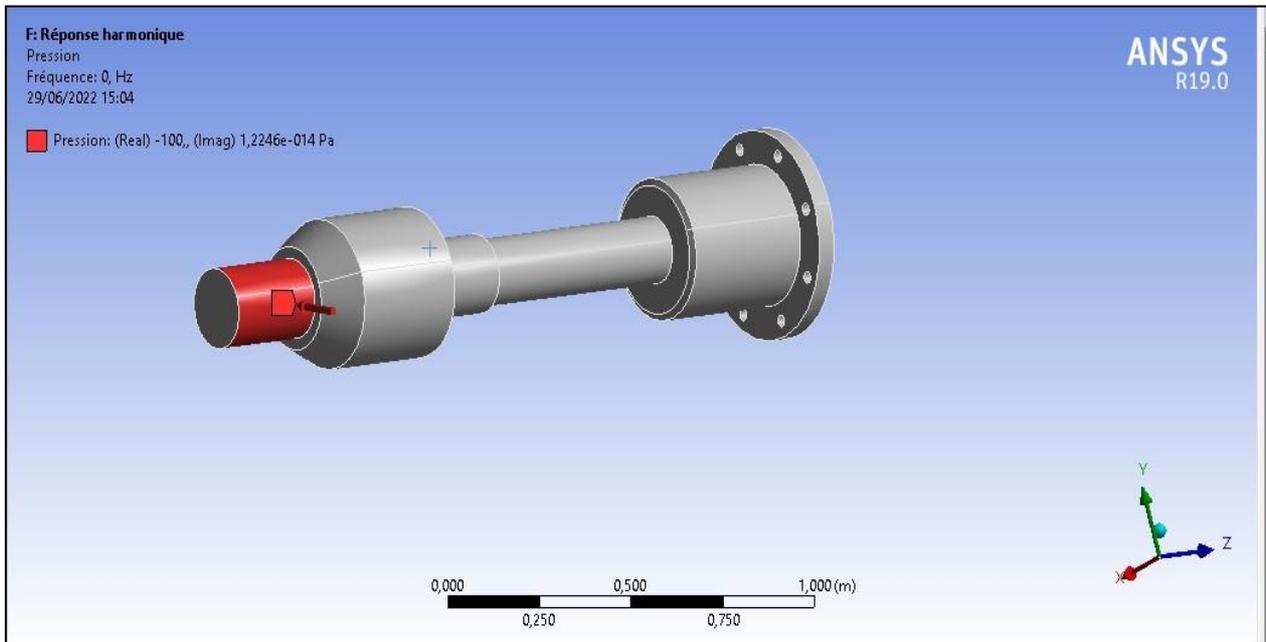


Figure V.11 : Application d'une pression sur l'arbre

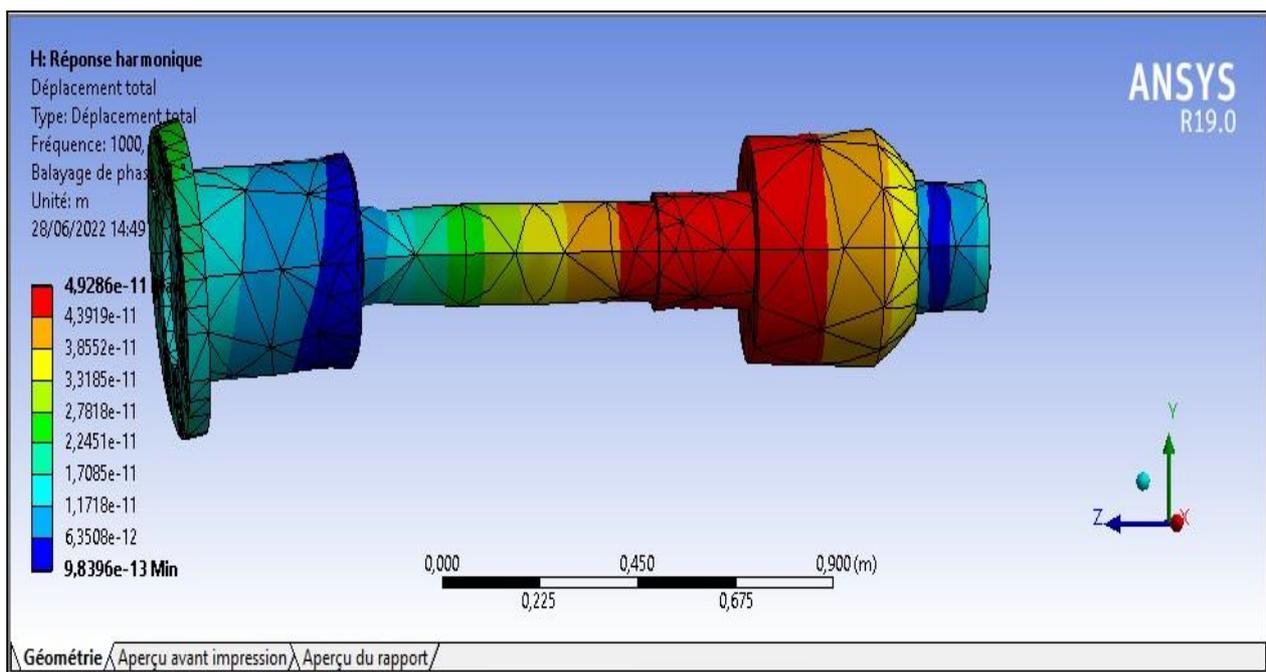


Figure V.12 : Représentation graphique du déplacement (cas dynamique).

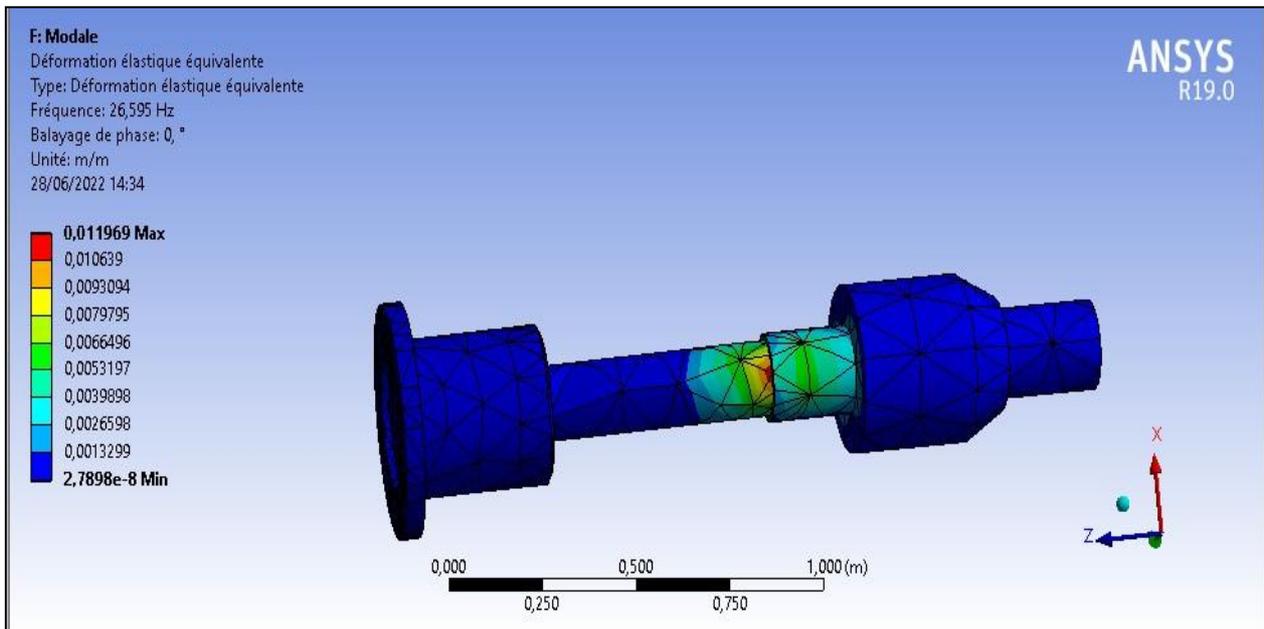


Figure V.13 : Représentation graphique de la déformation élastique équivalente (cas dynamique).

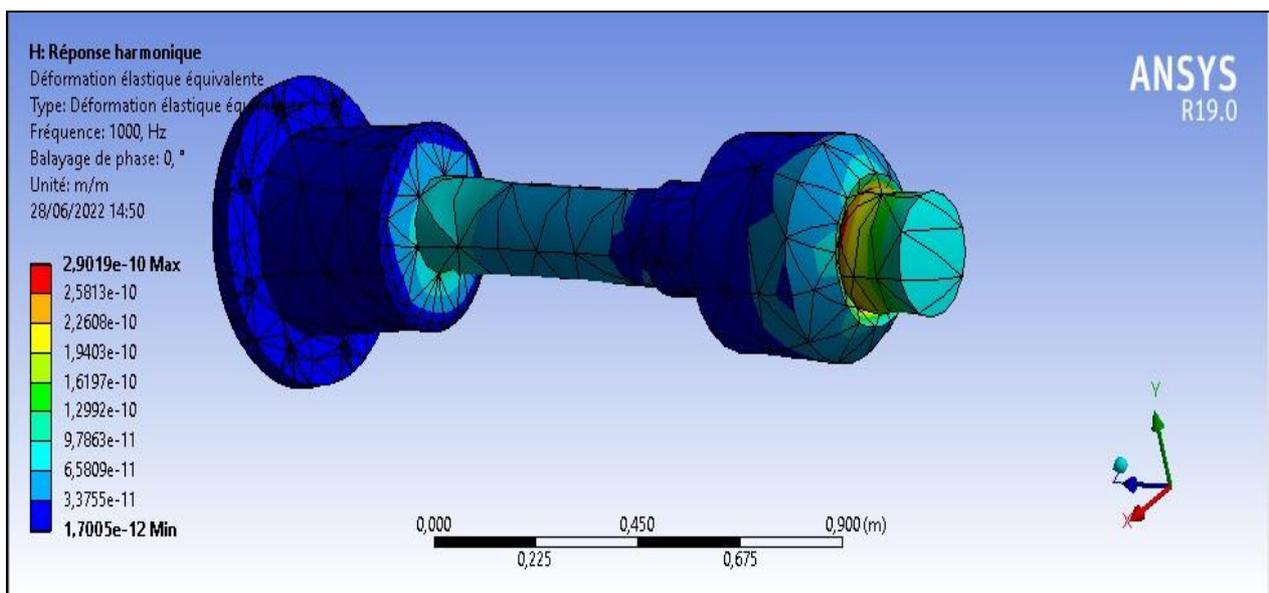


Figure V.14 : : Représentation graphique de la déformation élastique équivalente (1000HZ).

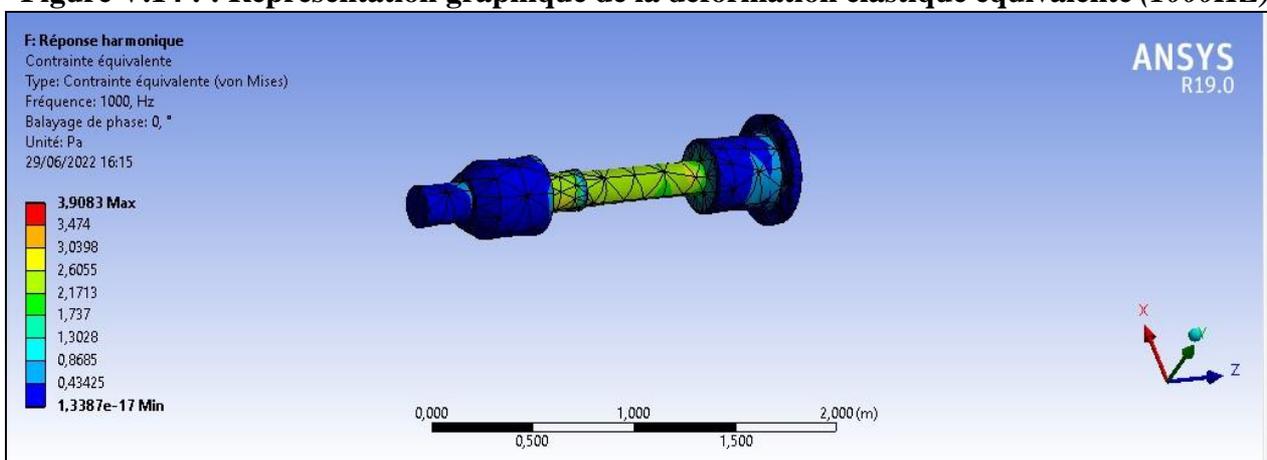


Figure V.15 : Représentation graphique de contrainte équivalente (100HZ).

V.2.3 Etude sur système planétaire :

V.2.3.1 Structure statique :

Dans ce cas

- On applique la pression de satellite sur le pignon d'attaque.
- On présente quelque réponse graphique (coefficient de sécurité, contrainte) et ses résultats.

	Temps [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Nodal moyenné [Pa]
1	1,	2,9916e-002	2,1726e+008	3,4226e+006
2	2,	4,6823e-002	2,1725e+008	3,4226e+006
3	3,	5,0665e-002	2,1724e+008	3,4227e+006
4	4,	8,9518e-002	2,1723e+008	3,4227e+006
5	5,	0,11473	2,1722e+008	3,4228e+006
6	6,	0,11473	2,1722e+008	3,4228e+006

Tableau V.3 : la pression appliquée.

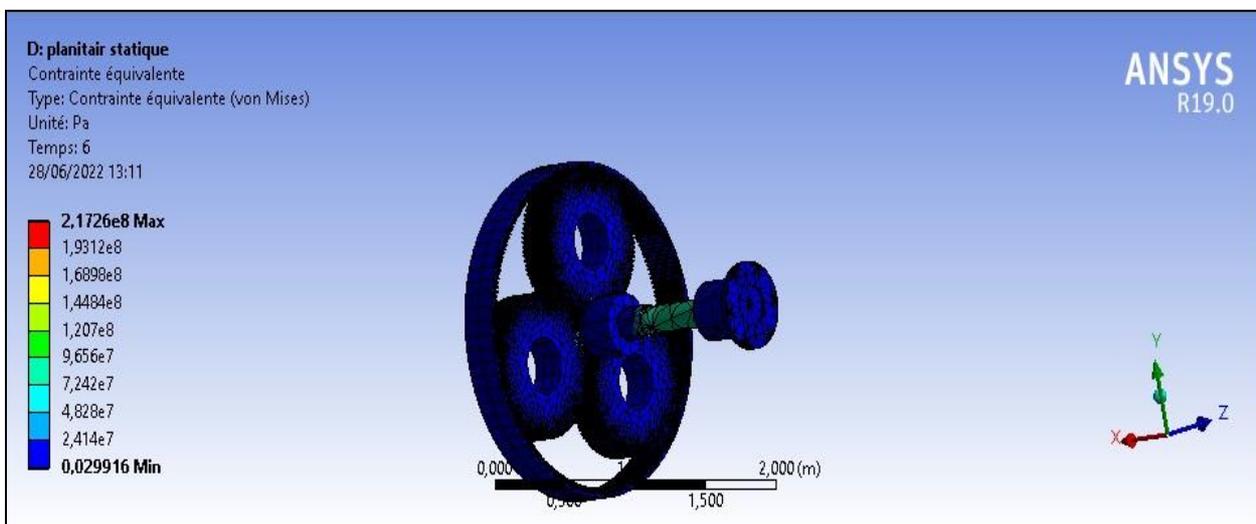


Figure V.16 : Représentation graphique de la contrainte équivalente.

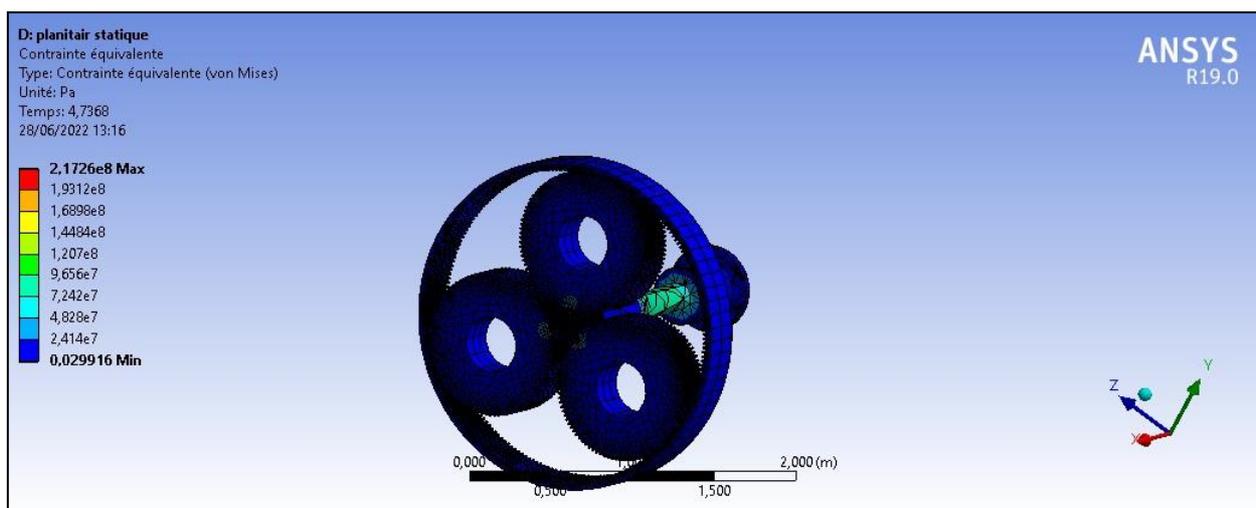


Figure V.17 : Représentation graphique de la contrainte équivalente.

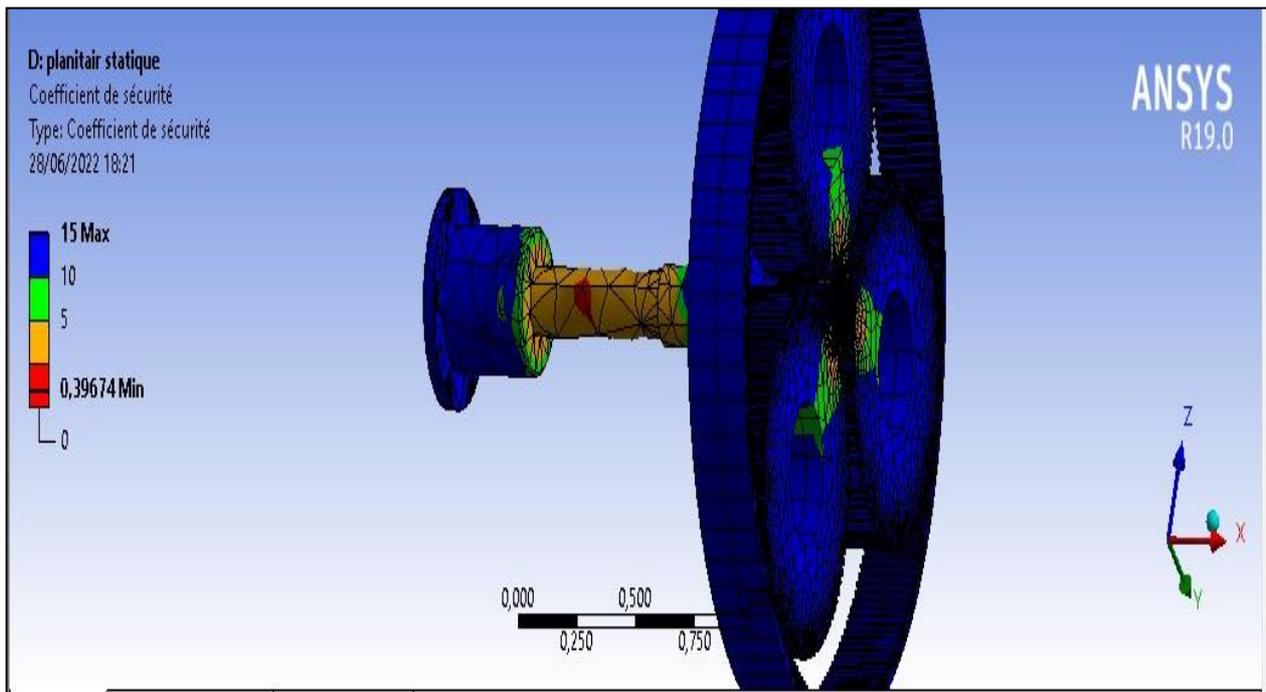


Figure V.18 : Représentation graphique du coefficient de sécurité.

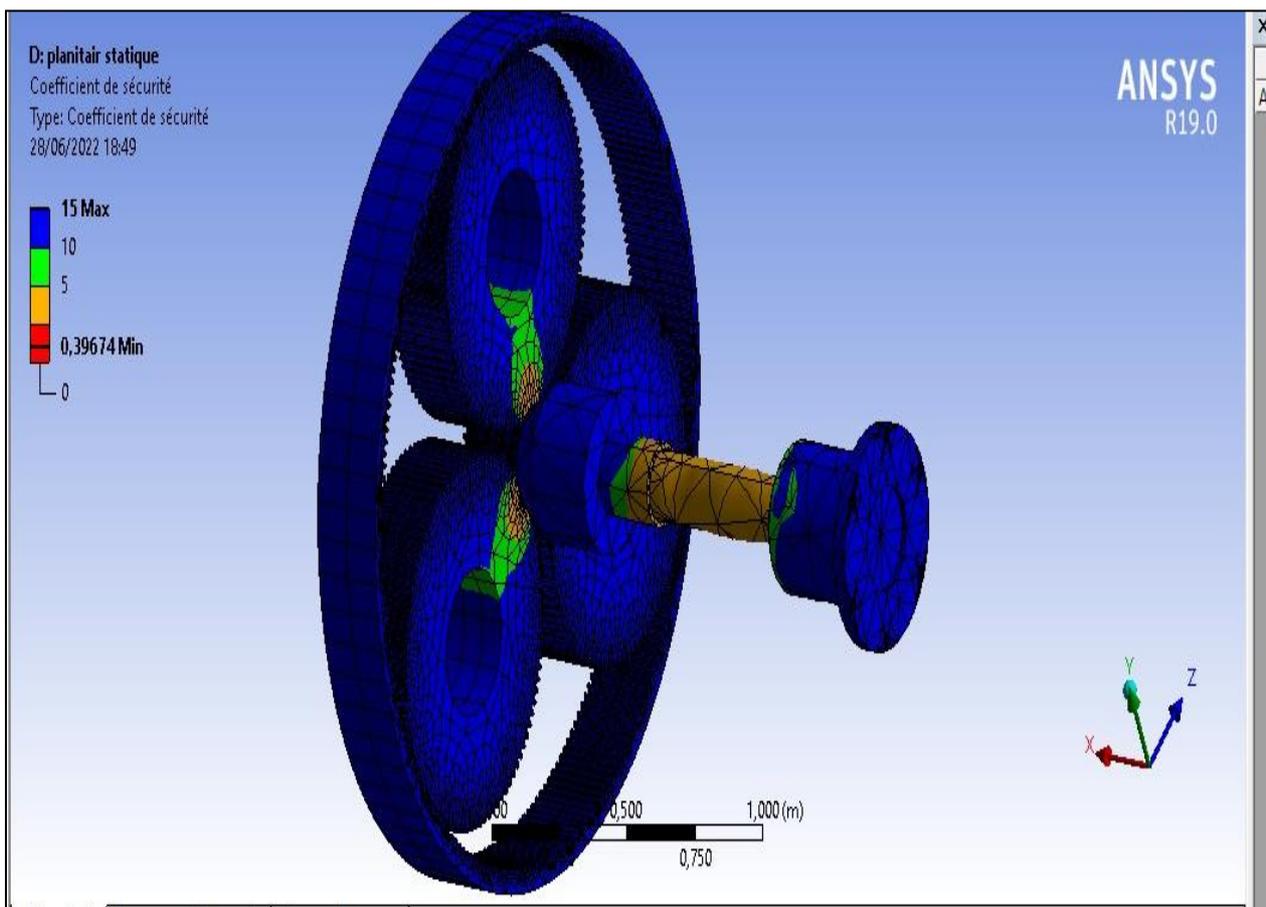


Figure V.19 : Représentation graphique du coefficient de sécurité autre vu.

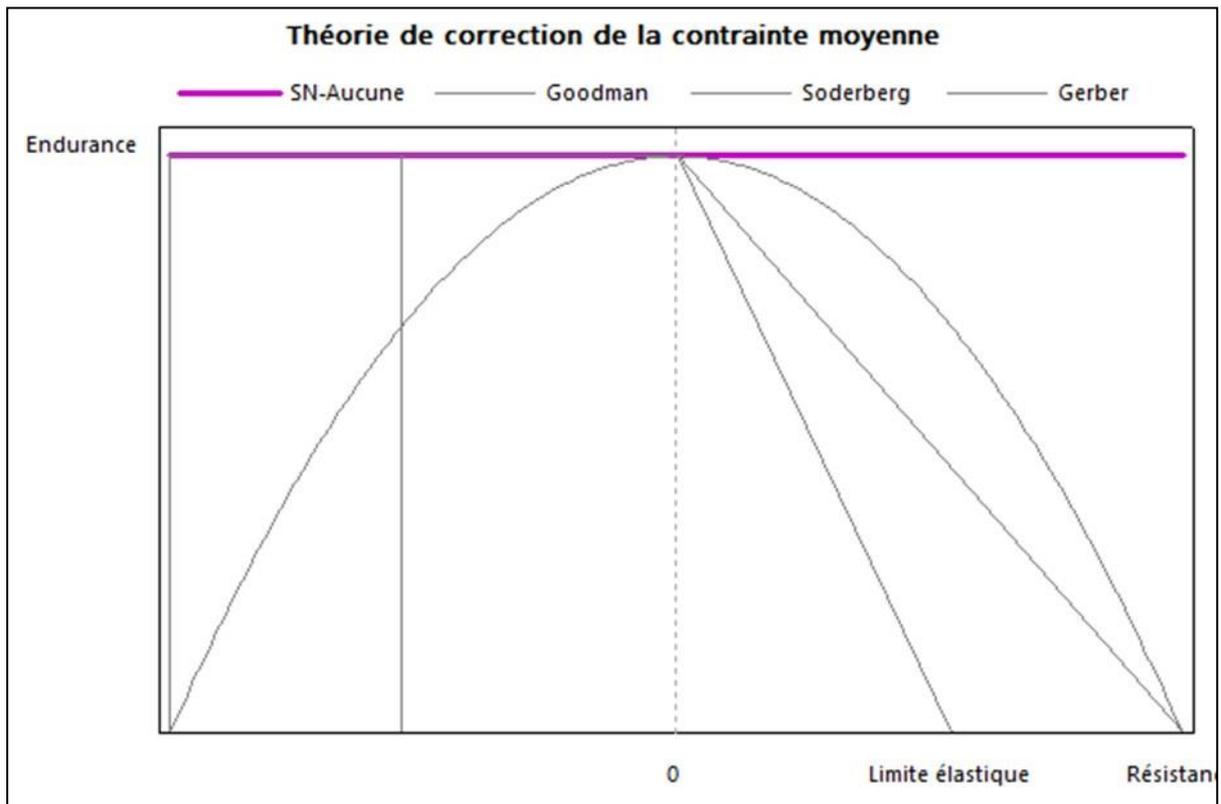


Figure V20 : Graphe de réponse d'outil fatigue.

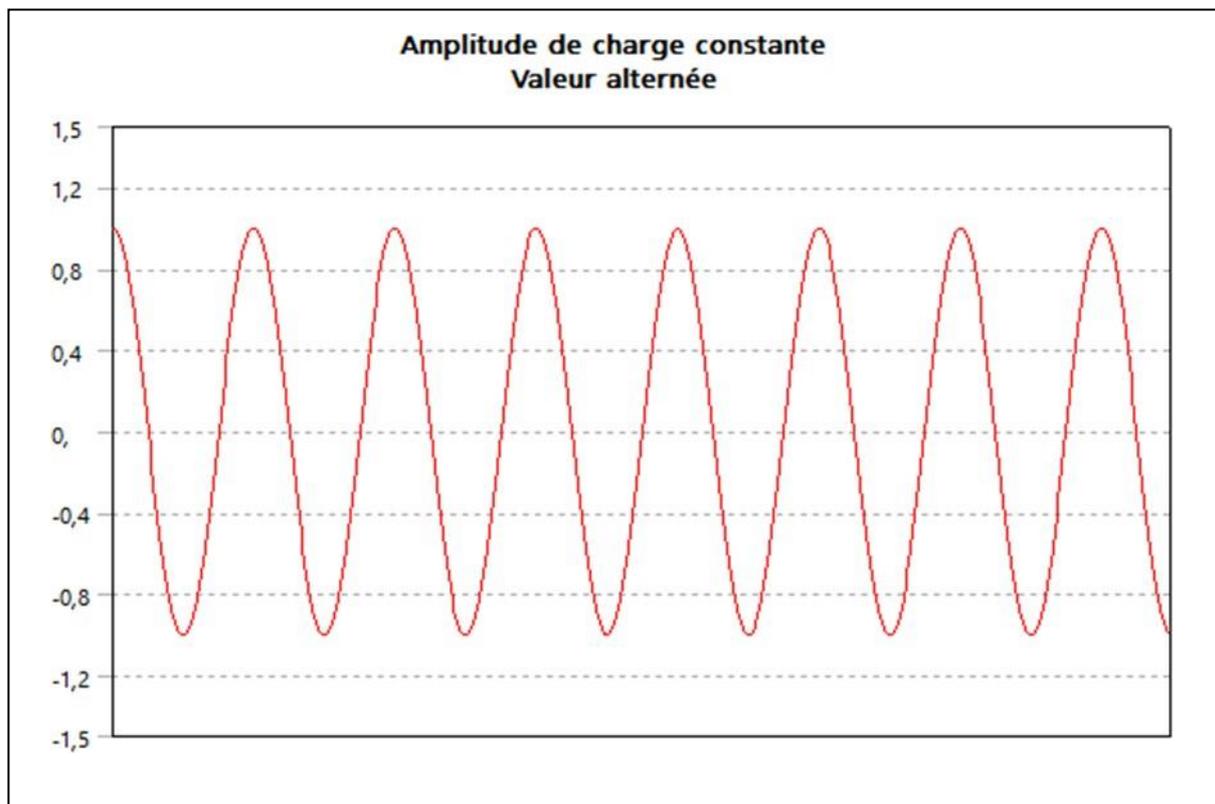


Figure V.21 : Graphe de théorie de correction de la contrainte moyenne.

V.2.3.2 Cas rotationnels : vitesse de rotation = 77,702 rad/s (742 tr/min)

Mode	Mode Stabilité	Vitesse critique	77,702 rad/s	4000, rad/s
1,	STABLE	988,32 rad/s	157,32 Hz	157,21 Hz
2,	STABLE	1459,4 rad/s	232,22 Hz	232,38 Hz
3,	STABLE	1408,1 rad/s	246,59 Hz	180,28 Hz
4,	STABLE	1838,4 rad/s	251,13 Hz	343,49 Hz
5,	STABLE	3607,8 rad/s	574,46 Hz	574,18 Hz
6,	STABLE	3631,4 rad/s	577,7 Hz	577,99 Hz

Tableau V.4 : Vitesse critique.

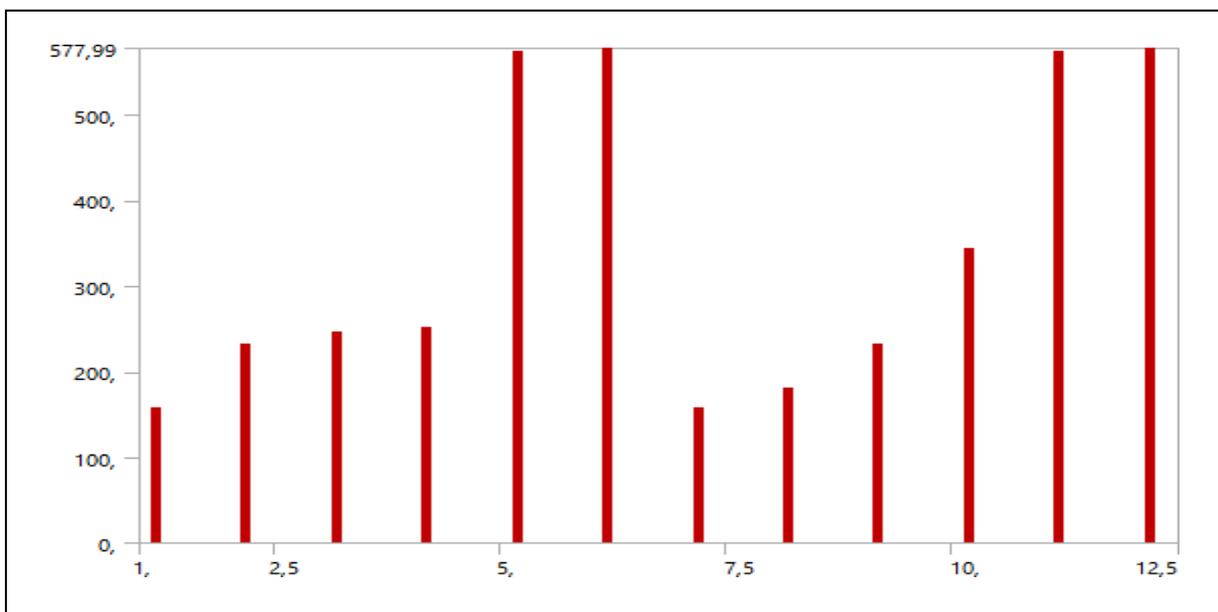


Figure V.22 : Graph fréquence propre.

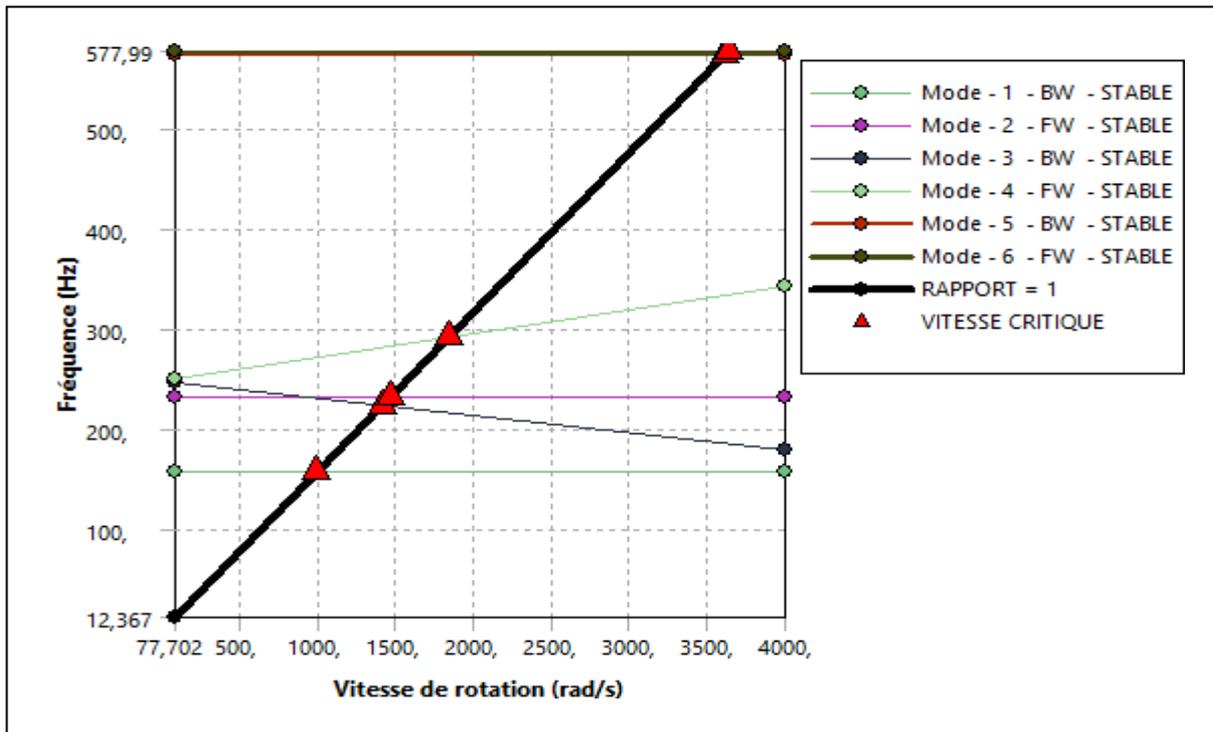


Figure V.23 : Diagramme de campbell.

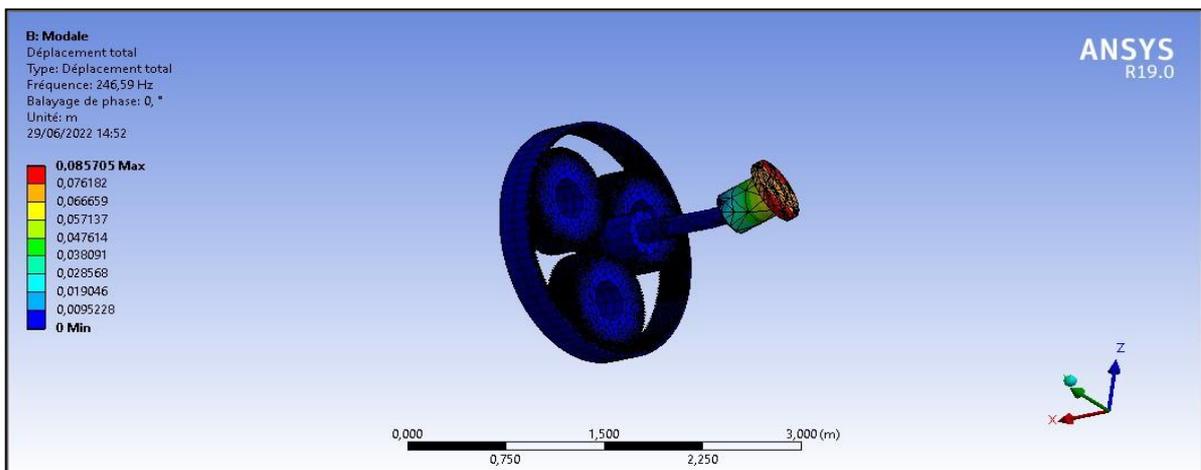


Figure V.24 : Déplacement total 1.

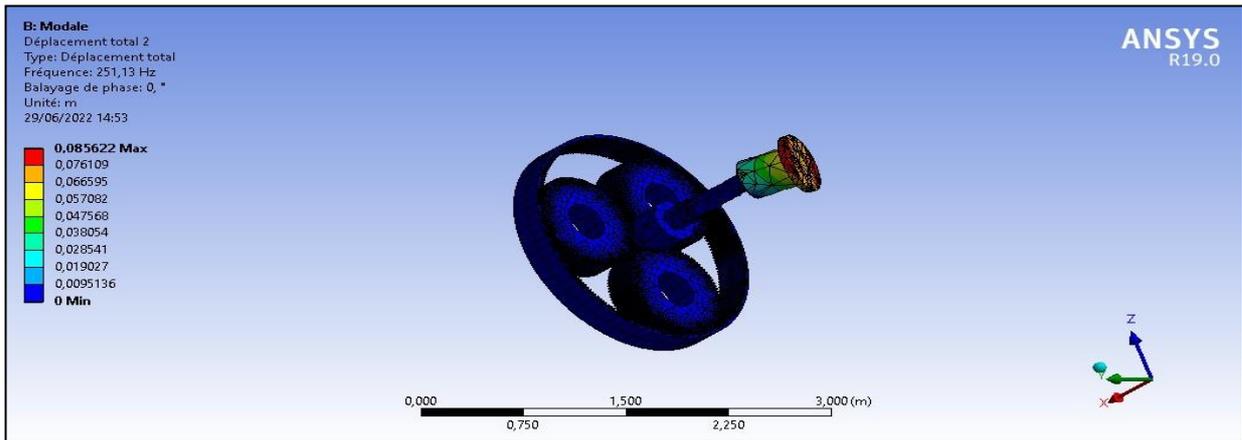


Figure V.25 : Déplacement total 2.

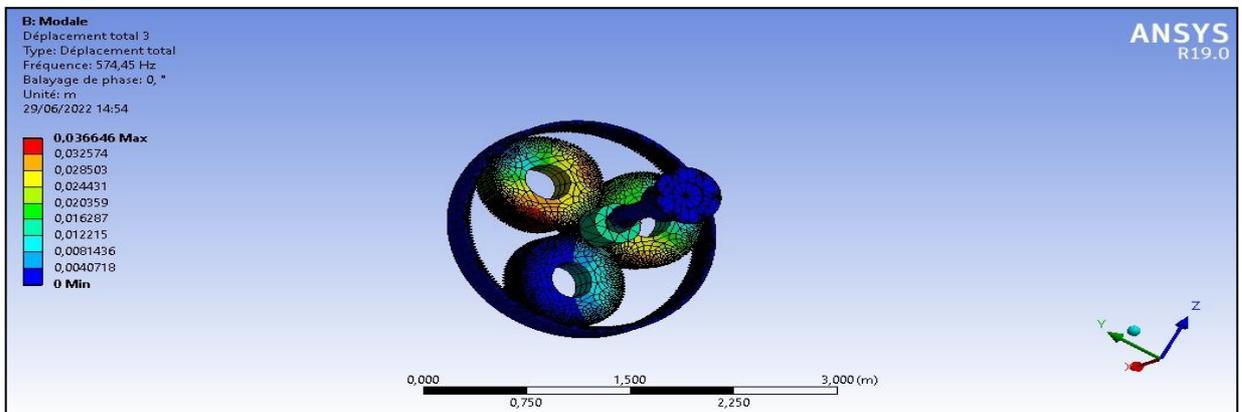


Figure V.26 : Déplacement total 3.

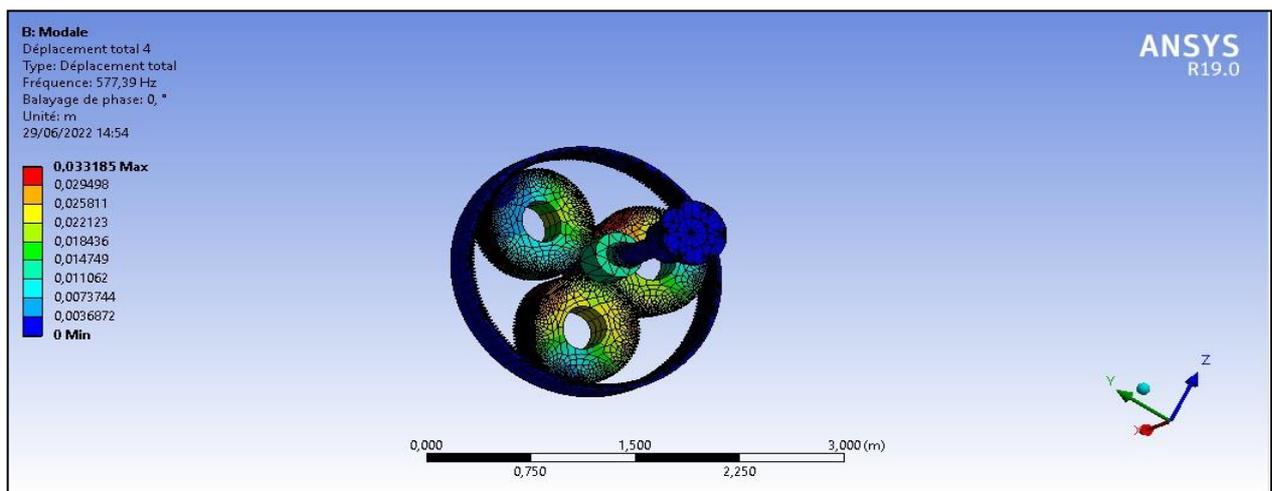


Figure V.27 : Déplacement total 4.

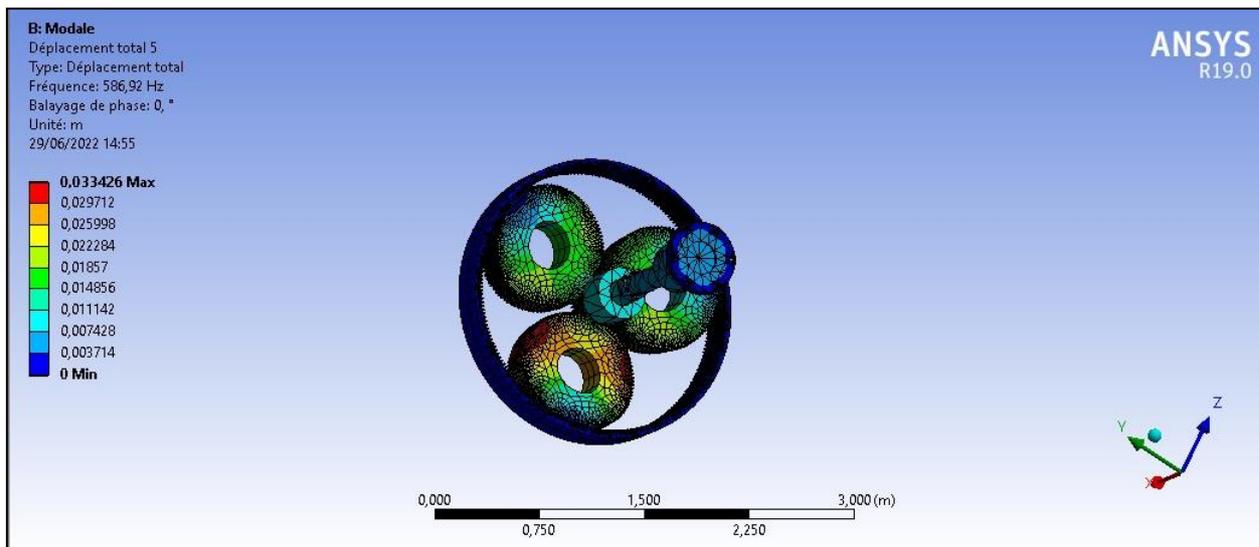


Figure V.28 : Déplacement total 5.

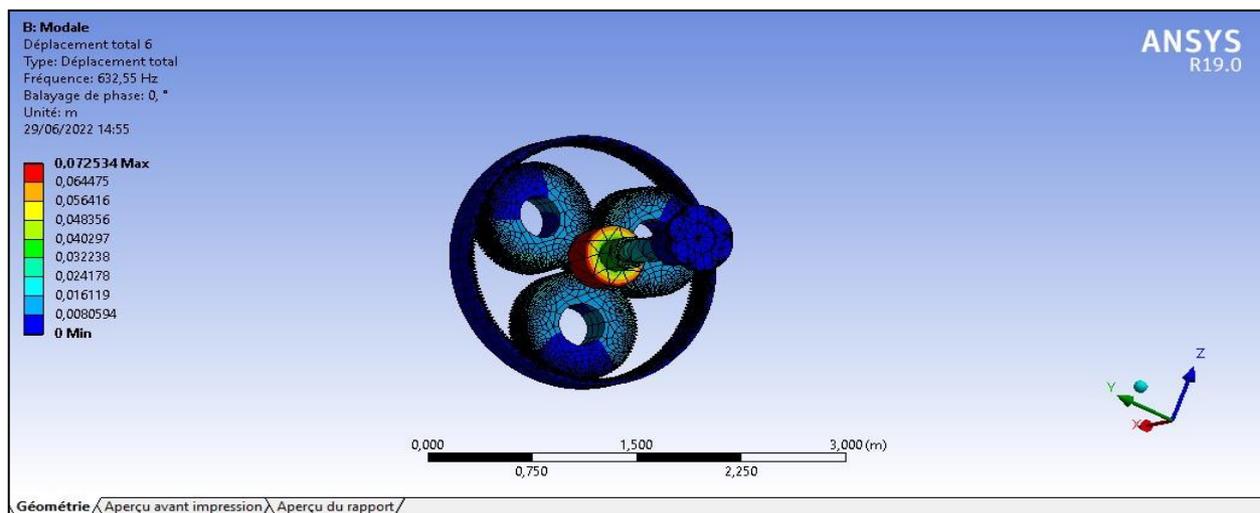


Figure V.29 : Déplacement total 6.

V.3 Conclusion :

L'application de la simulation sur l'arbre d'attaque et le pignon d'attaque dans les deux cas stationnaire et rotationnel (analyse modale, réponse harmonique, analyse structure statique) il déterminé les fréquences propres et les modespropres. On a trouvé les fréquences naturelles et les vitesses critique et le coefficient de sécurité.

CONCLUSION GENERALE

A la lumière de tout ce que nous venons de présenter, la production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère, surtout en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Par conséquent, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. De plus, dans le contexte concurrentiel économique actuel, la réduction des coûts de production est devenue la clé du développement et de la survie de l'entreprise. Hormis, la réduction des coûts de maintenance, l'augmentation des taux de disponibilité des équipements constitue un enjeu vital pour toute entreprise. C'est pourquoi la mise en place d'un programme de maintenance adéquat, permettant de répondre à un tel défi, s'avère nécessaire.

Pour faire face à ces nouveaux enjeux, la maintenance doit faire appel à des techniques d'investigation modernes très spécifiques telles que l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants, ...

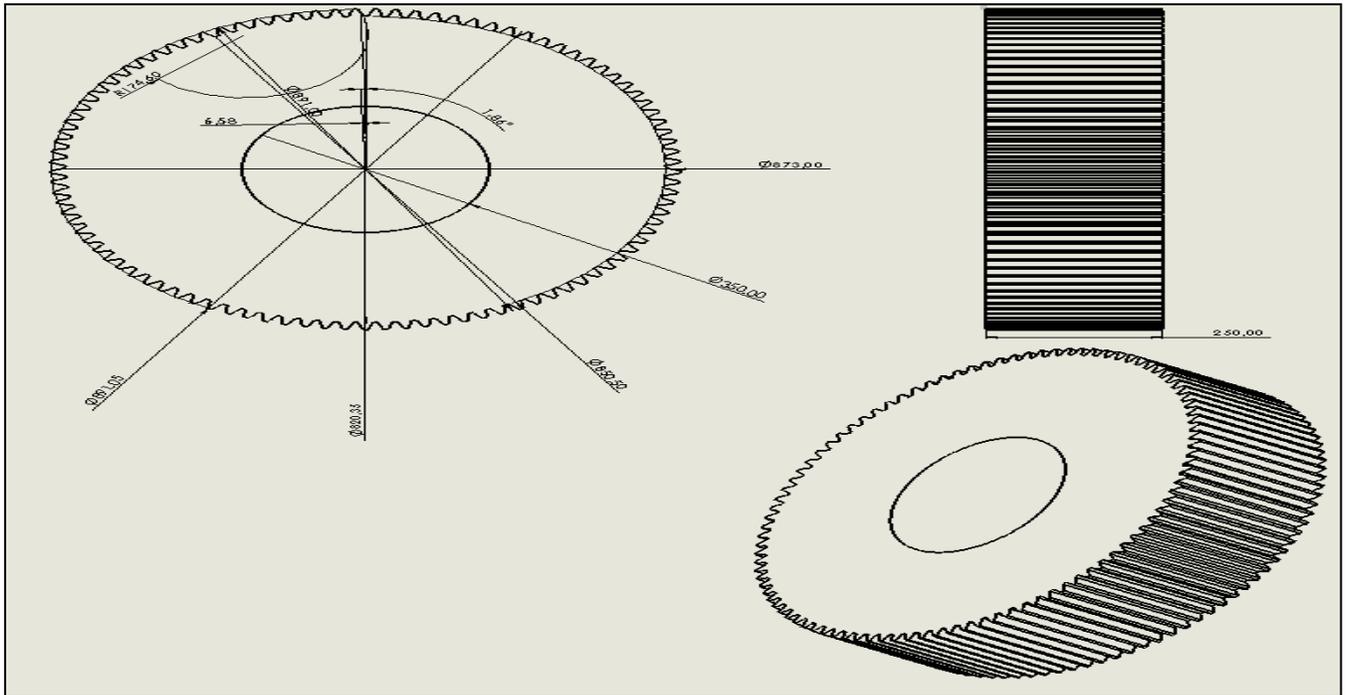
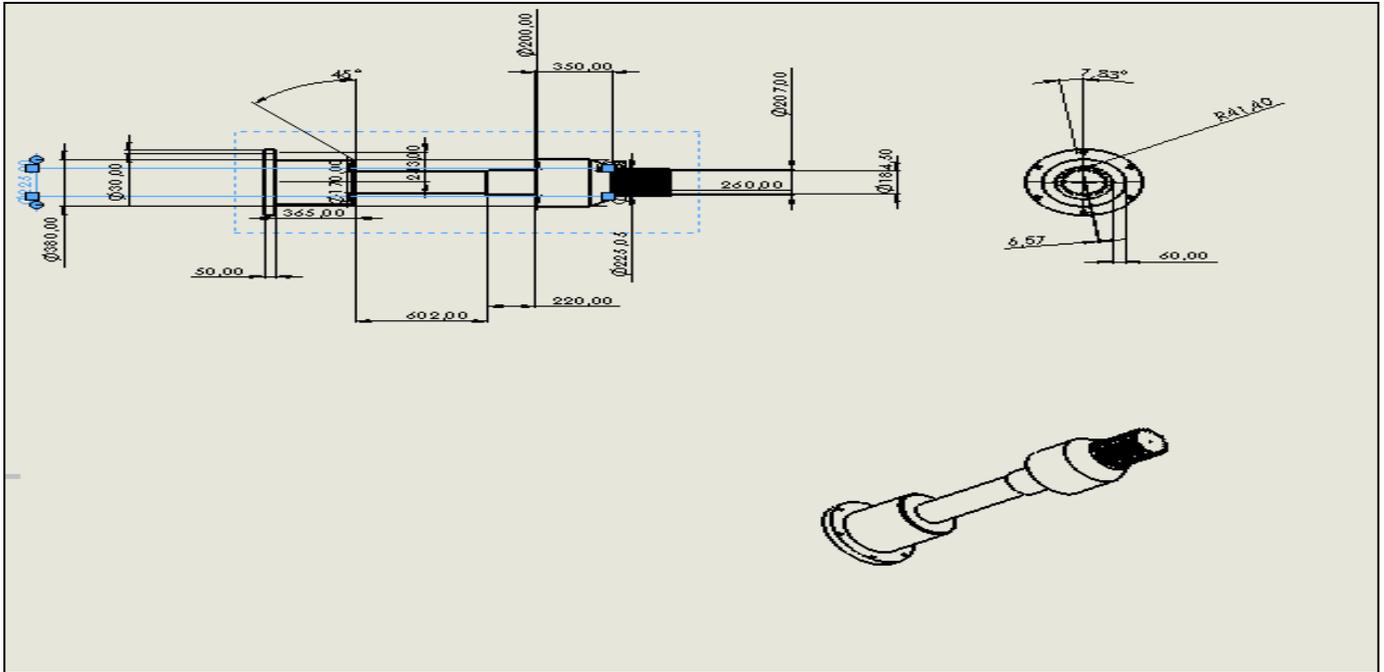
Il faut dire que l'analyse vibratoire permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement ou un roulement usé ... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine et conduisent à une modification de son comportement vibratoire.

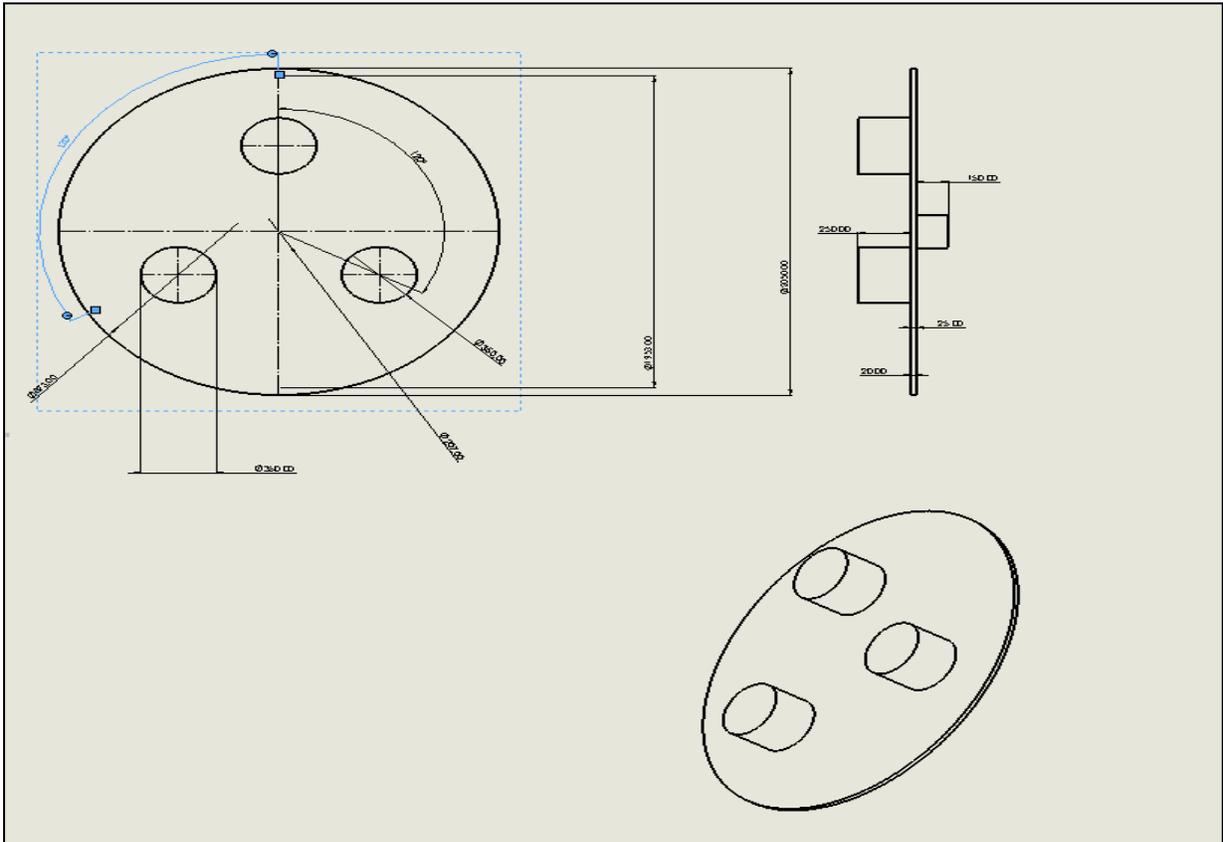
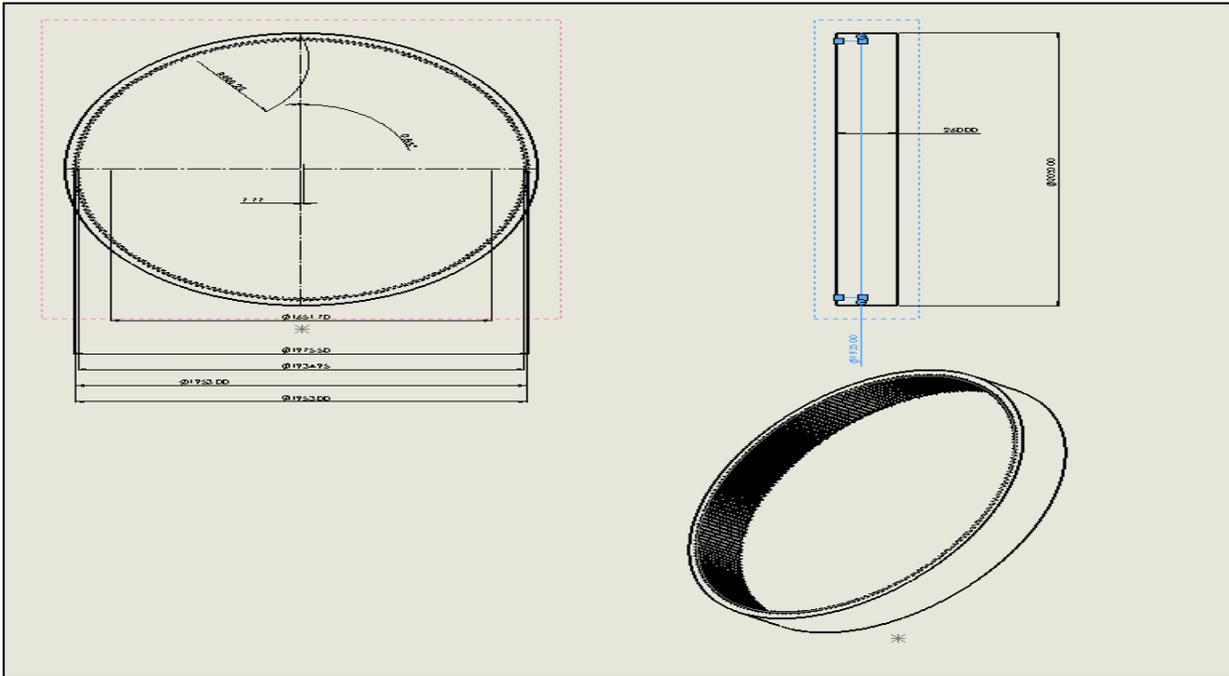
Ce projet nous a apporté beaucoup de connaissances sur le contrôle et le suivi des machines tournantes ; la connaissance de certains défauts susceptibles d'apparaître sur une machine tournante nous a permis de nous familiariser avec les outils de surveillance et de diagnostic tels que l'accéléromètre et le traitement de données avec son logiciel installé sur micro-ordinateur, ... Ça nous a aussi permis de travailler dans des conditions similaires à celle d'une entreprise

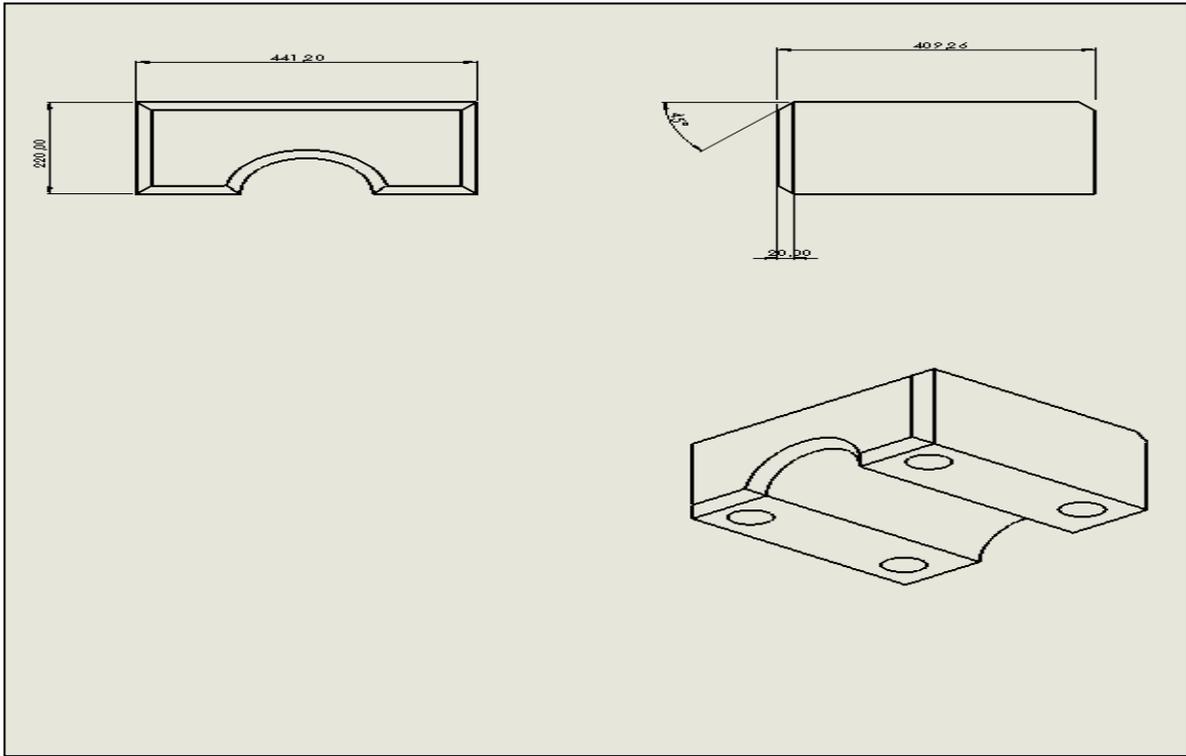
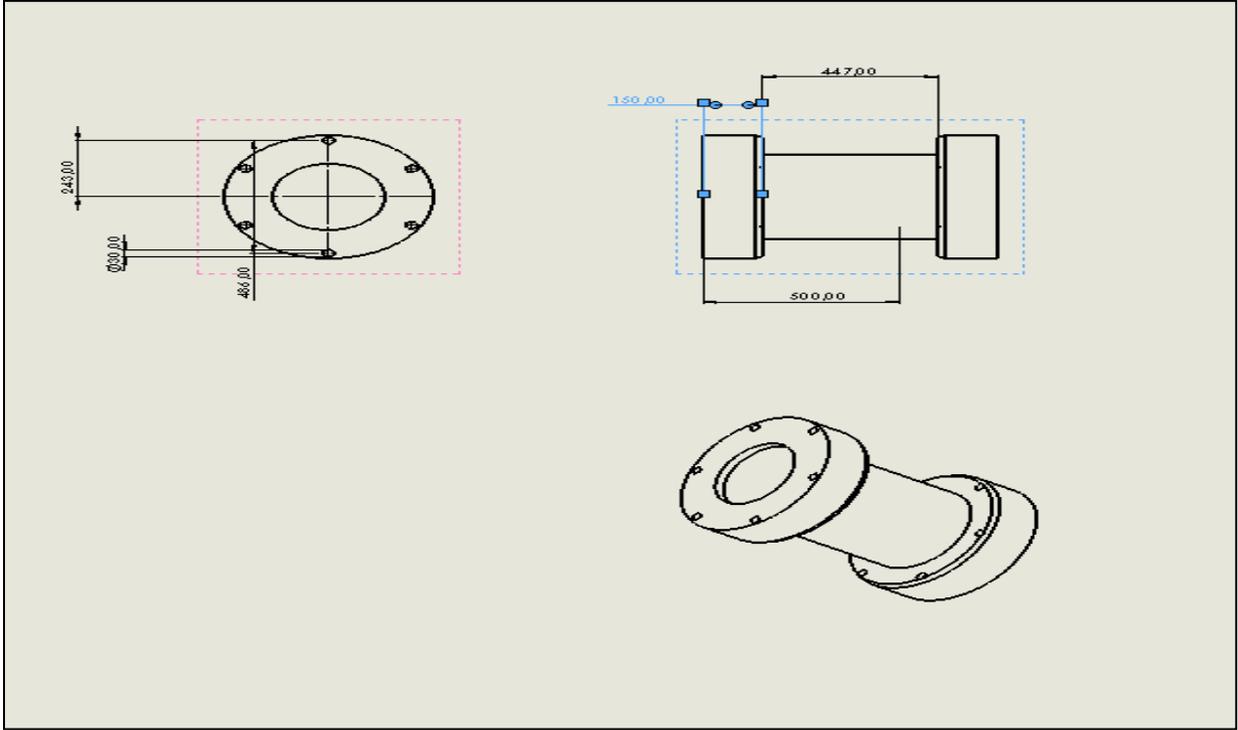
On a appliqué une analyse modale est souhaitée afin de déterminer la fréquence propre de l'arbre et de vérifier si celle-ci n'est pas égale ou proche à celle de la rotation.

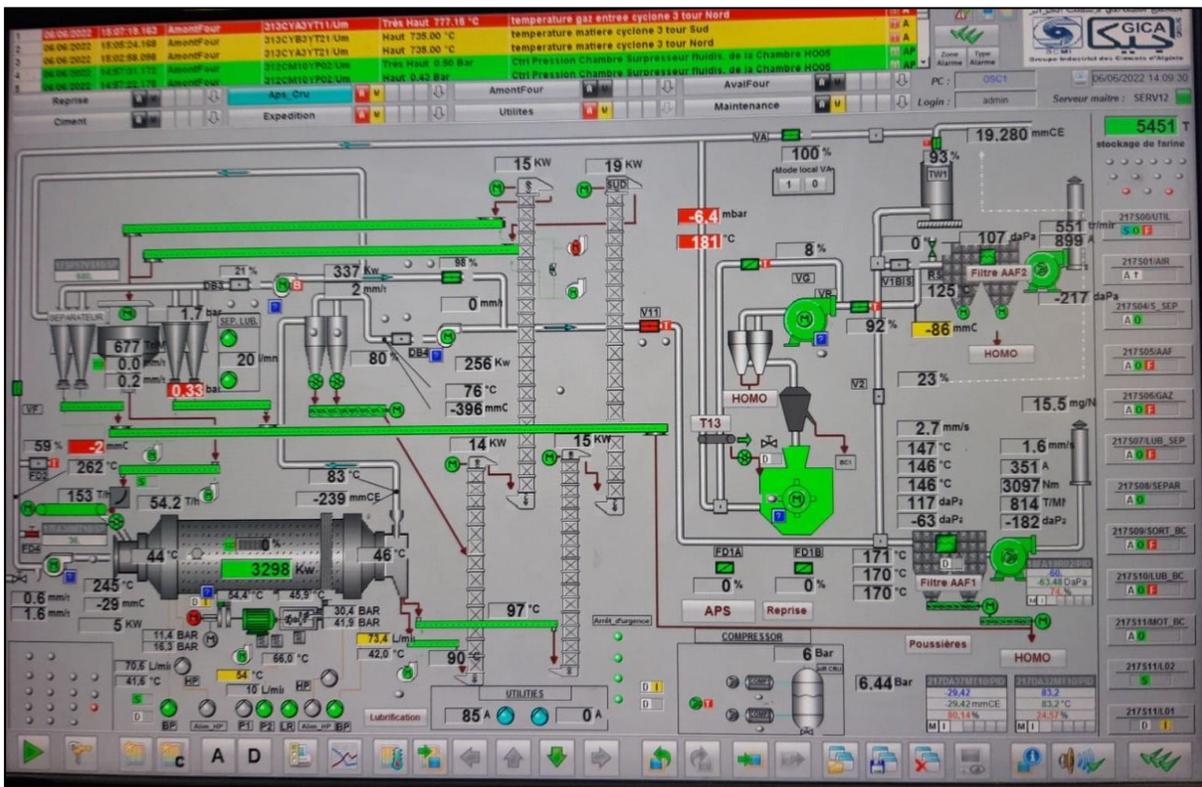
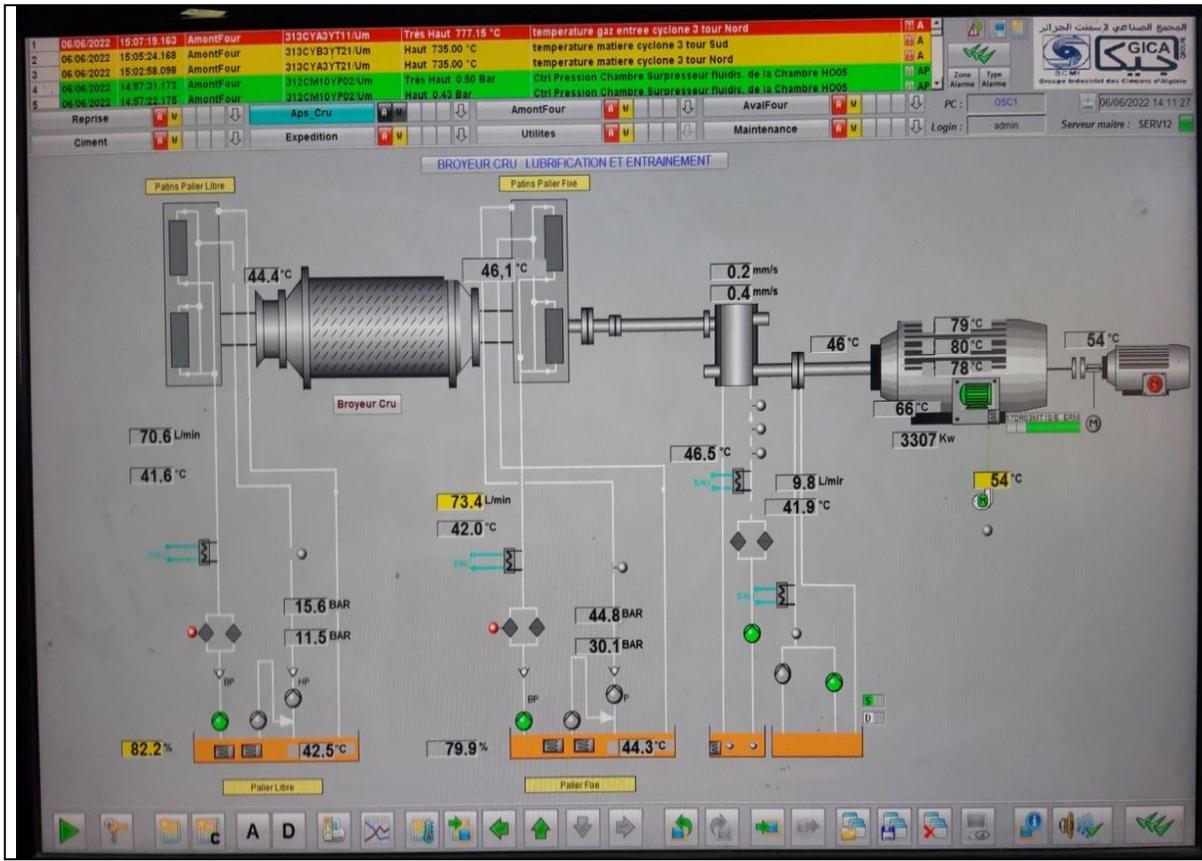
- [1] : Documentation de la cimenterie meftah + cahiers techniques de broyeurs
- [2] : service de maintenance Sonatrach de site Hassi Rmel
- [3] : [Jean] : Jean Heng « Pratique de la maintenance préventive ». DUNOD 2002.
- [4] : Bernard MECHIN, « Introduction aux méthodes de maintenance ». Technique de l'ingénieur MT 9 280
- [5] : Gilles DUCHEMIN, « Maintenance des machines et des moteurs ». Technique de l'ingénieur BM 4 188.
- [6] : François MONCHY, « Maintenance méthodes et organisations » DUNOD_ 2000.
- [7] : [CHIEMENTIN] : CHIEMENTIN Xavier thèse de doctorat en mécanique « Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants.
- [8] : [BM 5 145] : Technique de l'ingénieur « Analyse vibratoire des machines tournantes ». De mémoire magister 14 décembre 2011, Mr. Nabti Mohamed Taher.
- [9] : D. Khaled BELMADH, Technique of maintenance, 2ème édition, Université Pierre and Marie Curie- Paris VI_2006
- [10] : [Alain Boulenger, Christian Pachaud. Aide-mémoire « Surveillance des machines par analyse des vibrations ».]
- [11] : [Serge] : Serge Dos Santos « COURS DE TRAITEMENT DU SIGNAL » École Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire Année 2008-2009.
- [12] ... [Landolsi Foued. Cours de techniques de surveillance « Etude des principaux défauts ».]
- [13] [F. CHAMPAVIER . 01dB Analyse vibratoire des machines tournantes].
- [14] <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/3846> .

Annexe







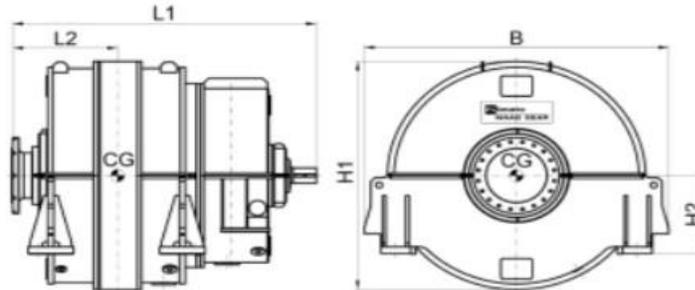


Gearbox Data

Order No.	60226
Keyword	LAFARGE MEFTAH
Gearbox type	CPU-30/B
Serial No.	60226/10

Customer / End user data

Contract no.:	17571
Numéro de contrat:	
Maag order no.:	60226
Numero de commande:	
Project:	MEFTAH
Projet:	



Dimensions and weight

Length over all	L1 = 3643 mm	Center of gravity CG	L2 = 1450 mm
Width over all	B = 3310 mm	Center to foot plate	H2 = 1065 mm
Height over all	H1 = 3120 mm	Weight	58'000 kg

Power and speed data

Input power	P = 4000 kW
Gear ratio	i = 50.47
Input speed	n1 = 742 min ⁻¹
Output speed	n2 = 14.7 min ⁻¹

Lubrication

Oil	Mineral oil
Viscosity	ISO VG-320 / FZG > 12
Required oil flow	280l/min

Temperature limits

Allowed ambient temperature	-5 to +50 °C	Allowed bearing temperature	75 °C
-----------------------------	--------------	-----------------------------	-------

Vibration limits

Allowed casing vibration (1 st stage)	4 mm/s
Allowed casing vibration (2 nd stage)	4 mm/s

Shaft displacement

Horizontal displacement of input shaft	0.77 mm (towards motor)
Vertical displacement of in- and output shafts	0.34 mm (towards ceiling)
Horizontal displacement of output shaft	0.38 mm (towards mill)

-	PaB-gh	2014-09-03	RoJ-gh	2014-09-03	
Revision	Issued by	Date	Checked by	Date	Description

Gearbox type:	Order No.	Keyword	Replaces
CPU 30/B	60226	LAFARGE MEFTAH	-
	Gearbox data sheet		60006835
			Language: en

Property of FLSmidth A/S. This document contains confidential and proprietary information of FLSmidth and may not be duplicated, disclosed or utilized without written consent from FLSmidth. © FLSmidth A/S. All rights reserved.