



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA1
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 2
EN GENIE MECANIQUE

Détection des défaillances par analyse vibratoire

Application sur le concasseur FCB (cimenterie de Meftah)

PROMOTEUR:

- Mr. Madani Fateh

REALISE PAR :

- Bourabia Abderahman

- Bouabdalah Omar

2020-2021

REMERCIEMENT

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 que nous a guidé dans le bon sens de notre vie qui nous a donner le courage, la volonté, et la force pour réaliser ce travaille

*Nous tenons remercier chaleureusement notre promoteur Mr : **MADANI FATAH** ; pour son soutien et ses conseils un grand mercier pour notre encadreur et s cheffe département Mr : **MEZIANE Mansour** et tout l'équipe de **BTC***

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 nous 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.

Ce projet est achevé avec l'aide d'ALLAH le tout puissant, Je dédie ce travail:

Aux êtres les plus chères, mes parents et mes chères grands parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

Á mes sœurs et mes cousins et cousines pour leurs encouragements et à tous les membres de ma famille.

Á mon camarade et mon binôme BOURABIA ABDERAHMAN

Enfin, à tous mes amis avec qui j'ai partagé beaucoup de moments inoubliables.

OMAR

*Ce travail est dédié à toutes les personnes que j'aime, qui ont
laissé un impact positif sur ma personnalité, grâce à vous je
suis là*

*Maman, papa, je pense que c'est une bonne occasion de te
dire combien je t'aime*

ABDERAHMANE

SOMMAIRE

Introduction générale	
Chapitre 1 : présentation de l'entreprise	
1. Introduction	2
2. présentation générale	2
2-1. Présentation	2
2-1-1. Localisation	3
2-1-2. Assiette de l'Usine	3
2-1-3. Historique	3
2-1-4. Organisation du Travail	4
2-1-5. Infrastructures	5
3. Etude descriptive de la chaine de fabrication	5
3-1. Définition	5
3-1-1. Les composants du ciment	5
3-2. Le processus de fabrication du ciment	6
3-2-1. Zone I : Carrière calcaire	7
3-2-2. Zone II	9
3-2-3. Zone III : Cuisson	11
3-2-4. Zone IV : Ciment	12
3-2-5. Zone V : Expédition	13
4. Conclusion	14
CHAPITRE 2 : LA MAINTENANCE	15
2-1. Introduction	16
2-2. Définition de la maintenance	16
2-3. Types de maintenance	16
2-3-1. La maintenance corrective	17

a) - Maintenance palliative.....	17
b) - Maintenance curative.....	17
2-3-2. La maintenance préventive.....	17
a) - Maintenance systématique.....	17
b) - Maintenance conditionnelle.....	18
c) - Maintenance prévisionnelle.....	18
1/ On Line.....	21
2/ Off Line.....	22
2-3-3. Niveaux de maintenance.....	22
2-4. Les techniques de surveillance.....	23
2-4-1- L'analyse vibratoire.....	24
2-4-2- L'analyse des l'huiles.....	24
2-4-3- Thermographie.....	25
2-4-4- L'analyse des mesures ultrasonores.....	25
2-4-5- Le Choix de l'outil de surveillance.....	25
2-5. Conclusion.....	27
Chapite 3 : ANALYSE VIBRATOIRE ET DEFERENTS TYPES DES DEFAUTS.....	28
1. Introduction.....	29
2. L'analyse vibratoire.....	29
3. Caractéristiques d'une vibration.....	30
3-1. Fréquence.....	30
3-2. Grandeurs.....	30
3-3. Unités.....	31
3-4. Amplitude.....	31
4. Nature d'une vibration.....	31
5. Les capteurs de vibration.....	32
5-1. Types et caractéristiques des capteurs.....	32
5-2. Les proximètres.....	33
5-3. Vélocimètres.....	33
5-4. Les accéléromètres.....	34
a. Principe.....	34

b. Réponse d'un accéléromètre	35
5-5. Emplacement	35
5-6. Consignes pour la fixation des capteurs	36
5-7. Modes de fixation	37
6. La chaîne de mesure	38
7. L'analyse spectrale	40
7-1. Généralisation	40
7-2. Définition d'un spectre	40
7-3. Représentation graphique d'un spectre	41
8. Origine des Vibrations	41
8-1. Le Balourd	42
8-1-1. Typologie du balourd	42
8-1-2. Ambiguïtés de diagnostic	43
8-2. Le Délignage	43
8-2-1. Typologie du délignage	43
8-2-2. Origines du délignage et ambiguïtés de diagnostic	44
8-3. Les chocs périodiques	44
8-3-1. Typologie des chocs périodiques	45
8-3-2. Ambiguïtés de diagnostic	45
8-4. Les Engrenages	45
8-4-1. Fréquence d'engrènement	46
8-4-2. Spectre typologique	46
8-4-3. Ambiguïtés de diagnostic	47
8-5. Les Roulements	47
8-5-1. Fréquences cinématiques des roulements	48
8-5-2. Les dégradations	49
a-Les dégradations localisées	50
b-Les dégradations généralisées	50
8-5-3. Le Facteur de Défaut Roulement	51

9. Conclusion	52
CHAPITRE 4: ETUDE D'UN CAS PRATIQUE	53
1. Présentation de l'atelier de concassage	54
2. Rôle de concasseur	54
3. Présentation du concasseur FCB	54
3-1. Caractéristiques de concasseur	55
3-2. La Commande de concasseur FCB	57
4. Etude expérimentale de concasseur FCB	59
4-1. Le but de travail	59
4-2. Matériels utilisés	59
a- Capteur de vibration utilisé : accéléromètre	59
b- Analyseur	60
c- Logiciel d'analyse	61
4-3. Normes.	62
4-4. Points de mesures du concasseur	64
4-5. Campagne de suivi vibratoire moi de juin 2020	64
4-5-1. Résultats D'analyse	67
4-6. CAMPAGNE DE SUIVI VIBRATOIRE MOI DE NOVEMBRE 2020.	68
4-6-1. Résultats D'analyse	71
Chapitre 5 : Conception et simulation de rotor de concasseur FCB	72
1. Introduction	73
2. Les propriétés de simulation	73
2-1. Le logiciel ANSYS.	73
2-3. Maillage.	75
3. Analyse modal stationnaire	75
4. Analyse modal rotationnelle.	78
5. les contraintes	80
Conclusion générale	81

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : la vue du SCMI.	2
Figure 1.2 : Localisation	3
Figure 1.3 : Réalisations de Ciment.	4
Figure 1.4 : Les composants du ciment	6
Figure 1.5 : Schéma du processus de fabrication du ciment.	6
Figure 1.6 : Schéma synoptique du processus de fabrication du ciment	7
Figure 1.7 : Carrière calcaire	7
Figure 1.8 : Extraction de la matière première	8
Figure 1.9 : Déchargement du calcaire dans le concasseur	8
Figure 1.10 : Concassage et transport	9
Figure 1.11 : Cuisson.	11
Figure 1.12 : Four rotatif	12
Figure 1.13 : Broyage ciment	13
Figure 1.14 : Expédition en sac ou vrac	13
Figure 1.15 : Expédition en vrac	14
Figure 1.16 : Expédition en sac.	14

CHAPITRE 2

Figure 2.1 Réparation après l'incident	17
Figure 2.2 Intervention à intervalles	18
Figure 2.3 Mesure à intervalles	18
Figure 2-4 : Les différentes stratégies de maintenance	19
Figure 2-5 : Algorithme du choix du type de maintenance.	21
Figure 2.6: Maintenance Online.	22
Figure 2.7 : Maintenance Offline	22

CHAPITRE 3

Figure 3-1 : Systèmes oscillants	29
Figure 3-2 : nature d'un vibration..	32
Figure 3-3 : Le proximètre et leur driver.	33
Figure 3-4 : proximètre monté sur un palier	33
Figure 3-5 : schéma fonctionnement de principe d'un vélocimètre	33
Figure 3-6 : schéma de principe d'un accéléromètre	34
Figure 3.7 : courbe de réponse d'un accéléromètre	35
Figure 3-8 : Fixation du capteur sur palier.	35
Figure 3-9 : Choix directionnel pour la prise de mesure	36
Figure 3-10 : Choix de l'emplacement de capteur.	36
Figure 3-11 : Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes.	37
Figure 3-12 : emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement.	37
Figure 3-13 : réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation . .	37
Figure 3-14 : la chaine de mesure analogique [BM 5 160]	39
Figure 3-15 : la chaine de mesure numérique [BM 5 160]	39
Figure 3-16 : Signal temporel et transformation	40
Figure 3-17 exemple de spectre	40
Figure 3-18 : Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire	41
Figure 3-19 : Balourd statique	42
Figure 3-20 : Balourd dynamique.	42
Figure 3-21 : spectre théorique d'un défaut de balourd.	42
Figure 3-22 : SPECTRE Théorique d'un défaut de balourd.	43
Figure 3-23 : défauts d'alignement d'arbres.	43
Figure 3-24 : spectre théorique d'un défaut d'alignement	44
Figure 3-25 : spectre théorique d'un défaut d'alignement	44
Figure 3-26 : spectre théorique d'un défaut DE chocs	45
Figure 3-27 : Différents types d'engrenage	46
Figure 3-28 : spectre théorique d'engrenage.	46
Figure 3-29 : spectre théorique de L'usure générale de la denture	47

Figure 3-30 : spectre théorique de Jeu de denture insuffisant	47
Figure 3-31 : spectre théorique de Jeu de denture excessif	47
Figure 3-32 : spectre théorique d'une dent détériorée sur un pignon.	48
Figure 3-33 : les éléments d'un roulement	48
Figure 3-34 : les démentions d'un roulement.	49
Figure 3-35 : Spectre de chocs sur bague externe en détection d'enveloppe	50
Figure 3-36 : Spectre de dégradation généralisée	51

CHAPITRE 4

Figure 4-1 : modèle en 3D de concasseur FCB.	55
Figure 4.2 : vue de coup en 3D de concasseur FCB.	56
Figure 4-3 : vue de coup en 2D de concasseur FCB	56
Figure 4.4 : Partie commande de concasseur FCB.	57
Figure 4.5 : Accéléromètre utilisé.	59
Figure 4-6 : analyseur ONEPRODE MVP-200.	60
Figure 4-7 : Image du logiciel ONEPROD NEST	61
Figure 4-8 : Schéma cinématique et points de mesures de la machine.	64
Figure 4.9 : courbe de tendance sur les deux paliers Moteur «N°1. N°2 », illustrant une évolution remarquable des niveaux en vitesse « mm/s »	65
Figure 4.10 : courbe de tendance sur le palier Rotor «N°7 », illustrant une évolution remarquable du niveau vitesse « mm/s ».	65
Figure 4.11 : image spectrale a la gamme de [0 – 100hz] , sur le palier Moteur « N°02RH », en position radiale horizontale,	66
illustrant un balourd sur le Moteur de « 20mm/s »	
Figure 4.12 : image spectrale a la gamme de [0 – 200hz] , sur le palier du rotor « N°07RH », en position oblique, illustrant un défaut de roulement.	66
Figure 4. 13 : courbe de tendance sur les deux paliers Moteur «N°1. N°2 », illustrant une amélioration remarquable des niveaux en vitesse « mm/s »	69
Figure 4. 14 courbe de tendance sur le palier Rotor en position oblique «N°7RO », illustrant l'amélioration du niveau vitesse « mm/s ».	69
Figure 4. 15 spectrale a la gamme de [0 – 200hz] , sur le palier Moteur « N°02RH », en position radiale horizontale.	70

Figure 4. 16 image spectrale superposé, sur le palier du rotor « N°07RO », en position oblique,. . 70

CHAPITRE 5

Figure 5.1 : arbre et volant d’inertie. 73

Figure 5.2 : Le graphique de la fréquence spécifique de chaque mode calculé. 76

Figure 5.3: Mode 1 54,026 Hz. 77

Figure 5.4: Mode 2 69,716 Hz. 77

Figure 5.5: Mode 3 69,971 Hz. 77

Figure 5.6: Mode 4 182,37 Hz 78

Figure 5.7: Mode 5 182,58 Hz 78

Figure 5.8: Diagramme de Campbell 79

Figure 5.9: déformation élastique équivalente 81

Figure 5.10: contrainte de cisaillement 82

Figure 5.11: arbre cisailé de concasseur FCB 82

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2

Tableau 2-1 : Différentes formes de maintenance	20
Tableau 2.2 : les quatre niveaux de maintenance	23
Tableau 2-3 : Choix de l'outil de surveillance	26
Tableau 2-4 : Classement des défauts suivant les méthodes de détection	27

CHAPITRE 3

Tableau 3-1: Unités de mesure des vibrations.	31
Tableau 3-2: équations de fréquence cinématique de roulement	49
Tableau 3-3 : équations de l'indicateur	51

CHAPITRE 4

Tableau 4-1 : tableau de désignation des éléments de concasseur FCB.	57
Tableau 4-2 : l'élément parti commande de concasseur FCB.	58
Tableau 4-3 : Tableau des critères de vibration	62
Tableau 4-4 : Tableau récapitulatif des niveaux vibratoires en vitesse « mm/s » et en accélération g.	64
Tableau 4-5 : Tableau récapitulatif des niveaux vibratoires en vitesse « mm/s » et en accélération g.	68

Chapitre 5

Tableau 5.1 : les matériaux	74
Tableau 5.3 : les paramètres de maillage	75
Tableau 5.3 : résultat de simulation	76
Tableau 5.4: les paramètre de diagramme de Campbell.	79
Tableau 5.5 :: résultats d'analyses modale rotationnelle	80
Tableau 5.6 : les contraintes	80

Introduction générale

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. Ces signaux sont captés par des accéléromètres piézoélectriques placés sur les paliers de la machine, le plus proche possible de la source du défaut, et subissent une série de prétraitements telles que: l'analyse spectrale,

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 premier chapitre Une description générale de Société des Ciments de la Mitidja
- Le deuxième chapitre est consacré à la mise en situation de la maintenance préventive, sa position par rapport à d'autres formes de maintenance Une présentation générale des techniques de surveillance pratiquées dans la maintenance préventive .
- Le troisième chapitre introduction aux vibrations mécaniques, nature et paramètres caractéristiques. le matériel d'acquisition, ses caractéristiques techniques et les outils d'analyse et de traitement des signaux et les signatures vibratoires, de la majorité des défauts mécaniques, permettant de faire le diagnostic des machines.
- Le quatrième chapitre aborde la partie expérimentale. Nous avons effectué des diagnostics vibratoires sur le concasseur FCB , révélant la présence de plusieurs défaillances mécaniques .
- le cinquième chapitre Une application numérique par logiciel ANSYS sur l'arbre de rotor et la volant d'inertie de concasseur FCB .

Chapitre 1 : présentation de l'entreprise

1. 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.

2. présentation générale :

2-1. 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.

L'usine possède une seule ligne de production, le procédé de fabrication est la voie sèche.

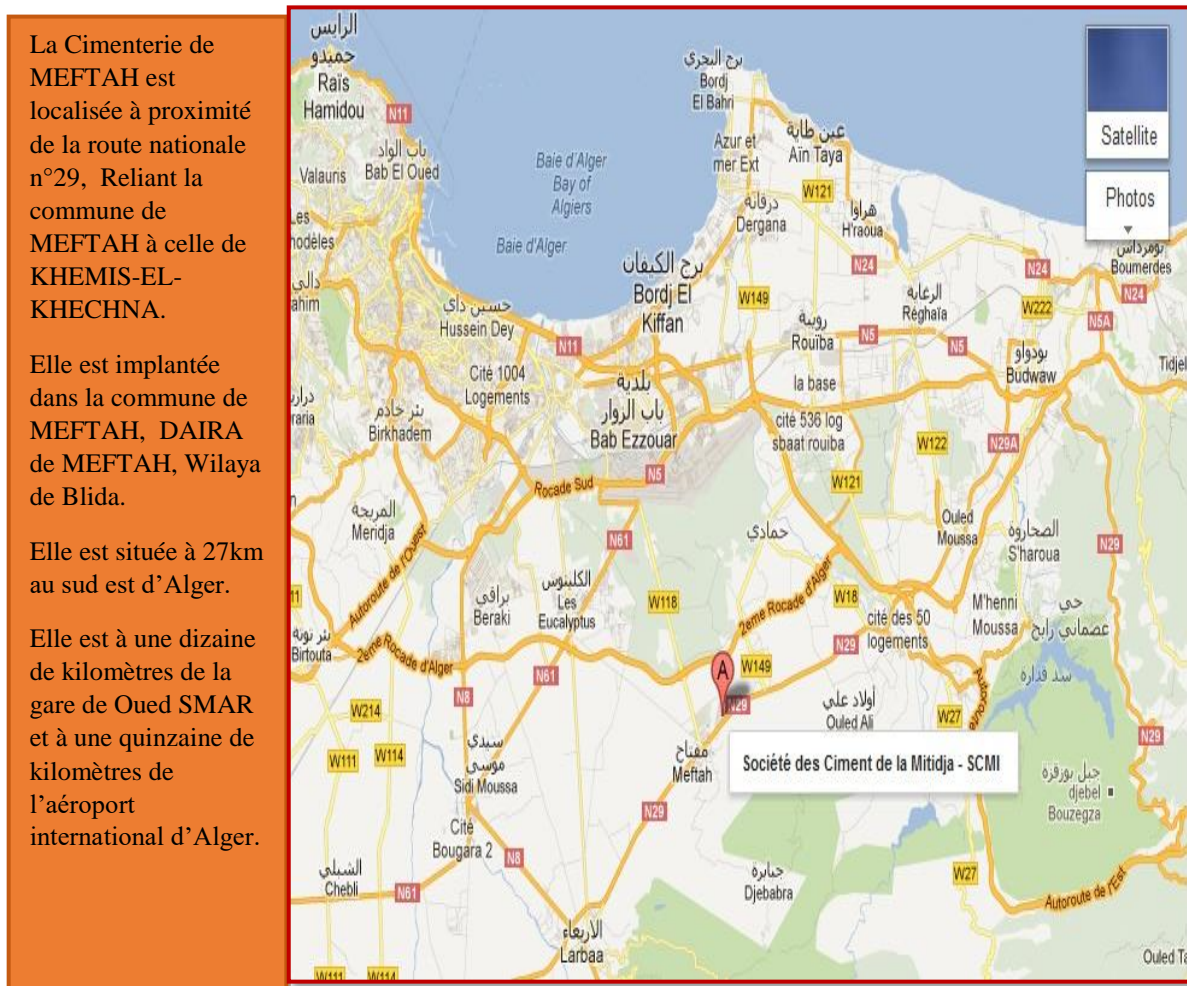


Figure 1.1 : la vue du SCMI.

- **Raison Sociale** : Société des Ciments de la Mitidja par Abréviation S.C.M.I.
- **Activités** : production et commercialisation des ciments ordinaires, spéciaux et tous autres matériaux de construction.

- **Forme Juridique:** Société Par Actions (S.P.A.)
- **Capital Social:** 1 400 000 000DA, détenu à 65% par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (G.I.C.A.) et à 35% par le Groupe LAFARGE Financière.
- **Effectif au 30 juin 2016 :** 400 employés.

2-1-1. 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, DAIRA de MEFTAH, Wilaya de Blida.

Elle est située à 27km au sud est d'Alger.

Elle est à une dizaine de kilomètres de la gare de Oued SMAR et à une quinzaine de kilomètres de l'aéroport international d'Alger.

Figure 1.2 : Localisation.

2-1-2. Assiette de l'Usine :

La superficie de l'usine est de 356 811m², dont :

- Bâti: 72 708 m²
- Bâtiments techniques: 42 457 m²
- Autres bâtiments: 22 810 m²

2-1-3. 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.

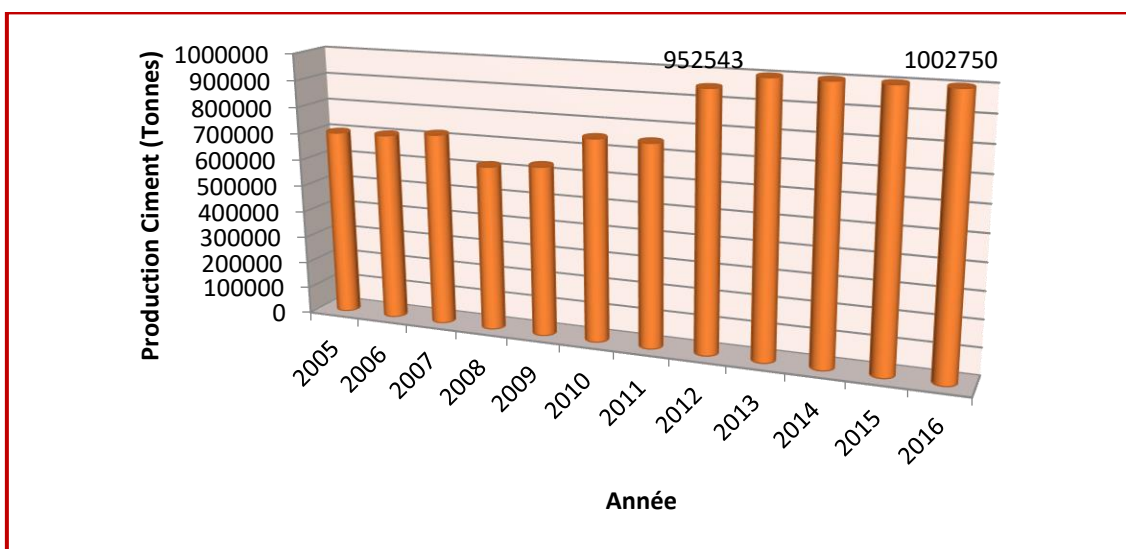


Figure 1.3 : Réalisations de Ciment.

2-1-4.Organisation du Travail :

- Matières Premières :
 - Cette structure fonctionne en deux postes par jour, du samedi au mercredi (de 6h:00 à 13h:00 et de 13h:00 à 21h:00) et un poste le jeudi (de 6h:00 à 13h:30)
- Ligne de Fabrication :
 - Les ateliers broyage cru et le broyage ciment fonctionnent 18 heures par jour, l'atelier cuisson fonctionne 24h/24h.
 - Ces ateliers sont organisés en deux postes de 12 heures, 7/7 jours.
- Expédition :
 - Cette structure fonctionne en heures normales, de 08h:00 à 16h:00

2-1-5. Infrastructures :**Eau :**

D'un débit de 16 à 20 L/S

L'alimentation assurée par quatre forages d'un débit de 16 à 20 L/S chacun.

- Deux à l'intérieur de l'usine.
- Deux à HNAÏCHIA (à environ 3Km).

La consommation journalière pour le processus est d'environ 25m³/H soit 600m³/Jour.

Energie :

- Electricité :

L'alimentation en énergie électrique est assurée par deux lignes de 60KV et de puissance de 25 000KVA, l'une venant de l'ARBAA et l'autre d'Alger est.

La tension de sortie est de 5.5 KV.

En cas de coupure d'électricité, l'usine possède un groupe électrogène de 1500KVA, utilisé uniquement pour le vireur du four et l'éclairage du bâtiment de commande et pour ventilation de soufflage du refroidisseur.

- Gaz :
 - Alimentée par station SONELGAZ.
 - Pression d'arrivée gaz de 5 bars.

3. Etude descriptive de la chaine de fabrication :**3-1. Définition :**

Ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile, puis broyage. La plupart des ciments sont à base de clinker et d'ajouts. Le ciment s'emploie le plus souvent sous forme de poudre : mélangé avec de l'eau, il fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats (sable ou graviers), pour constituer de véritables roches artificielles, les bétons ou les mortiers.

3-1-1. Les composants du ciment :

Le ciment est fabriqué généralement à partir d'un mélange de :

- Calcaire (CaCO₃).
- Argile (SiO₂ – Al₂O₃).
- Sable.
- Fer.



Figure 1.4 : Les composants 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.

3-2. Le processus de fabrication du ciment :

La figure (1.5) représente un schéma qui résume les différentes étapes du processus de fabrication du ciment.

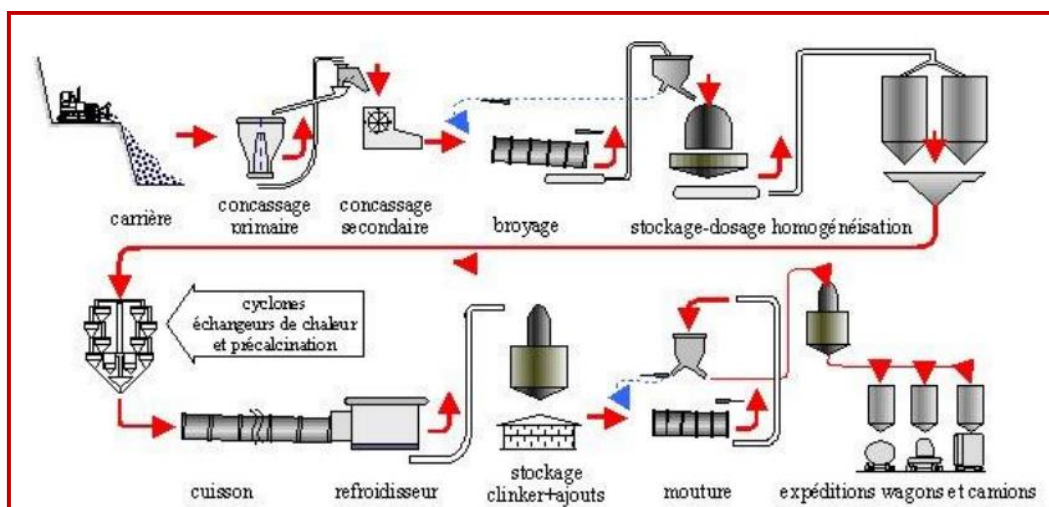


Figure 1.5 : Schéma du processus de fabrication du ciment.

Pour simplifier ce schéma, on peut voir sur la figure (1.6) le schéma synoptique du processus de fabrication du ciment au sein de la cimenterie de MEFTAH.

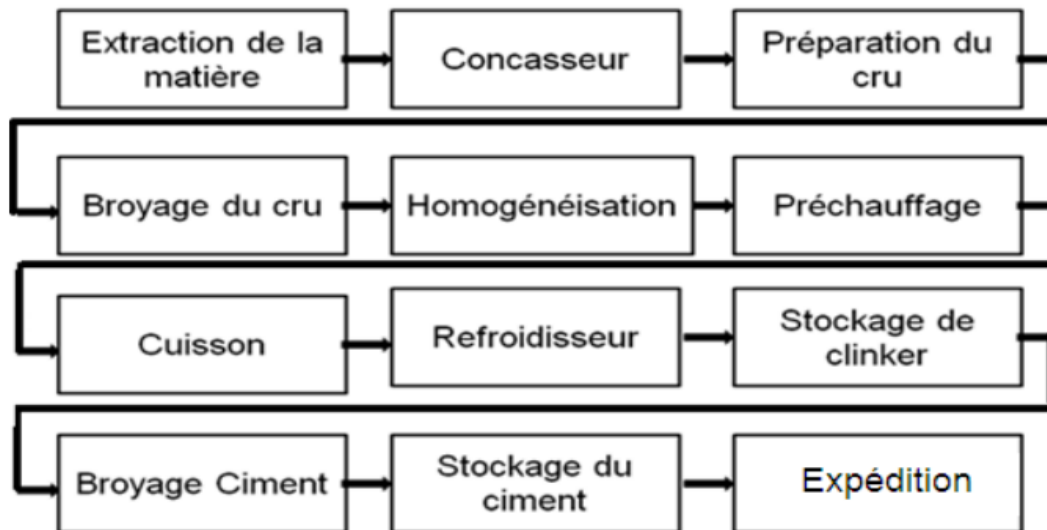


Figure 1.6 : Schéma synoptique du processus de fabrication du ciment

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.

3-2-1. Zone I : Carrière calcaire :



Figure 1.7 : Carrière calcaire.

Dans la Zone I nous avons :

- **L'extraction de la matière :** Les matières premières sont extraites de la carrière Généralement à ciel ouvert :

- Le calcaire est extrait par abattage en grande quantité au moyen d'explosifs
- L'argile est extraite à l'aide des pelles mécanique, elle est mélangée d'argile brune et d'argile rouge.

- **Le chargement :** est réalisé en utilisant des engins, comme l'illustre la figure (1.8).

Il existe deux types d'engins:

Le rôle du premier bulldozer (mini-chargeuse) est de rassembler le calcaire.

Le rôle du deuxième (chargeuse) est de charger le calcaire dans les camions (dumper).

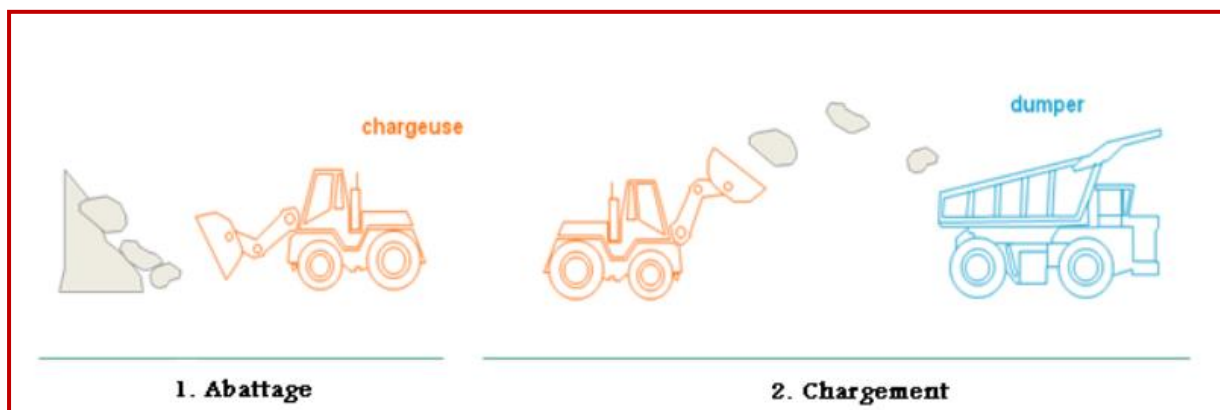


Figure 1.8 : Extraction de la matière première.

- **Le transport :** Les camions transportent le calcaire vers les concasseurs. Pour le décharger dans la chambre de concassage figure (I.9).



Figure 1.9 : Déchargement du calcaire dans le concasseur.

- **Le concassage :** Le concassage est une opération destinée à la réduction des blocs de calcaires qui sont obtenus pendant l'extraction figure (1.8). Le calcaire est acheminé vers le concasseur avec ATM (Alimentation Tablier Métallique).

On trouve deux concasseurs FCB 450T/H et KHD 1000 T/H. Le concassage est réalisé par un concasseur à battoirs qui est placé près de la carrière. Ce concasseur est constitué de deux rotors, primaire et secondaire.

- Il comporte aussi une chaudière pour chauffer les écrans de chocs et les parois du concasseur afin d'éviter le colmatage. Les tapis T0, T1, T2, T2 bis, transportent le calcaire vers le hall de stockage calcaire dont la capacité est de 60 000 T.

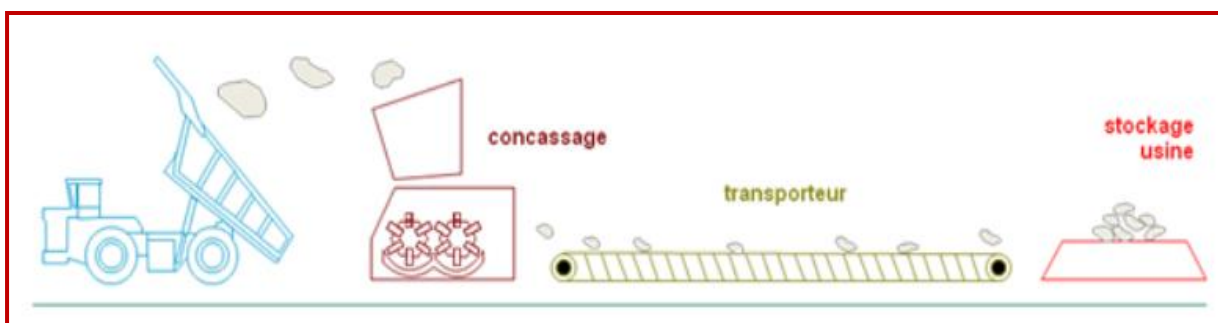


Figure 1.10 : Concassage et transport.

3-2-2. Zone II :

Cru :

L'extraction des matières premières vierges (comme le calcaire et l'argile) se fait à partir de la carrière à ciel ouvert. Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa progression. Ces étapes sont :

- **Préparation de la matière :** On utilise deux constituants en général pour la préparation du cru qui sont le calcaire, et l'argile. Après le concassage de ces deux constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm. Une prise d'échantillon sera réalisée pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition. Les constituants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couverts puis, ce mélange est stocké dans un hall de pré homogénéisation. Le stockeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise. Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru. Cette correction se fait pour ajouter du calcaire, du minerai de fer et du sable. Après correction du cru, le mélange est acheminé à l'aide de transporteurs vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm.

- **Hall calcaire :** Le gratteur portique (à palette) sert à gratter le calcaire et se déplace en translation de tas en tas et jettent la matière sur le tapis 2MK 03 01 pour le transporter à la trémie calcaire.
- **Hall ajout :** Nous avons deux gratteurs semi-portique (à palette) qui servent à gratter les ajouts (argile, sable, fer).

Il déverse les produits sur les bandes transporteuses jusqu'aux trémies. Il existe quatre (04) trémies (calcaire, fer, argile, sable). Le dosage des différents constituants du ciment sont comme suit :

- Calcaire 80%
- Argile 17%
- Sable 2%
- Fer 1%

Les ajouts sont acheminés par le transporteur T13 au broyeur à marteau.

- **Le broyeur à marteau :** Il sert à concasser la matière.
- **L'aspiration :** Aspiration de la matière et les gaz chauds par le ventilateur de tirage d'une puissance de 1200 KW.
- **Séparateur statique :** Le séparateur statique sépare la granulométrie (grosse particules et fines particules).
 - Les grosses particules passent vers les broyeurs à boulets.
 - Les fines particules partent vers le stockage (silos d'homogénéisation).
- **Le broyeur à boulets :** Tous les rejets du séparateur vont passer pour être broyés dans les deux compartiments du broyeur.
- **Elévateur à godets :** Il transporte le produit vers le séparateur dynamique. Le produit tombe sur un plateau qui tourne à vitesse continue. Les grosses particules tombent sur l'aéroglesseur (rejet) et retournent au broyeur pour être broyé de nouveau. Les petites particules vont vers les silos de stockage.
- **L'homogénéisation :** Le produit sera mélangé dans les silos H1, H2 pour être prêt au stockage. La farine crue expédiée par l'air lift est dégagée dans la boîte de récupération. La capacité de stockage de chaque silos est de 10 000T. Chaque silos est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four. Il est donc possible de fonctionner avec un ou deux silos. Par ces étapes nous avons définies le cheminement des matières premières dans la zone cru. Le mélange est acheminé vers le four afin de permettre leurs cuissons.

3-2-3. Zone III : Cuisson :

La ligne de cuisson figure (1.11) est constituée :

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

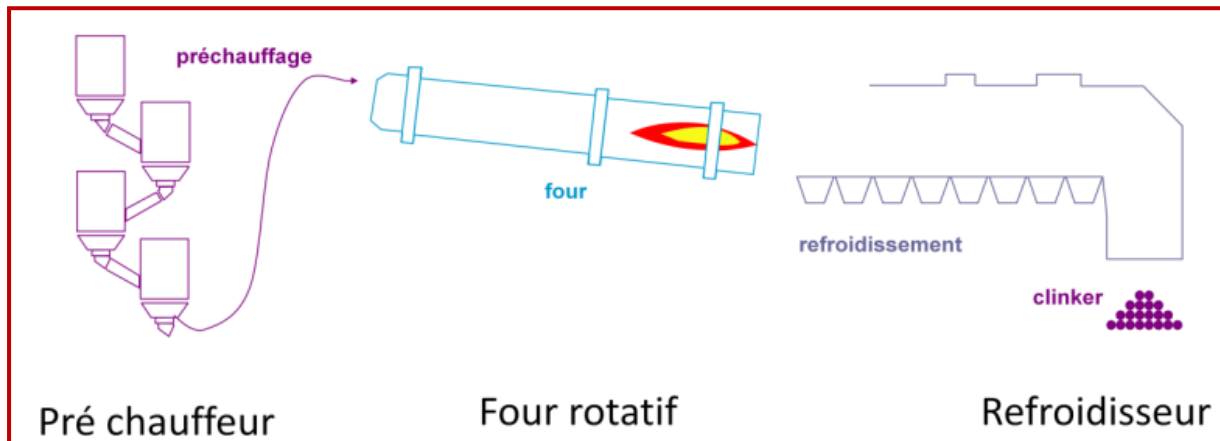


Figure 1.11 : Cuisson.

- **Préchauffeur ou cyclones** : Les gazes réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau. C'est un échangeur à contre courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur de gaz sortant du four qui est environ égale à 100° C. Du fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gazes de combustions et le mélange de la carrière.
- **Four rotatif** : Le four est constitué d'une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure. La figure (I.12) montre un four rotatif.



Figure 1.12 : Four rotatif.

- **Refroidisseur :** Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement.

3-2-4. 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 :** Le gypse et le tuf sont transportés vers la trémie de réception par des camions. Le gypse sera transporté sur le tapis T 19 qui déverse sur T 20. À l'aide d'un élévateur gypse, ce dernier sera stocké dans le silo de stockage gypse d'une capacité de 5000 T (silo spécial gypse). Les ajouts et gypse seront transportés du T 20 vers le tapis AMOUND et vers l'élévateur à godet qui alimente la chaîne TKF2 pour remplir la trémie tuf plus gypse.
- **Remplissage par T 16 :** Le remplissage se fait soit directement de la zone cuisson à partir des chaînes transporteuses qui versent la matière (clinker) dans une goulotte, qui à son tour le verse sur le T16. Ce remplissage peut aussi se faire par des silos de stockages. En effet, chaque silo a trois bouches, deux bouches manuelles et une motorisée. À travers ces silos la matière est versée sur T 16 qui l'achemine vers l'élévateur à godets et est envoyé vers la chaîne TKF1 pour remplir les trémies (clinker, gypse).

Broyages ciment : Après le dosage des matières (Clinker 80%, Gypse 5%, Tuf 15%). Elles sont transportées sur un tapis vers le broyeur ciment BK1-BK2 pour le broyage figure (1.13). La matière broyée sera transportée par élévateur à godets sortie broyeur, puis elle sera déversée dans un séparateur dynamique. Les rejets seront transportés par aéroglisseur

rejets vers l'entrée broyeur pour le ré-broyage. Le produit fini (ciment) sera acheminé par aéroglisseur principal vers les silos de stockage à l'aide des élévateurs à godets sur l'air lift.

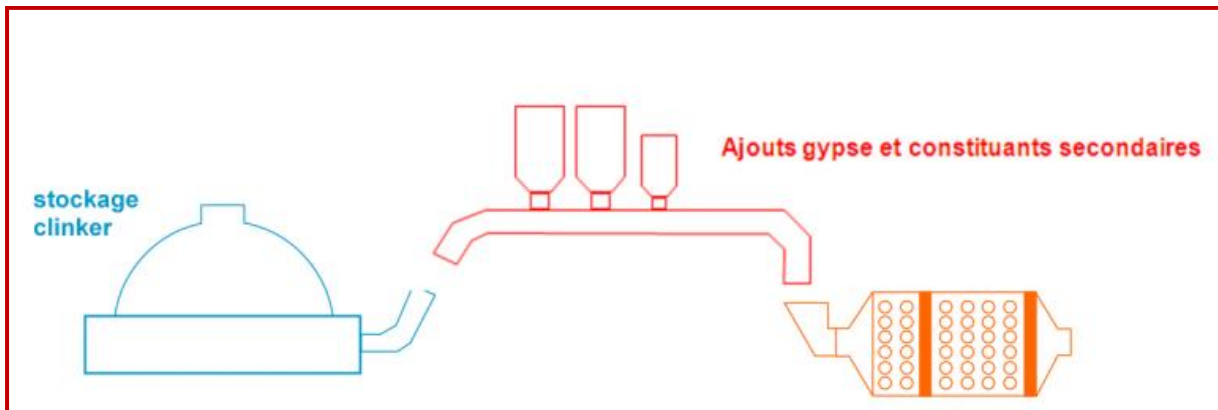


Figure 1.13 : Broyage ciment.

3-2-5. Zone V : Expédition :

Le ciment est stocké dans huit silos avec une capacité de 500T chacun, L'expédition du ciment se fait en sac ou en vrac.

Elle est réalisée par quatre ensacheuses avec un débit de 90 T/h. Chacune possède huit becs pour le remplissage des sacs. Les sacs de 50 kg sont chargés sur des camions à bennes.

Expédition en vrac : Le remplissage se fait par un flexible branché au font d'une trémie et qui est dirigé par l'opérateur pour le mettre à l'intérieur de la bouche de cocotte des camions pour les remplir. La figure 1-14 résume la partie expédition.

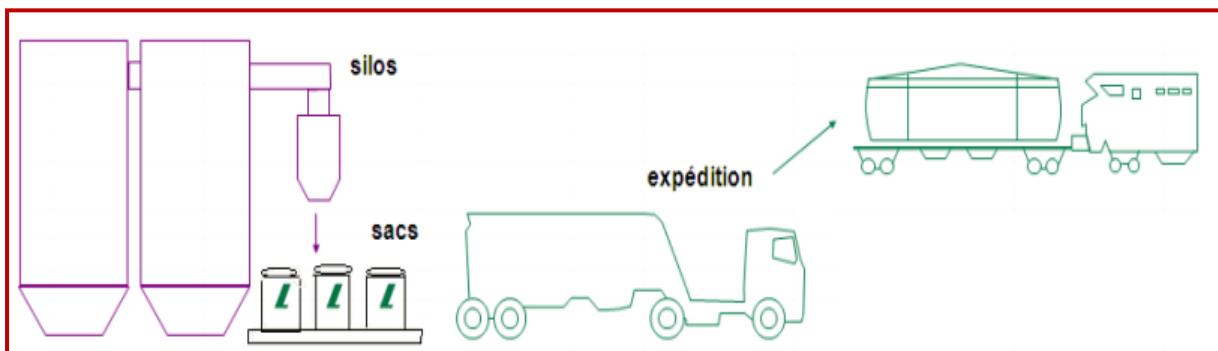


Figure 1.14 : Expédition en sac ou vrac



Figure 1.15 : Expédition en vrac.



Figure 1.16 : Expédition en sac.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons décrit le processus de fabrication du ciment qu'on a pu voir au sein de la cimenterie de MEFTAHA.

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 cru . 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.

CHAPITRE 2: LA MAINTENANCE

2-1. Introduction

Comme toute activité industrielle, la maintenance évolue. Elle doit s'adapter aux contraintes de production et de service, elle bénéficie des développements technologiques et elle doit être productive. Et cette activité a fourni le moyen de réduire ou d'éliminer les réparations inutiles, d'empêcher les pannes catastrophiques des machines, et de réduire l'impact négatif de l'opération de maintenance sur le rendement des entreprises et induit des politiques de maintenance adaptées en fonction des besoins.

2-2. Définition de la maintenance :

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme étant : « l'ensemble de toutes les actions techniques administratives et de gestion, durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise »

Cette définition appelle plusieurs remarques.

- Par « ensemble de toutes les actions », elle nous précise que la maintenance ne se limite pas aux seules interventions d'entretien, mais se doit d'englober aussi toutes les opérations de conduite et de surveillance pendant la marche. Par extension, les opérations de gestion des pièces de rechange, du personnel et des interventions font elles aussi partie de la maintenance.

2-3. Types de maintenance :

Les stratégies de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories :

- la maintenance corrective
- la maintenance préventive.

La maintenance corrective est la maintenance qui intervient suite à la défaillance du système alors que la maintenance préventive est réalisée lorsque le système est encore en fonctionnement. Le recours à l'une ou à l'autre de ces stratégies diffère suivant l'élément considéré mais aussi le type de structure, la politique d'exploitation et de suivi, les coûts, la disponibilité de l'information, etc.

2-3-1. La maintenance corrective : [2], [1]

La maintenance corrective est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction, elle a alors pour but de le remettre en état de marche. La maintenance corrective peut être :

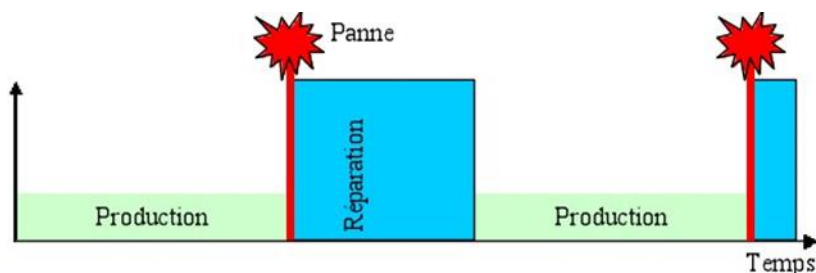


Figure 2.1 Réparation après l'incident.

a) - **Maintenance palliative** : des réparations ou des remises en état à caractère provisoire sont effectuées.

b) - **Maintenance curative** : des réparations, des modifications ou des remises en état à caractère permanent sont effectuées.

Cette maintenance est utilisée lorsque l'indisponibilité du système n'a pas de conséquences majeures ou quand les contraintes de sécurité sont faibles.

2-3-2. La maintenance préventive : [2], [3].

La maintenance préventive a pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Par ailleurs, une maintenance préventive est intéressante, en considérant le coût comme critère d'évaluation, si les coûts induits par la perte de performance sont élevés et si les coûts de réparation et d'inspection sont relativement faibles par rapport aux premiers. La maintenance préventive peut être systématique, conditionnelle ou prévisionnelle.

a) - **Maintenance systématique** :

Lorsque la maintenance préventive est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de maintenance systématique. L'opération de maintenance est effectuée conformément à un échéancier, un calendrier déterminé a priori. Aucune intervention n'a lieu avant l'échéance prédéterminée. L'optimisation d'une maintenance préventive systématique consiste à déterminer au mieux la périodicité des opérations de maintenance sur la base du temps, du nombre de cycles de fonctionnement, du nombre de pièces produites, etc.

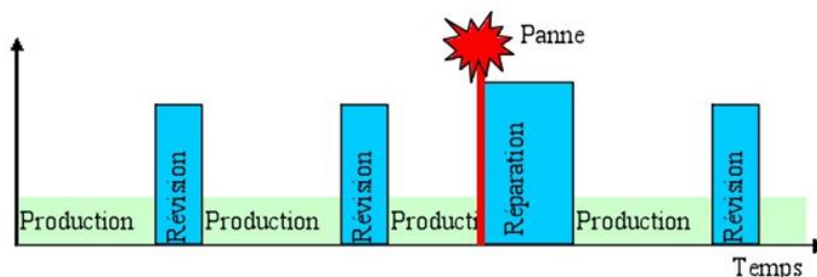


Figure 2.2 Intervention à intervalles

b) - Maintenance conditionnelle :

Lorsque l'opération de maintenance préventive est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation ou de la baisse de performance d'une entité, on parle de maintenance conditionnelle. Les paramètres significatifs de la dégradation peuvent être soit des mesures de caractéristiques physiques du système (épaisseur d'un matériau, degré d'érosion, température, pression, ...), soit des informations sur la durée de vie résiduelle. La planification des interventions repose sur l'existence et la détermination de seuils critiques pour ces paramètres de dégradation. On parle alors de seuils de décision.

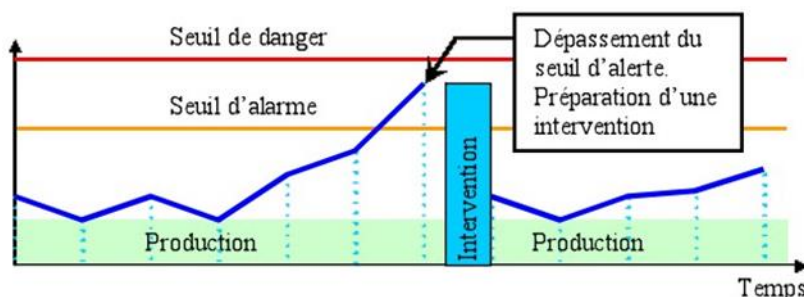


Figure 2.3 Mesure à intervalles

c) - Maintenance prévisionnelle :

Lorsque la maintenance préventive est effectuée sur la base de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste avant l'observation de l'événement redouté, on parle de maintenance prévisionnelle. Une maintenance prévisionnelle peut prendre en compte un âge du matériel qui n'est pas forcément calendaire mais par exemple le temps de fonctionnement mesuré depuis la dernière inspection. Dans le milieu industriel, en général, une maintenance mixte est appliquée aux systèmes. En effet, la maintenance préventive est destinée à réduire la probabilité de défaillance mais il subsiste une part de maintenance corrective incompressible.

Dans la figure 2-4, nous présentons les différentes stratégies suivant le type de maintenance étudiée. Alors que la mise en place d'opérations correctives ne dépend que de l'occurrence d'une panne, les maintenances préventives peuvent être programmées en fonction de différents paramètres.

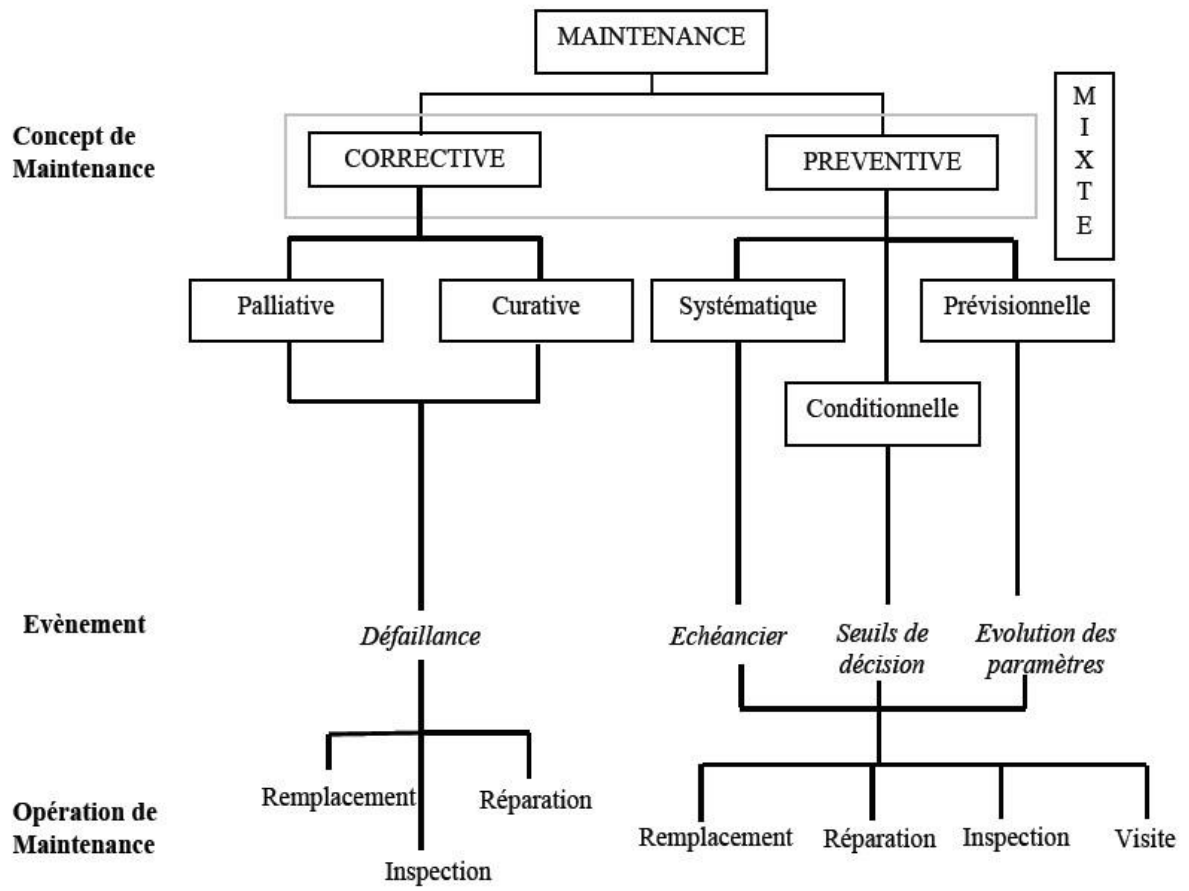


Figure 2-4 : Les différentes stratégies de maintenance. [6].

Type de méthode	Corrective	Systématique	Conditionnelle
Condition d'intervention	Fonctionnement jusqu'à la rupture	Basée sur l'estimation de la durée de vie moyenne du composant	Intervention conditionnée par la dérive d'un paramètre significatif
Aide au diagnostic	Les outils utilisés ne servent qu'à déterminer la cause de la panne	Ajuster l'échéancier en fonction des états d'usure constaté	Analyse de l'évolution des paramètres de fonctionnement et diagnostic sur l'origine du défaut.
Applications de la méthode	Pannes acceptables et imprévisibles	Graissage, petites pièces ou dans le cas d'impossibilité d'obtenir des mesures fiables	Machine stratégique, à problèmes et risque de panne dangereuse.
Durée de vie d'un organe	Rupture	Remplacement	Détection de défaut, analyse de tendance et réparation programmée
Coûts	Coûte chère en perte de production et en sécurité	Coûte chère en matériel	Optimise les coûts des matériels au plus près de la rupture et augmente la productivité par programmation des arrêts nécessaires

Tableau 2-1 : Différentes formes de maintenance.

Il est donc nécessaire de considérer des stratégies qui combinent les deux : maintenance corrective et maintenance préventive.

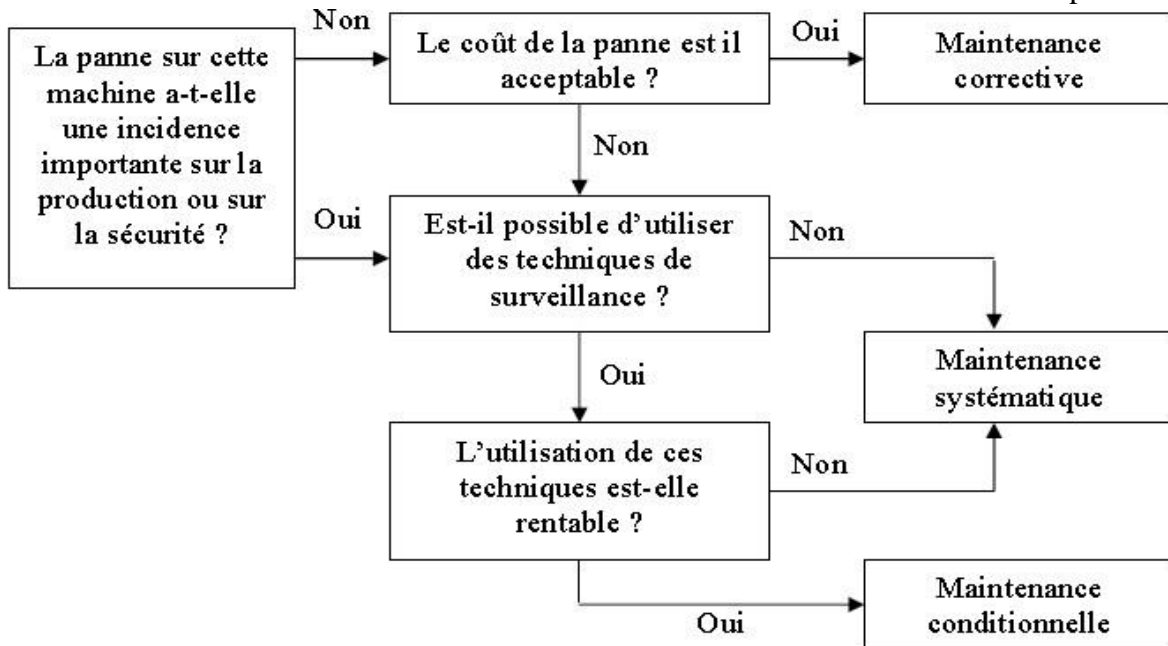


Figure 2-5 : Algorithme du choix du type de maintenance. [1]

Il existe deux modes de maintenance préventive conditionnelle [7]:

1/ On Line

C'est un mode de maintenance préventive conditionnelle , conçu pour faire de la Surveillance installée une salle de control pour permettre l'arrêt automatique des machines. Cette méthode coûte cher, elle est utilisée pour les turbomachines et pour les machines coûteuses en général.

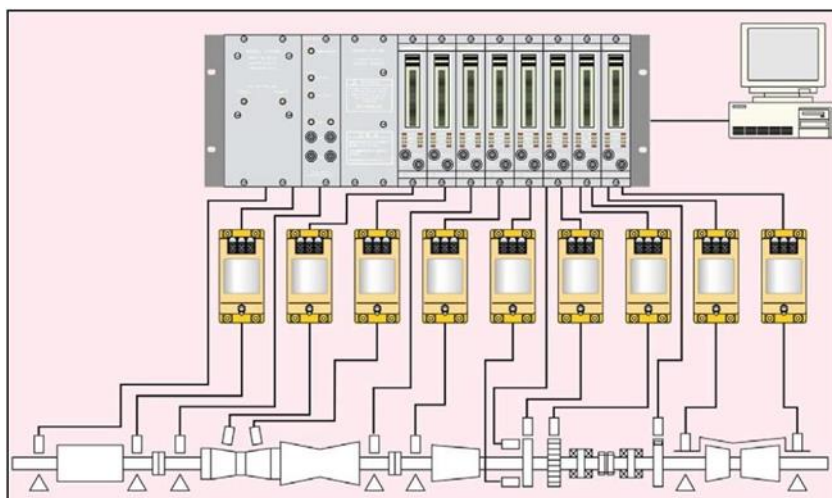


Figure 2.6: Maintenance Online

2/ Off Line:

C'est le deuxième mode de la maintenance préventive conditionnelle, il est conçu pour faire des contrôles assistés par des appareils portables.

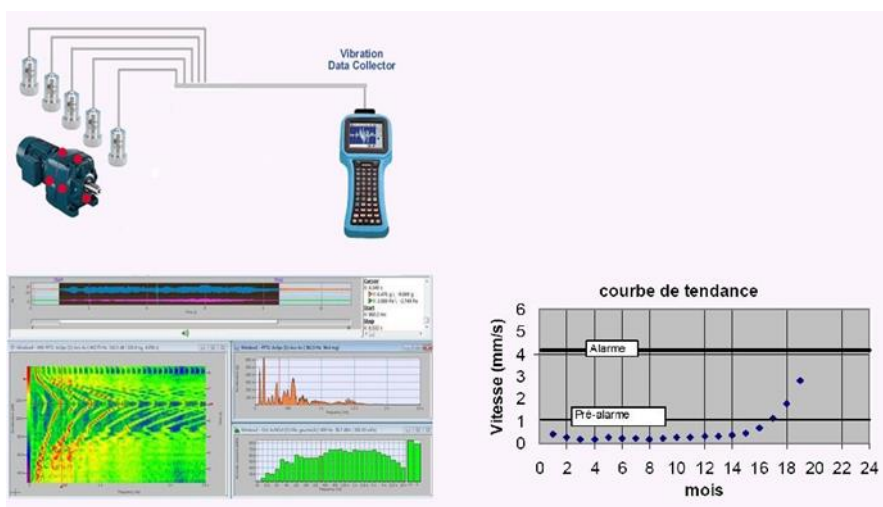


Figure 2.7 : Maintenance Offline

2-3-3. Niveaux de maintenance : La norme NF X 60-010 définit, à titre indicatif, quatre niveaux de maintenance

	niveau 1	niveau 2	Niveau3	niveau 4
travaux	- réglages simples - pas de démontage ni ouverture	opérations mineures de maintenance préventive	identification et diagnostic de pannes	travaux importants de maintenance corrective ou préventive
lieu	sur place	sur place	sur place ou dans atelier de maintenance	atelier spécialisé avec outillage général
personnel	exploitant du bien	technicien habilité	technicien spécialisé	équipe avec encadrement technique spécialisé
exemple	remise à zéro d'un automate après arrêt d'urgence	changement d'un relai	identification de l'élément défaillant	intervention sur matériel dont la remise en service est soumise à qualification

Tableau 2.2 : les quatre niveaux de maintenance

2-4. Les techniques de surveillance :

Une variété de technologies peuvent, et devraient être utilisée en tant qu'élément d'un programme de maintenance. Puisque les systèmes ou les machines mécaniques occupent la plupart d'équipement d'usine, la surveillance de vibration est généralement la composante clé de la plupart des programmes d'entretien prédictif. Cependant, la surveillance de vibration ne peut pas fournir toutes les informations exigées pour un programme d'entretien préventif réussi.

2-4-1. L'analyse vibratoire :

Puisque la plupart des usines se composent des systèmes électromécaniques, la surveillance vibratoire est l'outil préventif primaire de maintenance. L'analyse vibratoire est la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle 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, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

Au cours des 10 dernières années, la plupart de ces programmes ont adopté l'utilisation des unités de collecte de données sur microprocesseur et à canal unique et du logiciel windows®-base d'acquérir, contrôler, tendre, et évaluer l'énergie de vibration créée par ces systèmes électromécaniques. En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts (c'est-à-dire sur les paliers des machines), on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement. La méthode présente trois gros avantages : les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine, c'est un peu "la méthode incontournable". Bien que cette approche soit une méthodologie préventive valable d'entretien, ces limitations de système peuvent limiter les avantages potentiels. [4]

2-4-2. L'analyse des huiles :

Un autre outil de surveillance, l'analyse des lubrifiants, comme son nom l'indique, c'est une technique d'analyse qui détermine l'état d'huile ou de graisse utilisée dans l'appareillage électrique mécanique, appliquée à toutes les machines pourvu qu'elles contiennent un fluide (huile ou graisse) que l'on peut prélever. La méthode consiste à "faire parler" les particules d'usure drainées par le lubrifiant, en analysant un échantillon de quelques dizaines de millilitres d'huile (prélevé à l'aide de petites seringues ou lors d'une vidange), afin d'en déduire l'état de l'équipement. [5] Cette technologie ne peut pas être employée pour déterminer la condition de fonctionnement des machines ou détecter les modes de défaillance potentiels. Simplement indiquée, l'analyse d'huile lubrifiante devrait être limitée à un programme proactif pour conserver et prolonger la vie utile des lubrifiants en révélant sa dégradation (suite à une oxydation, à une pollution, à une température d'utilisation trop élevée, etc.). Bien que quelques formes d'analyse d'huile puissent fournir une panne quantitative précise de l'additif individuel et des contaminants chimiques d'huile, révélatrice d'une usure anormale de l'un des composants, ou le mauvais état d'un filtre. En outre, l'analyse détaillée des propriétés chimiques et physiques de différentes huiles utilisées peut être employée pour programmer des intervalles de changement d'huile basés sur l'état réel d'huile. Dans les grandes et moyennes usines, une réduction du nombre de changements d'huile peut s'élever à une réduction annuelle considérable en coûts d'entretien. Le prélèvement relativement peu coûteux et l'essai peuvent montrer, quand l'huile dans une machine a atteint un point où les garanties changent. Donc Les applications primaires de l'analyse d'huile sont : " contrôle de qualité, réduction d'inventaires d'huile de graissage, et détermination de l'intervalle le plus rentable pour le changement d'huile".

Cependant, l'emploi de cette technique dans un programme de maintenance préventive conditionnelle, est associée à trois limitations principales : le coût d'équipement, le prélèvement précis des échantillons d'huile, et enfin l'interprétation des données. [4]

2-4-3. Thermographie :

La thermographie infrarouge suscite un intérêt encore récent dans le domaine de la maintenance. Jusqu'alors, réservée au contrôle d'installations électriques, elle est depuis peu utilisée dans la surveillance des machines tournantes et des structures. Elle emploie l'instrumentation conçue pour surveiller l'émission de l'énergie infrarouge (température de surface) pour déterminer la condition de fonctionnement. En détectant des anomalies thermiques (les secteurs qui sont plus chauds ou plus froids qu'ils devraient être), un technicien expérimenté peut localiser et définir une multitude de problèmes naissants au sein de l'usine. La technologie infrarouge est affirmée sur le fait que tous les objets ayant une température au-dessus de l'absolu zéro émettent l'énergie ou le rayonnement. Le rayonnement infrarouge est une forme de cette énergie émise. [5]

Le système optique, les détecteurs de rayonnement, et d'autre forme d'indicateur sont les éléments de base d'un instrument infrarouge industriel. Le système optique rassemble l'énergie sur un détecteur, qui le convertit en signal électrique, ensuite un instrument électronique amplifie le signal de sortie et le transforme en une forme affichable. [4]

La thermographie permet donc de réaliser des mesures distances, et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

2-4-4. L'analyse des mesures ultrasonores :

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectuent à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse. La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité), permet de détecter des défauts de faible amplitude à haute fréquence (tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).

2-4-5. Le Choix de l'outil de surveillance :

Toutes les méthodes qu'on a déjà vues, ne permettent pas de "voir" les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine et la gravité du défaut. En outre, chaque méthode a son champ d'application privilégié, voir (tableau 2-2) donc avant de choisir, il faut bien cerner la criticité de sa machine, et définir le type de surveillance qu'elle nécessite. [5]

	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de défauts à un stade précoce - Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi - Autorise une surveillance continue - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - Spectres parfois difficiles à interpréter - Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> -Ne permet pas de localiser précisément le défaut - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité), etc.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation - Interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles - Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic souvent difficile à réaliser - Problèmes de répétabilité des mesures 	<ul style="list-style-type: none"> -Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Tableau 2-3 : Choix de l'outil de surveillance [5]

Type de défauts	Analyse vibratoire	Thermographie IR	Analyse d'huiles	Analyse acoustique
Déséquilibres, balourd	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	Non
Jeux, défauts de serrage	Oui	Non (sauf s'il y a usure)	Oui (s'il y a un échauffement)	oui (s'il y a une résonance)
Défauts spécifiques aux roulements	oui	oui	oui	Oui
Défauts spécifiques aux engrenages	oui	oui	oui	Oui
Défauts de courroies	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts d'alignement	Oui	Non	Oui	Non
Défauts liés à la lubrification : - dégradation de la qualité de l'huile	Non (sauf paliers fluides)	Oui	Non	Oui
manque d'huile	Oui	Oui	Oui	Oui
Défauts de nature électrique ou électromagnétique	Oui	Non	Oui	Oui
Défauts liés aux écoulements (pour pompes et machines hydrauliques)	Oui	Non	Non	Oui

Tableau 2-4 : Classement des défauts suivant les méthodes de détection [5]

2-5. 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. Elle risque donc d'intervenir trop tôt ou trop tard.

La maintenance conditionnelle, qui s'appuie sur l'analyse de l'état d'une machine, prend alors tout son sens, car elle permet de prendre les décisions d'intervention en connaissance de cause, cette approche sera abordée dans le chapitre 3

CHAPITRE 3 : ANALYSE VIBRATOIRE ET DEFERENTS TYPES DES DEFAUTS

1. Introduction :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations. Le principe de l'analyse est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine et, grâce à leur analyse, on peut identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise.

L'analyse vibratoire est un outil puissant de détection de défauts des machines tournantes , Dans ce chapitre, on présente un état des lieux des méthodes d'analyse vibratoire les plus fréquents utilisées dans le cas de signaux des machines tournantes .

2. L'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- réduire le nombre d'arrêts sur casse
- fiabiliser l'outil de production
augmenter son taux de disponibilité
- mieux gérer le stock de pièces détachées, etc.

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.[4]

Définitions (norme AFNOR 90.001)

La vibration est une variation dans le temps de la valeur d'une grandeur donnée, propre au mouvement, voire de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur dont il est question est soit plus grande soit plus petite que la valeur moyenne connue comme valeur de référence [4]. Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement autour de la position d'équilibre stable (Figure 3-1).

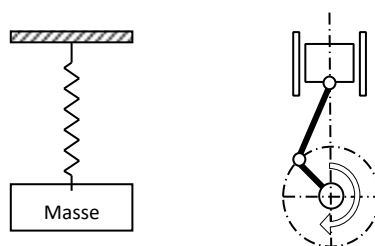


Figure 3-1 : Systèmes oscillants

3. Caractéristiques d'une vibration :

Une vibration se caractérise principalement par sa :

3-1. Fréquence :

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en **hertz [Hz]**. **1 hertz = 1 cycle/seconde**. Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence f de 20 hertz.

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 $1/50^{\text{ème}}$ de seconde. La fréquence f est l'inverse de la période T : $f = 1/T$.

Remarque

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'Hertz [Hz], on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute).

Gamme des fréquences :

- Basses fréquences < 100 Hz
- 100 Hz < Moyennes fréquences < 1000 Hz
- 1000 Hz < Hautes fréquences

3-2. 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. Ces relations sont simples dans le cas de signaux purement sinusoïdaux.

Influence de la grandeur utilisée : On constate que :

- Le Déplacement est inversement proportionnel au carré de la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus le Déplacement diminue : Son utilisation est réservée aux très basses fréquences : $F \leq 100$ Hz
- La Vitesse est inversement proportionnelle à la fréquence : Plus la fréquence augmente, plus la Vitesse diminue : Son utilisation est réservée aux basses fréquences : $F \leq 1000$ Hz

- L'Accélération, représentative des forces dynamiques, ne dépend pas de la fréquence : C'est le paramètre privilégié en analyse vibratoire sur un large domaine de fréquences : $0 \leq F \leq 20000$ Hz

3-3. Unités :

Les unités de mesure utilisées en surveillance vibratoire sont des unités proportionnelles aux grandeurs physiques mesurables au cours d'une campagne de mesure.

Unité	Déplacement	Vitesse	Accélération
SI	Mètre (m)	Mètre par seconde (m/s)	Mètre par seconde carré (m/s ²)
Analyse vibratoire	Micromètre (μm)	Millimètre par seconde (mm/s)	Pesanteur (g=9.81m/s ²) ou (mg=10 ⁻³ g)

Tableau 3-1: Unités de mesure des vibrations

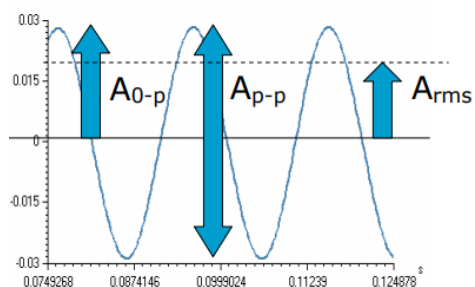
3-4. Amplitude

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :

- l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (**A_c**) ou niveau crête;
- l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (**A_{cc}**) (*peak to peak*, en anglais) ou niveau crête-crête ;
- l'amplitude efficace (**A_{eff}**) , aussi appelée **RMS** (*Root Mean Square*) ou niveau efficace.

- L'amplitude crête A_{0-p}
- l'amplitude crête-à-crête A_{p-p}
- L'amplitude efficace A_{rms}

D'où $A_{0-p} = \sqrt{2} \cdot A_{rms}$



4. Nature d'une vibration :

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [figure 3-2 a] ou sinusoïdal complexe [figure 3-2 b] représentatives du fonctionnement normal ou

anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).

- Les vibrations périodiques de type impulsional [figure 3-2 c] sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...
- Les vibrations aléatoires de type impulsional [figure 3-2 d] peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...

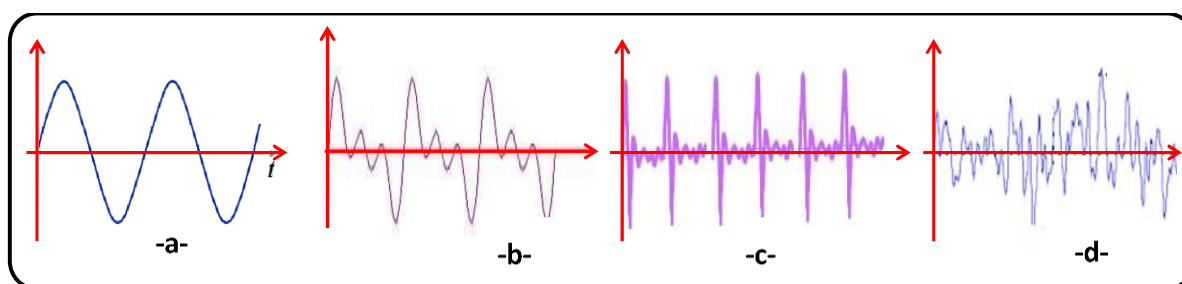


Figure 3-2 : Nature d'une vibration

5. Les capteurs de vibration [8]

5-1. Types et caractéristiques des capteurs :

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

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur sa (par exemple $\pm 3\%$ ou ± 3 dB de [3–8000] Hz).
- sa **gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.

- sa **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple 8 mV par μm). Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

5-2. Les proximètres :

Le proximètre, ou sonde de proximité [figure 3-3], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier [figure 3-4]. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées

aux basses fréquences (< 100 Hz).

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en terme de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération.



Figure 3-3 : proximètres et leur driver

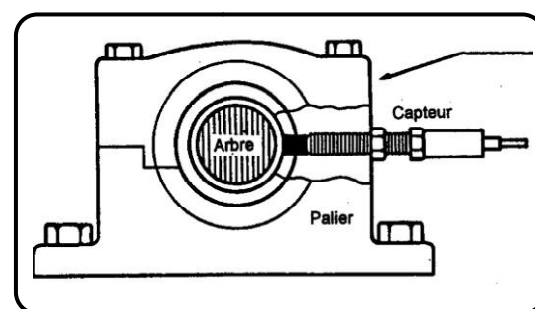


Figure 3-4 :proximètre monté sur un palier

5-3. 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 [figure 3-5]. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ.

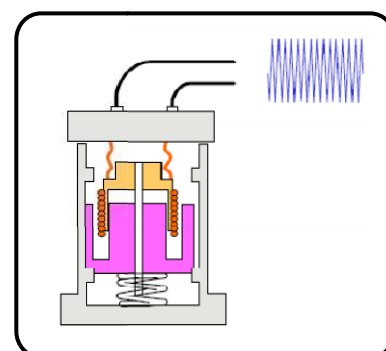


Figure 3-5 :schéma de principe de fonctionnement d'un vélocimètre.

5-4. Les accéléromètres

a. Principe

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 3-6], est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), 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 des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue le plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

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

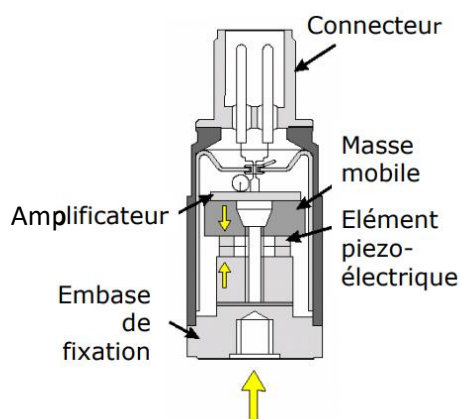


Figure 3-6 : schéma de principe d'un accéléromètre.

b. Réponse d'un accéléromètre

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la figure 3-7, montre l'existence de deux zones :

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée

avec une bonne sensibilité. Cette zone définit la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.

- Une zone englobant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est faussée.

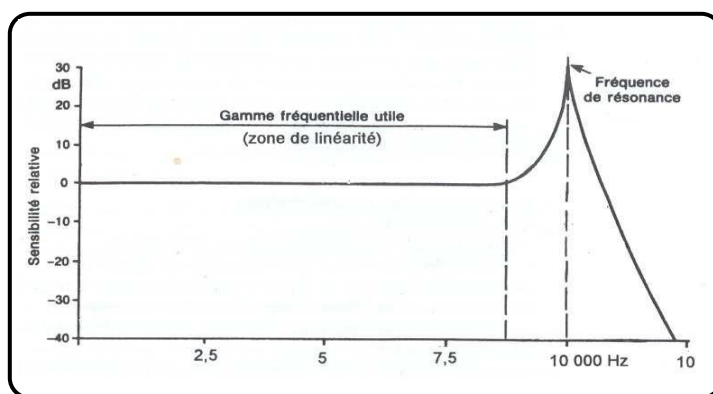


Figure 3.7 : courbe de réponse d'un accéléromètre

5-5. Emplacement

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile [figures 3-8 et 3-9]. Ces efforts sont de deux types :

- **Efforts tournants** : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;
- **Efforts directionnels** : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la Fixation du capteur tension d'une courroie (effort directionnel radial) ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

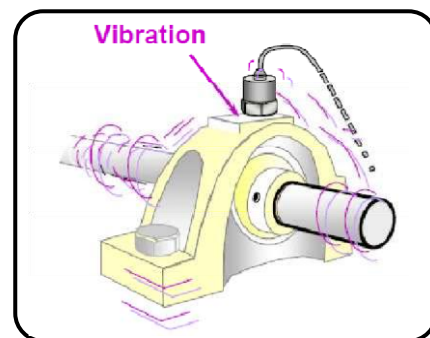


Figure 3-8 : Fixation du capteur sur palier

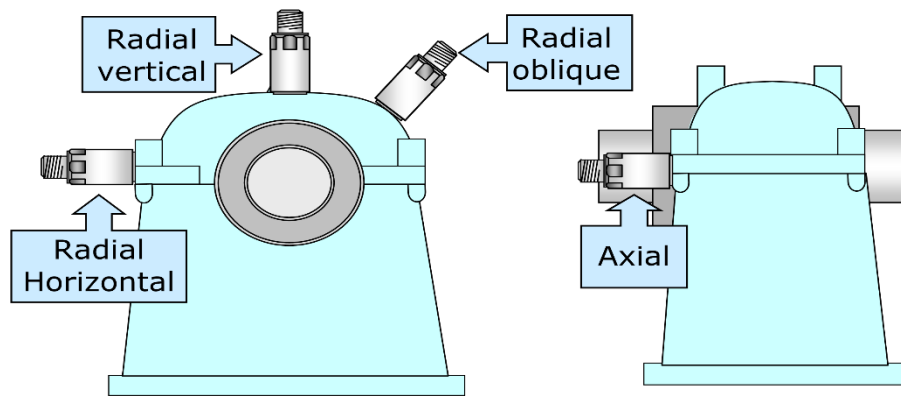


Figure 3-9: Choix directionnel pour la prise de mesure

Remarques

- Bien que l'effort soit constant dans toutes les directions du plan radial, une mesure dans la direction radiale horizontale donne une valeur d'amplitude plus forte.
- La lecture des valeurs d'amplitude doit tenir compte du temps nécessaire à la prise d'une mesure correcte et de l'estimation des fluctuations de niveaux éventuelles.
- Toute remarque au cours de cette évaluation peut être importante et significative d'un défaut.

5-6. Consignes pour la fixation des capteurs

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur [figure 3-10].
- L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure [figure 3-11].
- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs [figure 3-12].
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit place de goujons

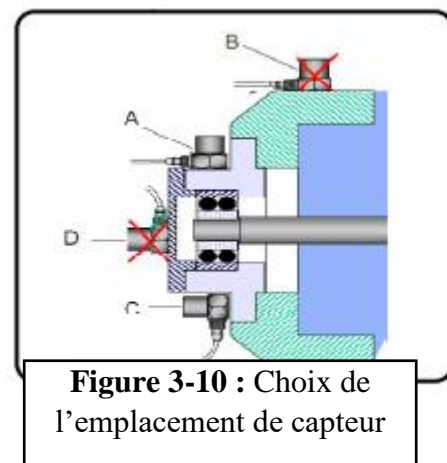


Figure 3-10 : Choix de l'emplacement de capteur

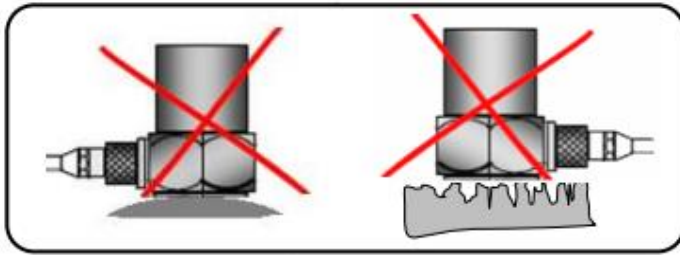


Figure 3-11 : Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes

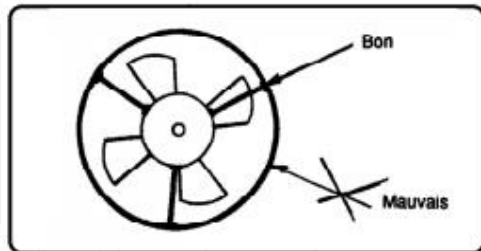


Figure 3-12 : emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation

Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur

5-7. Modes de fixation :

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation [figure 3-13].

Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur

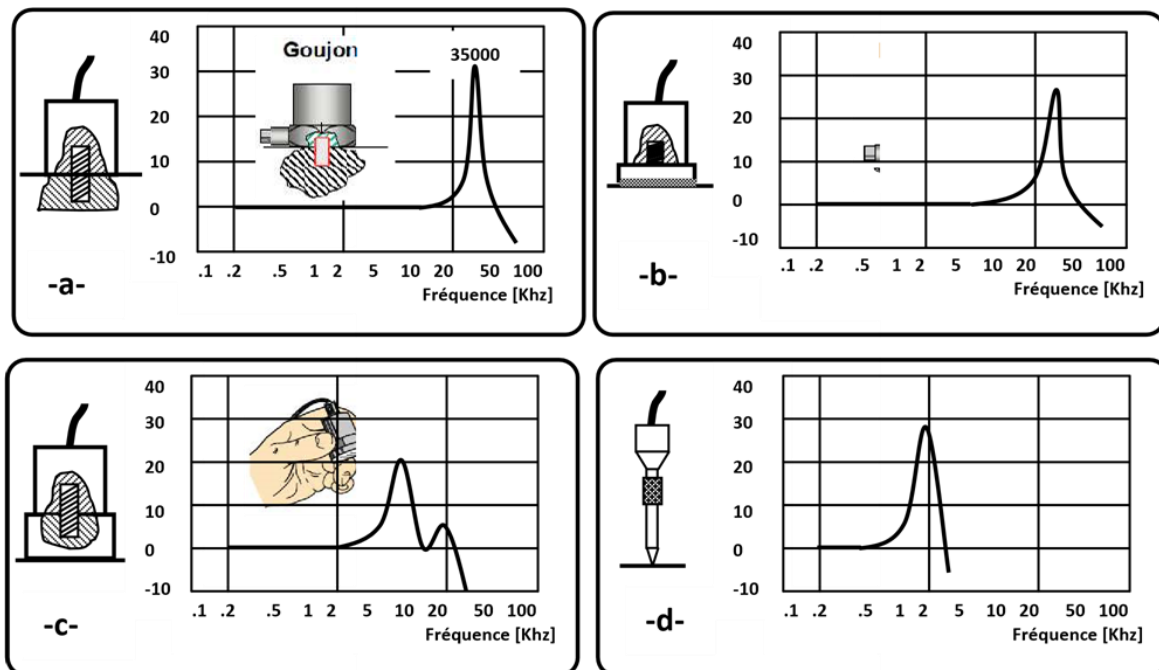


Figure 3-13: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

- a- fixation par goujon
- b- fixation par embase collée
- c- fixation par aimant
- d- fixation par pointe de touche

6. La chaîne de mesure :

Le but de la mesure est de faire correspondre, à une grandeur physique que l'on désire connaître, une grandeur compréhensible par le système d'acquisition. De nos jours, il s'agit presque uniquement de signaux électriques qui ont remplacé les systèmes mécaniques et optiques d'autrefois. Ainsi le capteur délivre un signal qui est amplifié et converti généralement en tension par un conditionneur. Le système d'acquisition n'a plus alors à traiter qu'un courant électrique dont l'intensité est directement reliée à l'amplitude du phénomène vu par le capteur et cela quel que soit le type de ce capteur.

Prenons l'exemple :

Chaîne d'acquisition analogique (figure 3-14). Le mot analogique veut dire que la loi liant l'information issue du capteur à la grandeur mesurée est continue. Le signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants :

- le convertisseur de mesure, qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable et qui est en entrée de la plupart des stations d'acquisition modernes.
- l'amplificateur, qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre en cela moins sensible au bruit de fond ambiant.
- un ou plusieurs dispositifs de traitement du signal qui sont dédiés à la chaîne d'acquisition et varient en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur. Ces dispositifs mettent en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation. Dans certains cas, il est possible de trouver, dans la chaîne d'acquisition, un multiplexeur : par exemple, si la station d'acquisition est éloignée du lieu de mesure ou si l'opérateur désire enregistrer un certain nombre de voies sur une bande magnétique. L'opération consiste à faire passer plusieurs signaux par une seule voie.

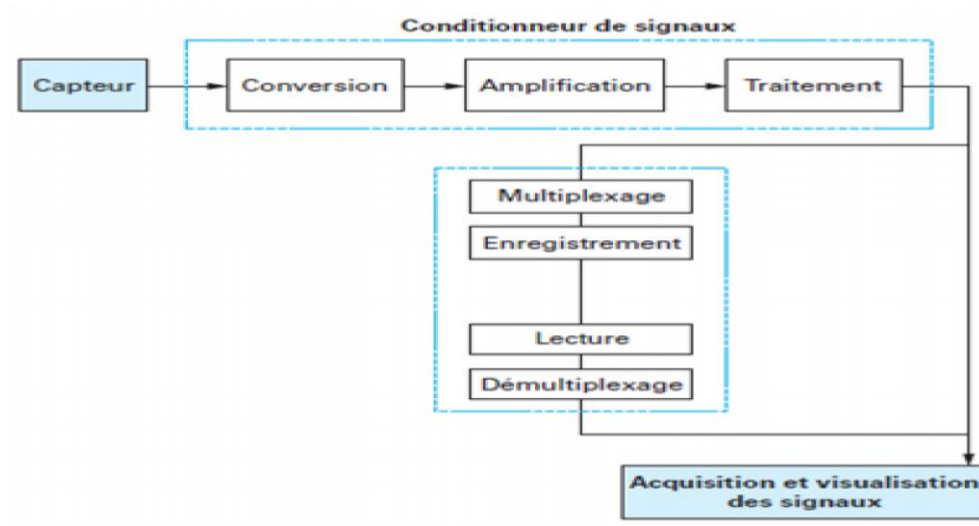


Figure 3-14 : la chaîne de mesure analogique [BM 5 160]

La chaîne de mesure numérique, dont un exemple est donné (figure 3-115), utilise au départ les mêmes dispositifs que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- l'échantillonneur-bloqueur (E/B) a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion.
- le convertisseur analogique-numérique (CAN) a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur. De la même manière que pour la chaîne analogique, dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'échantillonneur-bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur analogique-numérique. [BM 5 160]

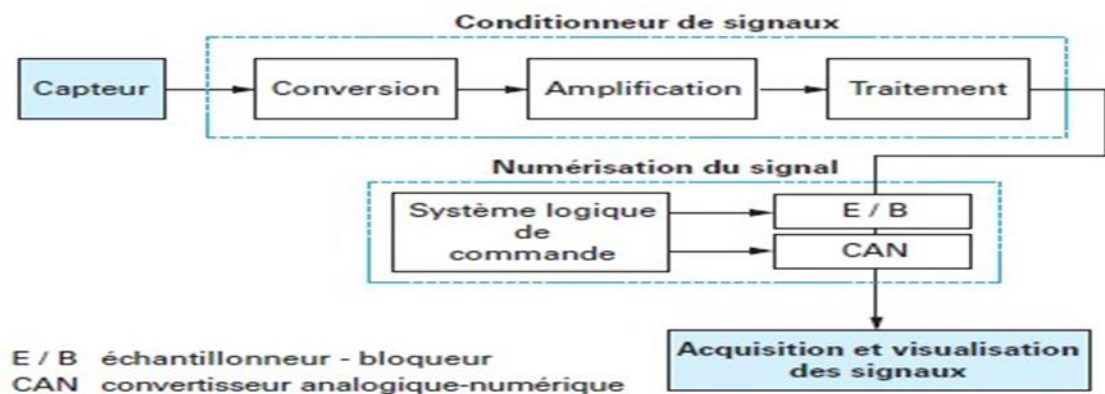


Figure 3-15 : la chaîne de mesure numérique [BM 5 160]

7. L'analyse spectrale :

L'analyse spectrale repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement.

7-1. Généralisation :

Les vibrations réelles sont infiniment complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres. Néanmoins, ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de composantes élémentaires purement sinusoïdales représentées chacune par leur amplitude A_i et leur fréquence F_i . La transformée de Fourier est un des outils utilisés à cet effet. Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal de l'espace temporel vers l'espace fréquentiel. La représentation du signal obtenue est appelée un spectre en fréquences. La Transformée de Fourier est implémentée dans les analyseurs de spectres sous une forme appelée FFT (Fast Fourier Transform). Le spectre final contient l'ensemble des fréquences sinusoïdales (raies discrètes) constituant le signal vibratoire d'origine [figure 3-16].

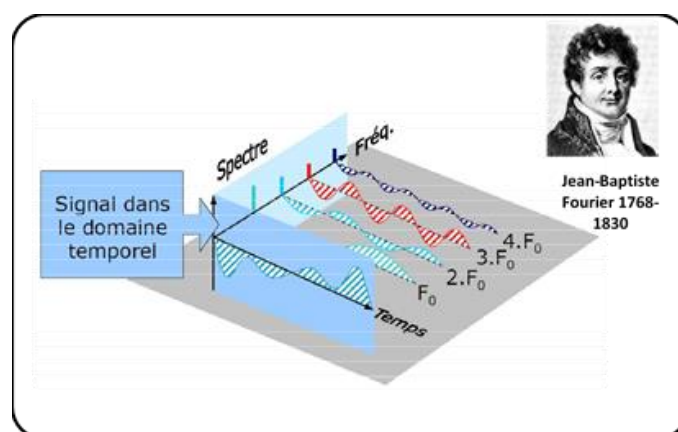


Figure 3-16 : Signal temporel et transformation en fonction de temps

7-2. Définition d'un spectre :

Un spectre [figure 3-17] est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude. Notons que dans certains cas (raies confondues et dépassant largement du signal, ...) nous ne parlons plus de raie, mais de pic.

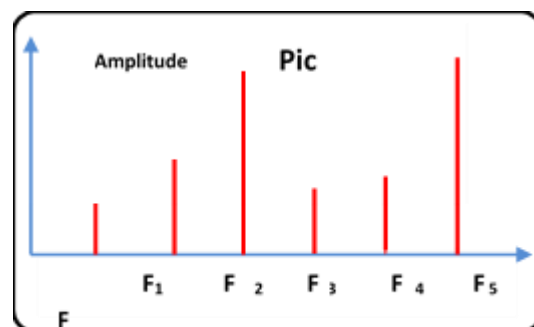


Figure 3-17 : exemple de spectre

7-3. Représentation graphique d'un spectre :

Les spectres issus de signaux vibratoires réels sont très riches en raison du grand nombre de sources vibratoires présentes dans une machine. Par suite, les informations intéressantes dans le spectre ne correspondent pas forcément aux fréquences présentant des maxima d'amplitude. Des raies spectrales d'amplitude faibles au regard des autres peuvent être d'un intérêt de premier plan pour le diagnostic. Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une échelle logarithmique des amplitudes du signal. Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes et est donc recommandé. La figure 4.8 présente un spectre avec deux représentations en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire.

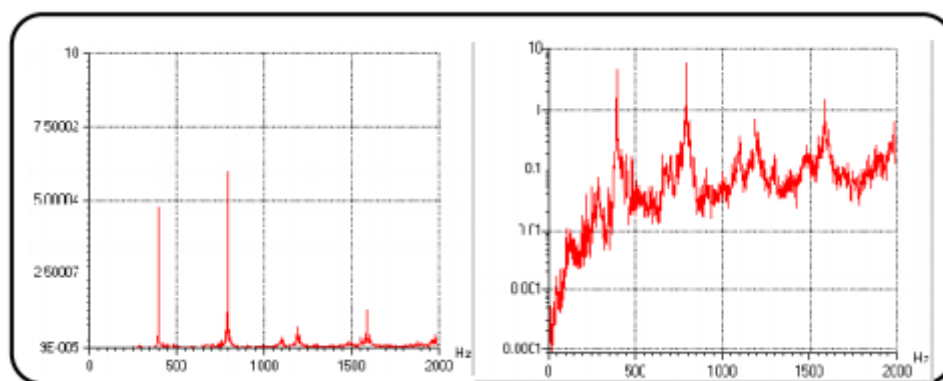


Figure 3-18 : Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire

8. Origine des Vibrations :

Les sources d'excitation vibratoires dans les machines tournantes peuvent être classées en différentes catégories :

- Forces périodiques (balourd)
- Forces transitoires (variations de charge)
- Forces impulsionnelles (chocs)
- Forces aléatoires (frottements)

Les phénomènes à l'origine des vibrations dépendent de la constitution de la machine et de ses paramètres de fonctionnement. Les plus courants sont présentés dans ce chapitre ainsi que leurs manifestations typologiques afin de permettre leur identification et leur suivi dans le cadre d'un programme de maintenance conditionnelle.

8-1. Le Balourd :

le balourd mécanique :

Le phénomène de balourd mécanique est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation. Différents types de balourd peuvent être identifiés :

- Balourd statique : L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation
- Balourd de couple : L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle (figure 3-20 B)
- Balourd dynamique : Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant (figure 3-20C)

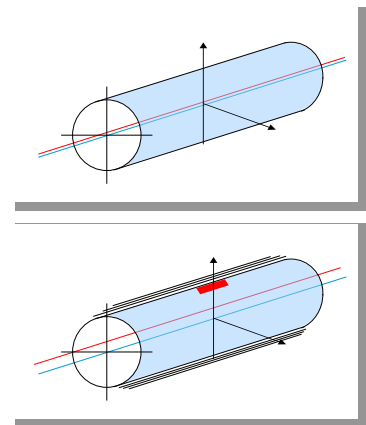


Figure 3-19 : Balourd statique

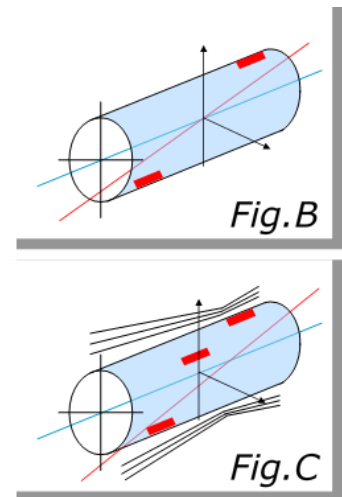


Figure 3-20 : Balourd dynamique

8-1-1. Typologie du balourd

Le balourd se manifeste par une énergie vibratoire localisée :

- A la fréquence de rotation F_0
- Aux fréquences des harmoniques $2F_0, 3F_0...$

Il existe toujours un balourd résiduel sur une machine tournante.

L'évolution du balourd se manifeste par une augmentation de la raie à F_0 et des harmoniques $2F_0, 3F_0,...$

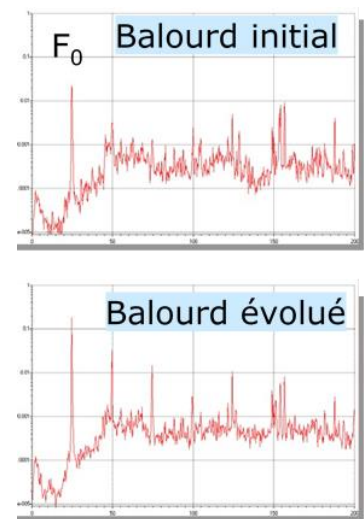


Figure 3-21 : spectre théorique d'un défaut de balourd

Spectres superposés :

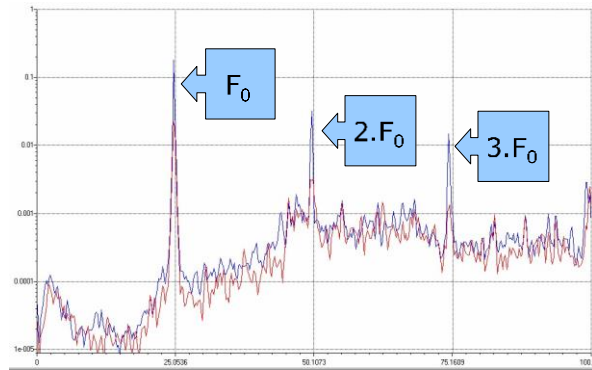


Figure 3-22 : spectre théorique d'un défaut de balourd

8-1-2. Ambiguïtés de diagnostic :

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

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

8-2. Le Délignage :

Le défaut de lignage est dû à la non coïncidence des axes de rotation de 2 machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage

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

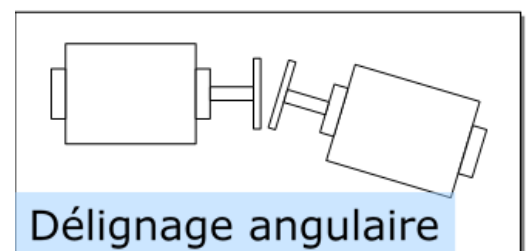
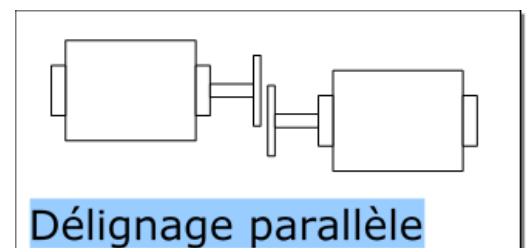


Figure 3-23 : défauts d'alignement d'arbres

8-2-1. Typologie du délignage :

Il se manifeste par une énergie vibratoire localisée à $2.F_0$, $3.F_0$ ou $4.F_0$ dans toutes les directions de mesurages.

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

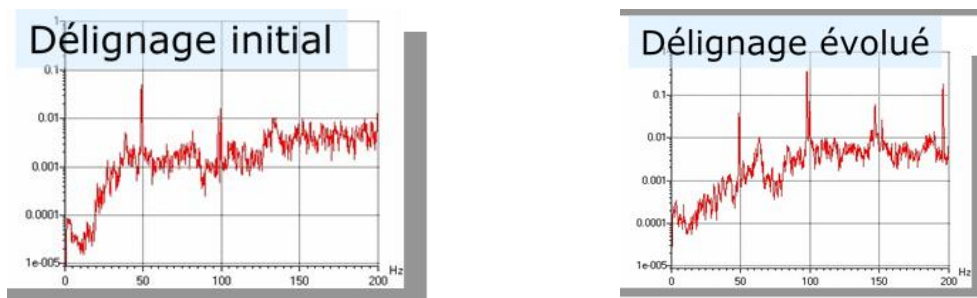


Figure 3-24 : spectre théorique d'un défaut d'alignement

Spectres superposés :

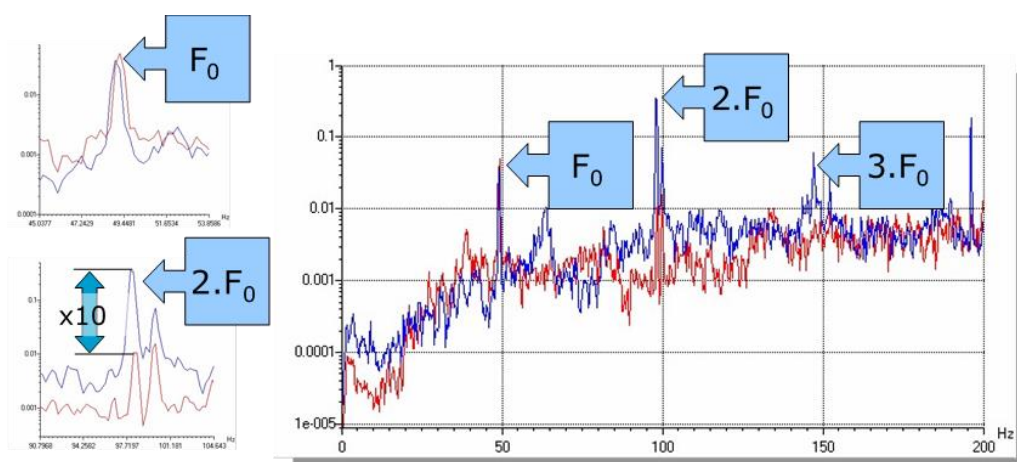


Figure 3-25 : spectre théorique d'un défaut d'alignement

8-2-2. 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

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

- Balourd important
- Chocs périodiques à la fréquence de rotation

8-3. Les chocs périodiques :

Chocs périodiques (chocs à la rotation)

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine :

Origine des chocs périodiques externes :

- Défaut de fixation
- D'une autre machine (alternative, presse, ...)

Origine des chocs périodiques internes :

- Dégradation de roulement
- Dégradation d'engrènements
- Jeux excessifs

8-3-1. Typologie des chocs périodiques :

La manifestation spectrale d'un phénomène de chocs périodiques est un peigne de raies.

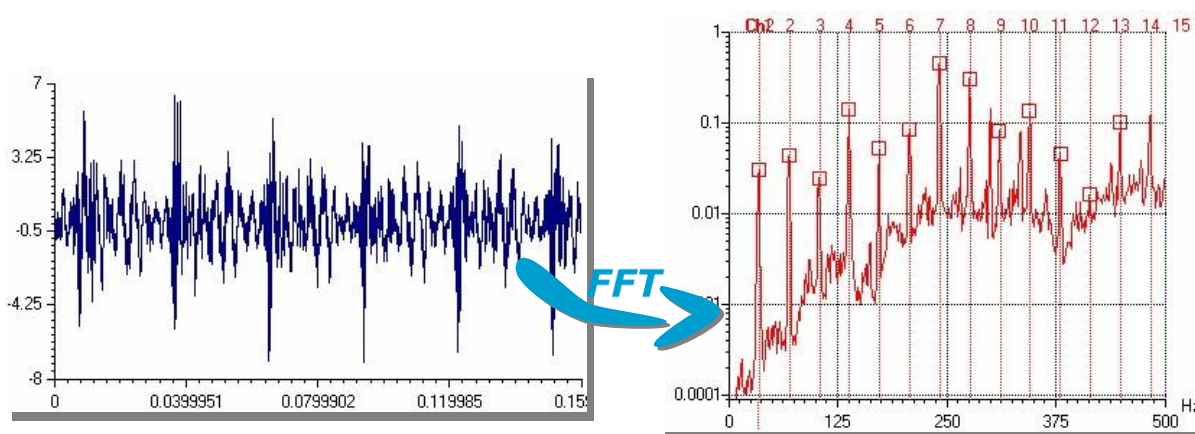


Figure 3-26 : spectre théorique d'un défaut chocs

8-3-2. Ambiguïtés de diagnostic :

Un peigne de raies peut être généré par des phénomènes autres que les chocs périodiques :

- Balourd important
- Fort délignage
- Phénomènes de modulation
- Amplification par une résonance

La détermination de l'origine exacte de l'allure du spectre constatée (peigne de raies) est souvent délicate.

8-4. Les 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

- Les engrenages parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- Les engrenages concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se coupent).
- Les engrenages gauches (les 2 arbres occupent une position relative quelconque)

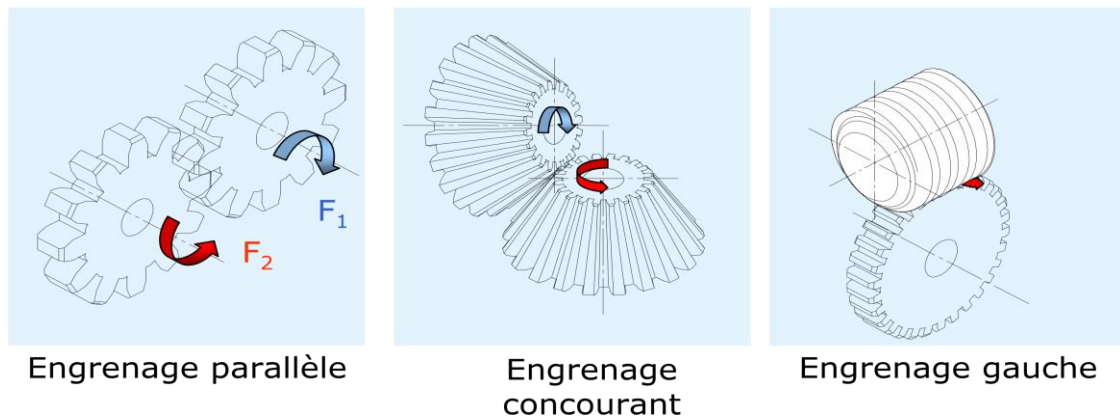


Figure 3-27 : Différents types d'engrenage

8-4-1. Fréquence d'engrènement :

La fréquence d'engrènement de denture F_E est égale à :

$$F_E = N_1.F_1 = N_2.F_2$$

Elle correspond au rythme d'engagement des dents.

8-4-2. Spectre typologique :

- En l'absence de défaut, on retrouve dans le spectre vibratoire la fréquence d'engrènement F_E et ses harmoniques $2.F_E$, $3.F_E$, ...

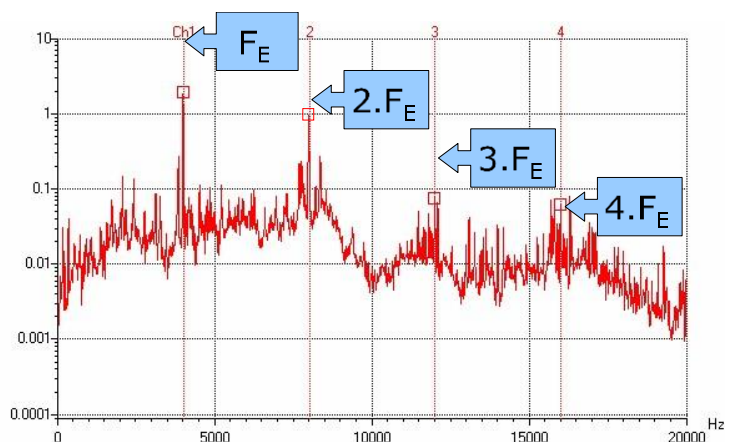


Figure 3-28 : spectre théorique d'engrenage

- **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

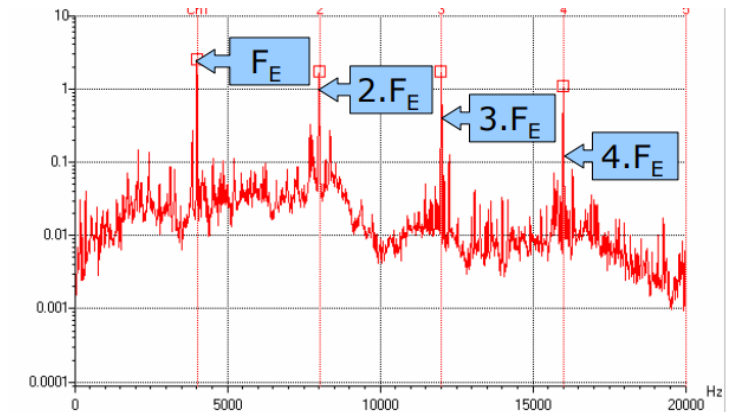


Figure 3-29 : spectre théorique de L'usure générale de la denture

- **Jeu de denture insuffisant** : Si le jeu de fond de denture est insuffisant, il se produit un effort à l'engagement et au déengagement des dents : La raie à $2.F_E$ augmente et devient parfois prépondérante.

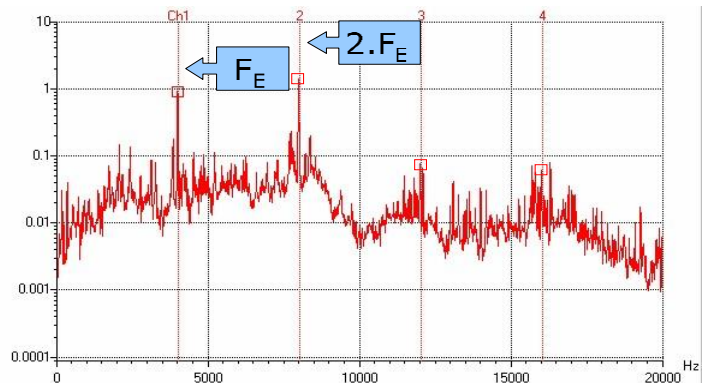


Figure 3-30 : spectre théorique de Jeu de denture insuffisant

- **Jeu de denture excessif** : Un jeu de fond de denture trop important génère un choc périodique « dur » à la fréquence d'engrènement (rattrapage du jeu), qui produit un peigne de raies d'amplitudes proches.

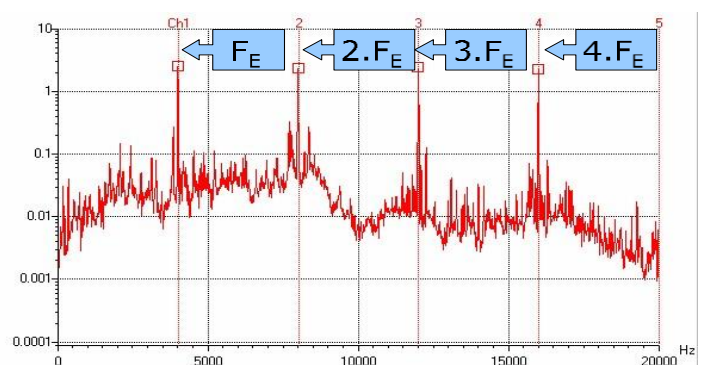


Figure 3-31 : spectre théorique de Jeu de denture excessif

- **Une dent détériorée sur un pignon :** Le passage de la dent détériorée provoque un choc « dur » à chaque tour. Le spectre résultant est un peigne de raies à la fréquence de rotation F_1 du pignon incriminé.

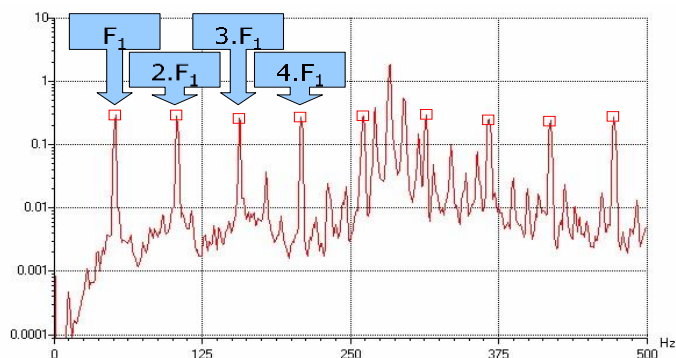


Figure 3-32 : spectre théorique d'Une dent détériorée sur un pignon

8-4-3. Ambiguïtés de diagnostic :

La présence de résonances locales de structures peut moduler les amplitudes relatives des différentes composantes et par suite modifier l'allure du spectre correspondant, faussant le diagnostic. Il est donc préférable de s'intéresser aux évolutions au cours du temps des amplitudes des raies du spectre.

La confusion entre des bandes latérales dues à une modulation et un peigne de raies dû à un choc peut également entraîner des erreurs de diagnostic quant à l'origine du phénomène. L'observation du signal temporel permet dans ce cas de lever l'indétermination.

8-5. Les Roulements

Les roulements réalisent le positionnement de l'arbre dans les paliers en assurant la transmission des efforts structure.

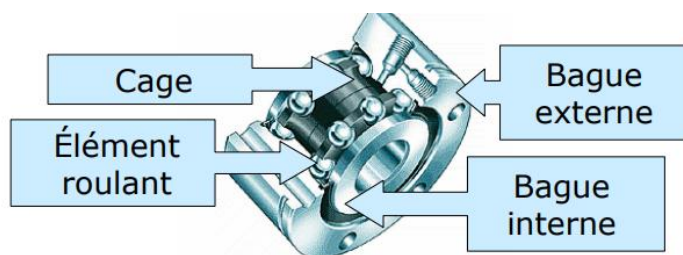


Figure 3-33 : les éléments d'un roulement

8-5-1. Fréquences cinématiques des roulements :

- d = diamètre des éléments roulants
- Z = nombre d 'éléments roulants
- D_e = diamètre du chemin de roulement de la bague externe
- D_i = diamètre du chemin de roulement de la bague interne
- D_m = diamètre primitif du roulement
- α = angle de contact (roulement à contact oblique)
- F_0 = fréquence de rotation de l 'arbre (la bague externe est supposée fixe)

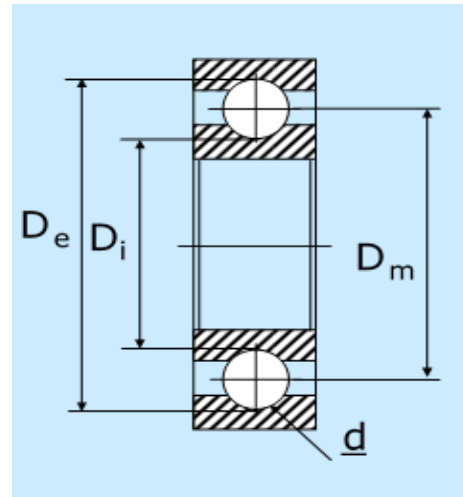


Figure 3-34 : les démentions d'un roulement

Fréquence de rotation de la cage :	$F_C = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$
Fréquence de défaut bague externe	$F_{BE} = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$
Fréquence de rotation des éléments roulants	$F_B = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_m}{d} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cdot \cos^2 \alpha\right) \cdot F_0$
Fréquence de défaut bague interne	$F_{BI} = \frac{Z}{2} \cdot \left(1 + \frac{d}{D_m} \cdot \cos \alpha\right) \cdot F_0$

Tableau 3-2: équations de fréquence cinématique de roulement

8-5-2. Les dégradations :

Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

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

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

a-Les dégradations localisées :

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

- Défaut sur bague externe = choc à F_{BE}
- Défaut sur bague interne = choc à F_{BI}
- Défaut sur élément roulant = choc à $2F_B$

Le spectre associé est un spectre de raies à la fréquence du choc. L'amplitude du choc étant faible, les raies ne seront discernables qu'autour des résonances de structure ou au moyen d'outils spécifiques.

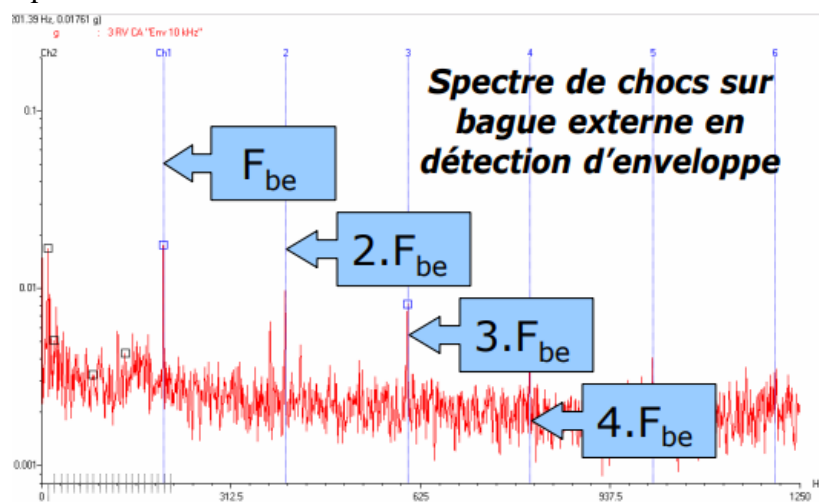


Figure 3-35 : Spectre de chocs sur bague externe en détection d'enveloppe

b-Les dégradations généralisées :

L'écaillage augmente lorsque la dégradation du roulement évolue pour gagner l'ensemble des éléments en contact. Cette évolution anarchique entraîne l'apparition de nombreux chocs durs qui excitent les fréquences de résonances (hautes) du roulement.

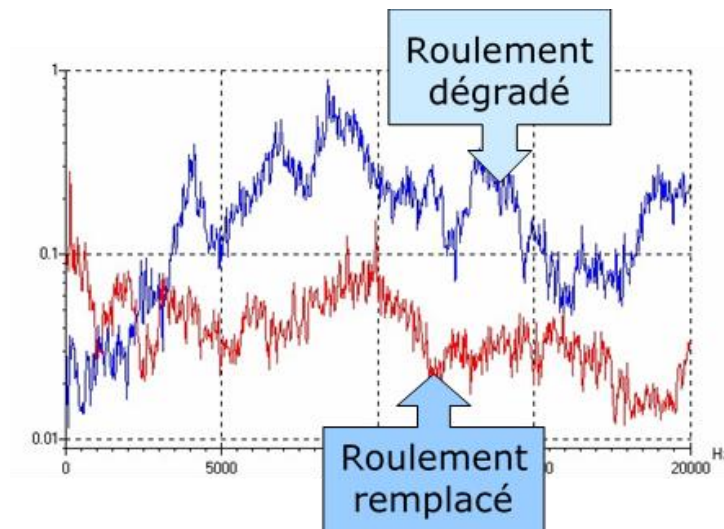


Figure 3-36 : Spectre de dégradation généralisée

8-5-3. Le Facteur de Défaut Roulement :

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

$$F_D = a.F_C + b.A_{RMS} \text{ avec } F_C = \frac{A_c}{A_{rms}} \text{ Facteur de crête}$$

Combinant les indicateurs Facteur de Crête (Fc) et Valeur efficace (Arms), il présente les avantages suivants :

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

Evolution de l'indicateur :

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

Tableau 3-3: Evolution de l'indicateur

8-6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une présentation de l'organisation du signal en général ainsi que des définitions de certaines grandeurs caractéristiques des signaux vibratoires qui joueront le rôle d'indicateurs qui feront l'objet de suivi de la tendance ou de surveillance

Un rappel de certains éléments d'analyse des signaux a été abordé, outil classique d'analyse spectral qui a prouvé son efficacité pour les signaux à caractère périodique (cas des machines tournantes

nous avons vu les différents défauts qui sont captés par l'analyse vibratoire et leur signature vibratoire ou bien le spectre fréquentiel de vibration. Cependant, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisée. Il faut dire qu'elle 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, un roulement usé ou endommagé... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire.

CHAPITRE 4: ETUDE D'UN CAS PRATIQUE

1. Présentation de l'atelier de concassage

Les carrières et le concasseur sont prévus pour une cadence de travail de 8h/jour pendant 5 jours par semaine. Le calcaire est extrait par battage à l'explosif et chargé dans des dumpers au moyen de chargeur sur pneus. L'argilite est extraite par ripage aidé de tirs d'ébranlement éventuels et chargée dans des dumpers au moyen de chargeur sur pneus. Le calcaire est amené par dumpers (30t ou 50t) à la trémie de l'alimentation de l'atelier de concassage. Il est prévu de transporter l'argilite par dumper de la carrière à l'atelier de concassage où elle sera déchargée pour constituer un stock de 600t, l'argilite sera déversée par chargeur dans la trémie de l'alimentation de concasseur ; la capacité utile de cette trémie est d'au moins de 100 m³ et ne tient pas compte de la matière qui doit recouvrir l'alimentateur. Au fond de la trémie est installé un alimentateur à tablier métallique qui alimente le concasseur en calcaire ou en argilite. Il s'agit d'un concasseur marteau à un rotor, pourvu de deux cylindres d'avancement de la matière. Le concasseur fonctionne pour le concassage de calcaire, 5 jours par semaine à raison de 7 heures d'un sixième poste. L'installation est dépoussiérée par un cyclone suivi d'un filtre à manches. Les caractéristiques générales de la ligne de concassage sont les suivantes : Débit moyen en sec pour le calcaire (6% en H₂O) 1000 t/h Débit minimal en sec pour argilite (10% en H₂O) 450 t/h Débit maximal en sec pour l'argilite 1000 t/h Dimension maximale d'un bloc de calcaire 1300mm Dimension maximale d'un bloc d'argilite 800mm Granulométrie sortie de concasseur : inférieur à 25mm avec max de 5% supérieurs à 25mm Densité apparente de calcaire 1,4 à 1,5 Densité apparente de l'argilite 1,4 à 1,8.

2. Rôle de concasseur :

Le concasseur est un équipement primordial dans la fabrication du ciment, il est utilisé pour réduire une roche aux dimensions désirées appelée granulométrie.

3. Présentation du concasseur FCB :

Le concasseur à marteaux FCB (dragon) est conçu pour assurer un débit de (450) t/h, il est doté deux rotors munis de 36 marteaux et d'une grille de sortie par laquelle sort les matériaux concassés (argile), le mouvement rotationnel du rotor assuré par un moteur électrique permet de réduire le grand volume des roches et on obtient petits cailloux sortants à travers de la grille de sortie.

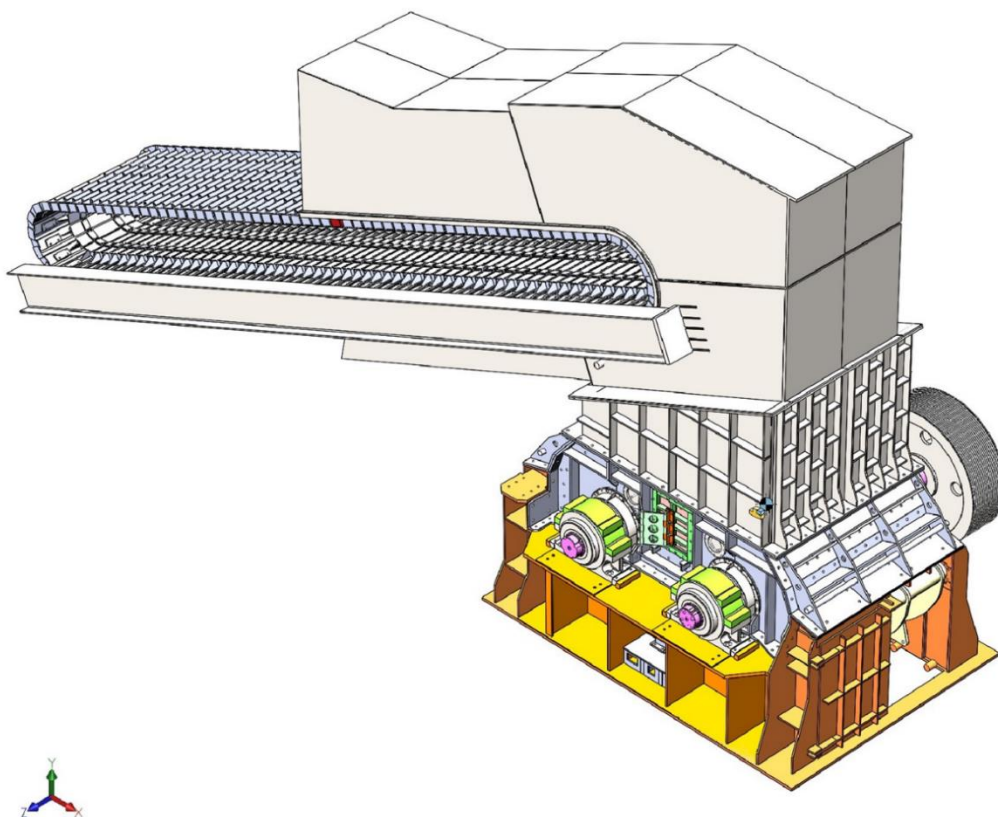


Figure 4-1 : modèle en 3D de concasseur FCB

3-1. Caractéristiques de concasseur :

- Marque : DRAGON "FCB"
- Type : DUO 6BS
- Poids : 67500Kg
- Encombrement : l:4900-L:3040 ;h:2450
- Produit a l'entrée : Calcaire
- Débit : 450 t/h
- Taille du produit entrée : 25-1300*1100*900 mm Humidité : 5%
- Calibre finale :0-80.mm
- Deux Rotor (NORD/SUD) : Diamètre 1600 ; Largeur :2000 ; Nbre de tour :570 tr/mn
 - Nbre d'axe porte marteaux par rotor: 6 ; Nbre de marteaux par rotor : 18
- Roulement : 22248 C C3
- Volant d'inertie avec dispositif de sécurité a friction

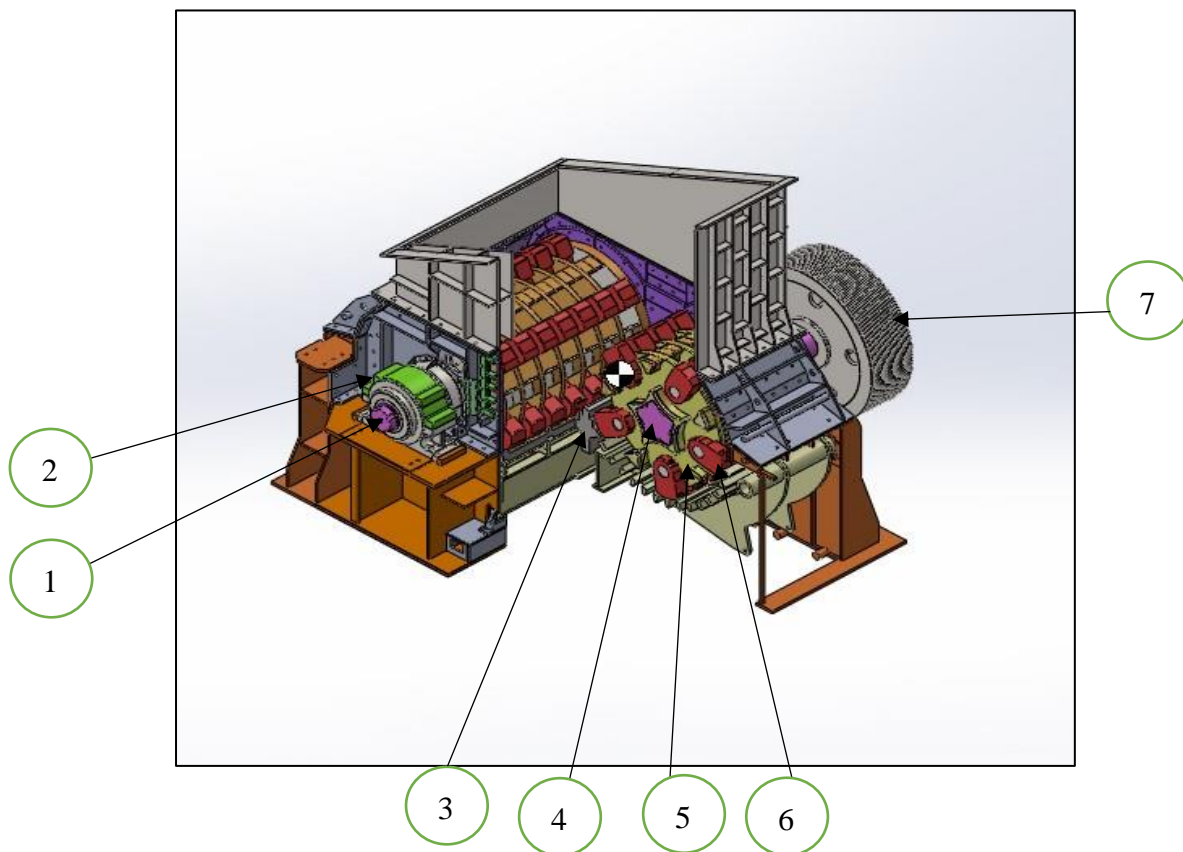


Figure 4-2 : vue de coup en 3D de concasseur FCB

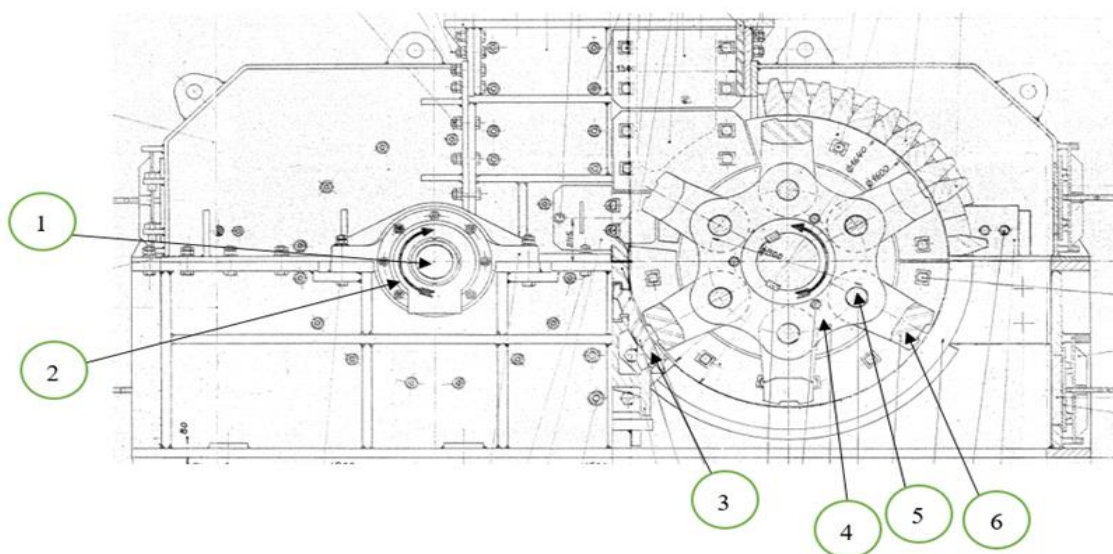


Figure 4-3 : vue de coup en 2D de concasseur FCB

Nomenclature		
Repère	Nombre des éléments	Désignation
1	2	Arbre de rotor
2	4	Palier
3	2	Plaque de broyage
4	36	Moyeux centraux de rotor
5	12	Axe port de marteaux
6	36	Marteaux
7	2	Volant d'inertie

Tableau 4-1 : tableau de désignation des éléments de concasseur FCB

3-2. La Commande de concasseur FCB :

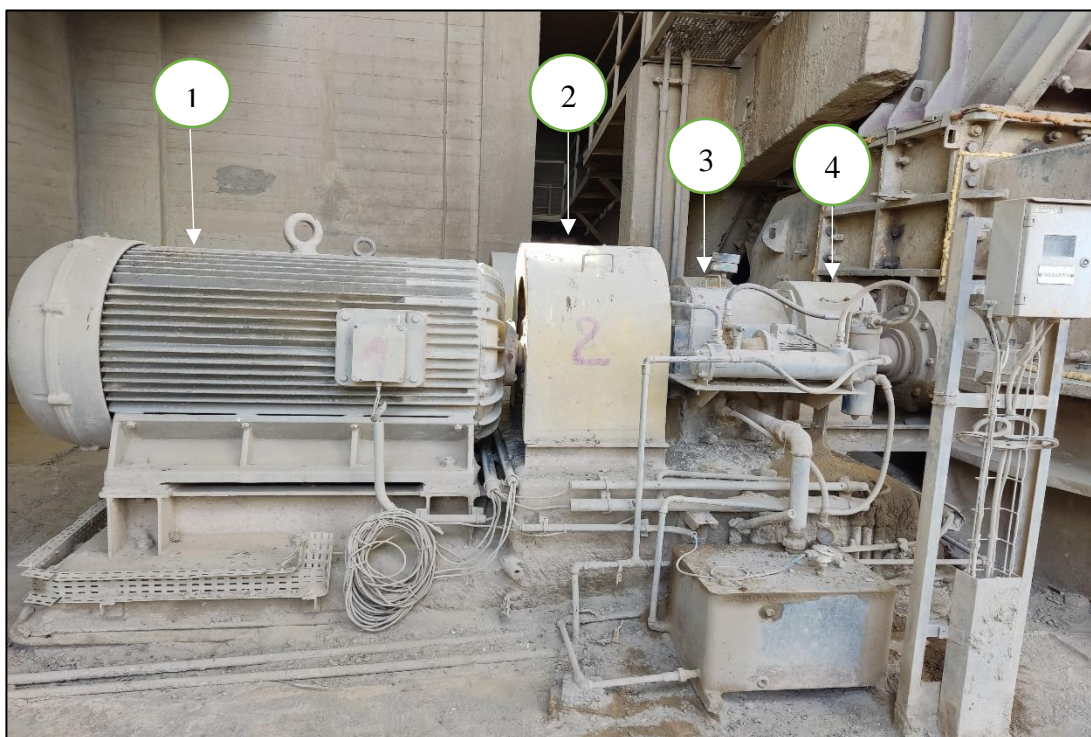


Figure 4-4 : Partie commande de concasseur FCB





REPERE	NOM D'ELEMENT	CARACTIRISTIQUE	PHOTO
1	Moteur asynchrone	Marque :Siemense Type : 1LA5508 U : 5.5KV VITESSE :1490 tr/mn I:49.5 A Puissance : 400KW Poids : 3500 Kg	
2	Accouplement hydraulique	Marque : VOITH Type :650TVA	
3	Réducteur	Marque: BCSA Type : UJS 755 P NR69100 Puissance : 400 KW tr/mn GV : 1490 PV : 570 tr/mn Rapport de transmission : 2.466 Volume d'huile : 80 l ISO VG 220 Hauteur d'axe : 410 Bout d'arbre Gv : 80 x 120 Bout d'arbre PV : 125 x 180 Joint SPI GV : 125/150/2 Joint SPI PV : 140/170/15 Poids 1100 Kg	
4	Accouplement flexacier	Marque : cmd Type : flexacier 28TL2	

Tableau 4-2 : les éléments partie commande de concasseur FCB

4. Etude expérimentale de concasseur FCB :

4-1. Le but de travail :

Le but de mon travail est le diagnostic des composants de la chaîne cinématique du concasseur à marteaux :(moteur, accouplement, réducteur, concasseur) par des méthodes vibratoires, qui me permettra d'apprécier l'état de marche et la détection des défauts qui puissent surgir de ces derniers.

4-2. Matériels utilisés :

a- Capteur de vibration utilisé : accéléromètre

On utilise comme type de capteur de genre **Piézoélectrique – accéléromètre** car ce type fourni plus d'avantages, on peut extraire l'accélération, la vitesse et le déplacement au même temps.

C'est un accéléromètre de type piézoélectrique raccordé au collecteur analyseur MOVIOLOG 02.



Figure 4-5 : Accéléromètre utilisé.

- **Marque** : 01dB-Stell
- **Principe**: Piézo-électrique avec amplificateur de charge intégré
- **Mode de fixation**: Aimant
- **Facteur de transmission**: 100 mV/g ou 10.2 mV/m/s²
- **Plage de fréquence**: [0-20] kHz
- **Fréquence propre**: 35 kHz
- **Plage de température**: [-15, +90] °C

b-Analyseur :**ONEPRODE MVP-200 :**

est un appareil portable de mesure de vibration offrant l'ensemble des outils nécessaires pour surveiller les machines tournantes et diagnostiquer leur état de fonctionnement. Sa modularité vous permet d'adapter ses fonctions aux besoins de votre application : Collecteur de données, Analyseur, Enregistreur, Equilibreur, Analyse d'ordre. Chaque module peut être utilisé avec 1 voie ou 2 voies de mesure.

Modes de fonctionnement:

- Niveau de vibration globale y compris la mesure, conformément à la norme ISO 2594.
- Condition de roulements (Défaut Factor).
- L'analyse spectrale.
- Zoom.
- Temps de forme d'onde.
- L'analyse d'enveloppe (en temps et en fréquence).
- Analyse de fréquence basse.
- Analyse synchrone.



Figure 4-6 : analyseur ONEPRODE MVP-200

b-Logiciel d'analyse :
ONEPROD NEST

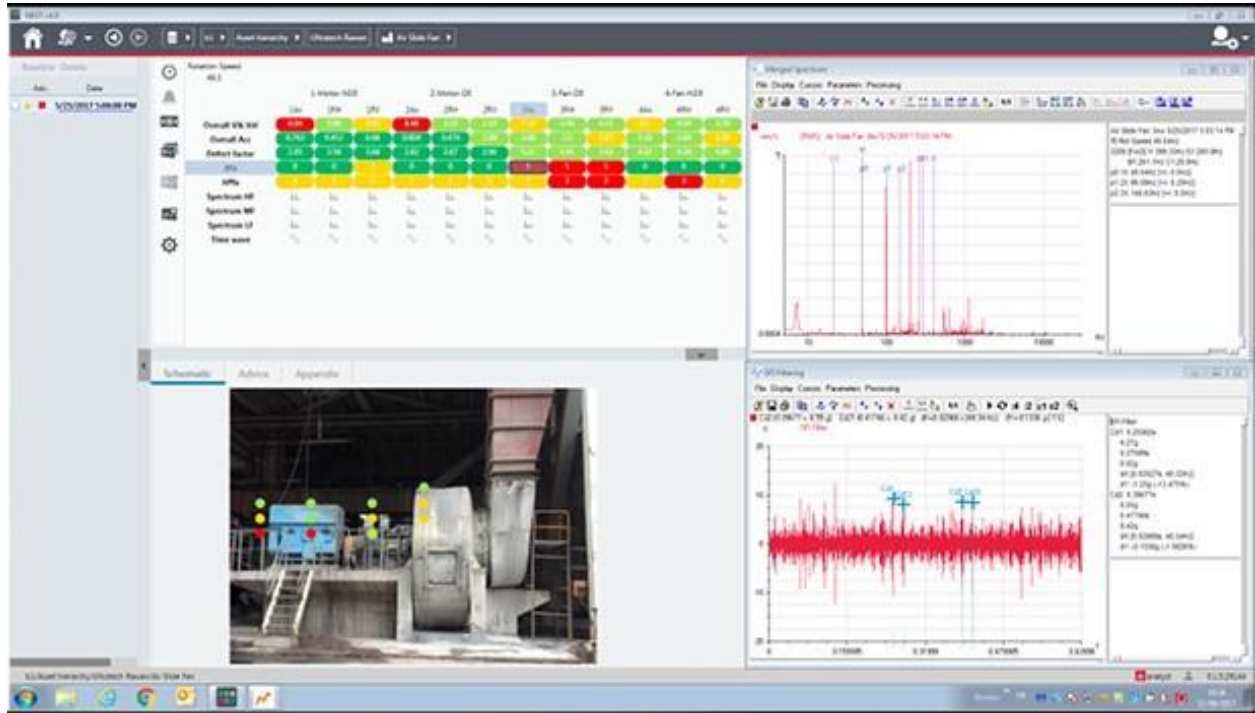


Figure 4-7 : Image du logiciel ONEPROD NEST

ONEPROD NEST est une suite logicielle dédiée à la maintenance prédictive, permettant de déterminer si des actions de maintenance ont besoin d'être planifiées grâce au suivi de l'état de santé des machines tournantes. Au travers de l'ensemble du process d'utilisation, la priorité est donnée à la facilité d'utilisation : configuration intuitive des machines, assistance à l'analyse automatisée, facilité d'accès aux rapports automatiques intégrés.

S'appuyant sur un savoir-faire unique de plus de 30 années d'expérience en analyse vibratoire, les données collectées de capteurs sans fil et analysées par des systèmes d'intelligence artificielle comme Accurex™ permettent de guider l'utilisateur dans ses tâches quotidiennes. La flexibilité d'architecture du logiciel permet l'affichage d'un ou plusieurs sites de production dans une même interface sur le cloud.

4-3. Normes

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

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

AFNOR E 90 300

ISO 2372

ISO 10-816

NIVEAUX VIBRATOIRES ADMISSIBLES SUR LES MACHINES TOURNANTES					
Norme AFNOR E 90-300 / ISO 2372					
Niveaux vibratoires admissibles (mm/s rms)	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	
Amplitude efficace de la Vitesse Vibratoire en <u>mm/s</u> RMS dans la bande [10 ; 1000] Hz				Mauvais	
	18.0		Mauvais	18.0	
		Mauvais			
	11.2		11.2	Limite	
	7.1		7.1	7.1	
	4.5	4.5	Limite	4.5	Moyen
	2.8	Limite	2.8	Moyen	2.8
	1.8	1.8	Moyen	1.8	
1.12	Moyen	1.12		Bon	
0.71	0.71	Bon	Bon		
	Bon				

Tableau 4-3 : Tableau des critères de vibration

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

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

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

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

4-4. Points de mesures du concasseur :

- Concasseur calcaire dragon « Côté SUD » :

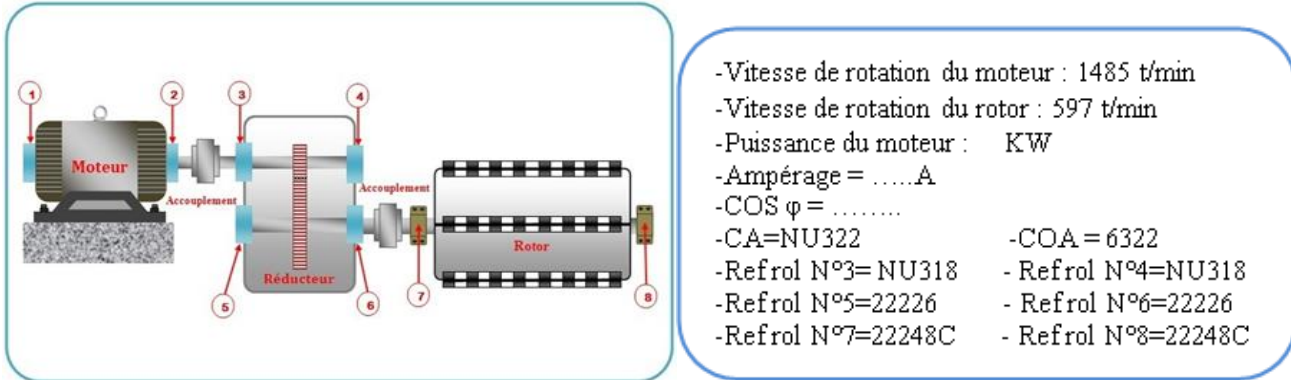
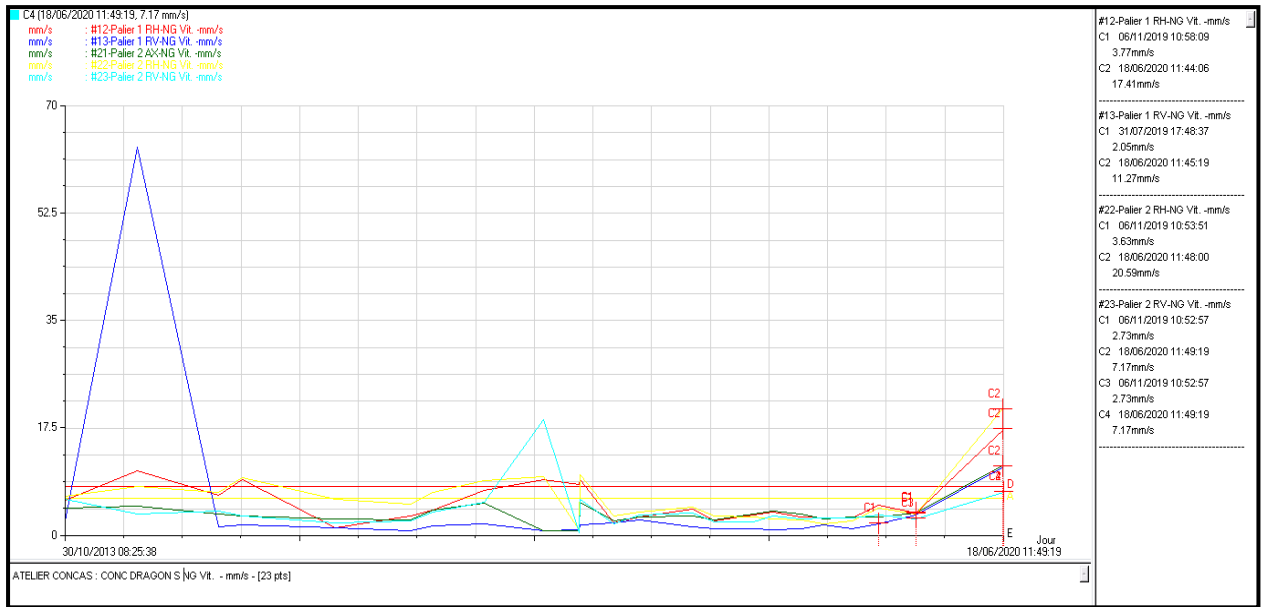


Figure 4-8 : Schéma cinématique et points de mesures de la machine

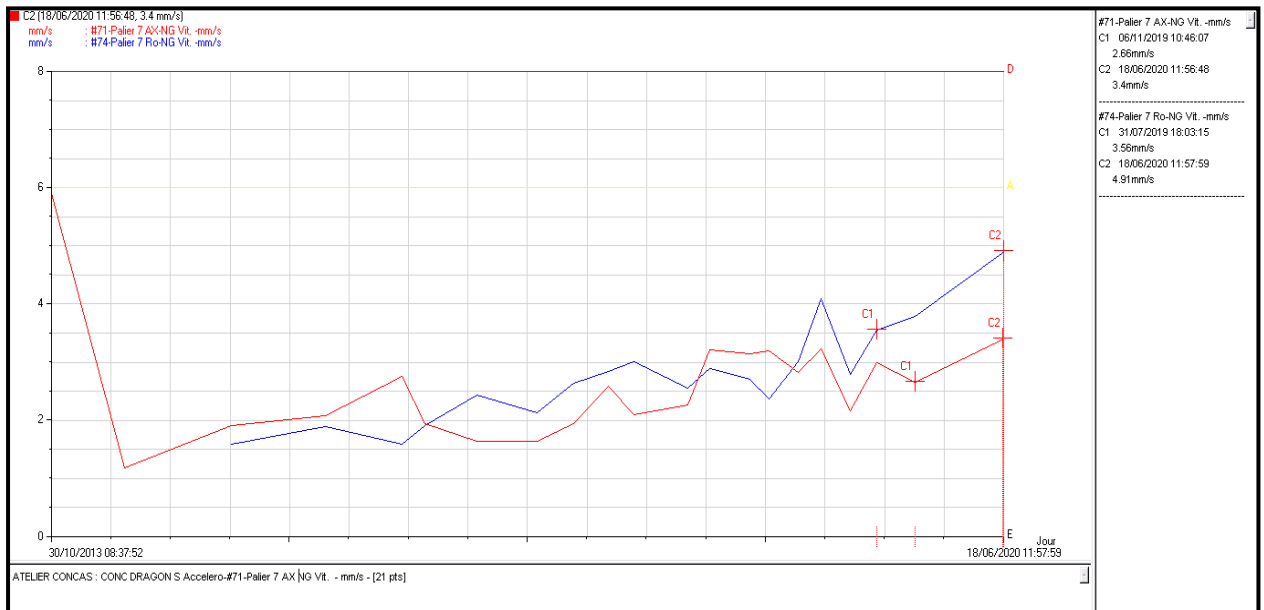
4-5. Campagne de suivi vibratoire moi de juin 2020 :

Ronde 'SCMI_AT CONCRASSAGE' du 18/06/2020											
CONC DRAGON S (1435 tr/mn)											
point	paramètre	uné	date	mes-1	mes	%	erreur	alarme	danger	diagnostic	
Palier 1 RH	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:43:57	0.4359	0.4504	3.326	0	2	4	BON	
Palier 1 RH	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:44:06	3.7702	17.417	361.9	0	6	8	DANGER HAUT	
Palier 1 RV	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:45:10	0.1038	0.4928	374.7	0	2	4	BON	
Palier 1 RV	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:45:19	3.5122	11.277	221	0	6	8	DANGER HAUT	
Palier 2 AX	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:46:35	1.3925	0.8206	-41	0	2	4	BON	
Palier 2 AX	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:46:44	3.8069	11.666	206.4	0	6	8	DANGER HAUT	
Palier 2 RH	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:47:51	0.9613	0.8416	-12.4	0	2	4	BON	
Palier 2 RH	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:48:00	3.6311	20.593	467.1	0	6	8	DANGER HAUT	
Palier 2 RV	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:49:10	0.72	0.6472	-10.1	0	2	4	BON	
Palier 2 RV	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:49:19	2.7397	7.1759	161.9	0	6	8	ALARME HAUT	
Palier 3 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:50:27	0.3107	0.7038	126.4	0	2	4	BON	
Palier 3 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:50:36	1.8787	1.8168	-3.29	0	6	8	BON	
Palier 4 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:51:45	0.3965	0.8089	104	0	2	4	BON	
Palier 4 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:51:54	1.9239	2.4603	27.88	0	6	8	BON	
Palier 5 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:52:58	0.2348	0.6278	167.3	0	2	4	BON	
Palier 5 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:53:07	1.7081	1.5903	-6.89	0	6	8	BON	
Palier 6 AX	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:54:11	0.4962	1.049	111.3	0	2	4	BON	
Palier 6 AX	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:54:20	4.3772	3.5271	-19.4	0	6	8	BON	
Palier 6 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:55:23	0.4944	0.8287	67.61	0	2	4	BON	
Palier 6 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:55:32	2.5228	2.2026	-12.6	0	6	8	BON	
Palier 7 AX	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:56:39	0.5934	2.1039	254.5	0	2	4	ALARME HAUT	
Palier 7 AX	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:56:48	2.6666	3.4074	27.78	0	6	8	BON	
Palier 7 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:57:50	1.2616	1.4198	12.53	0	2	4	BON	
Palier 7 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:57:59	3.7919	4.9118	29.53	0	6	8	BON	
Palier 8 Ro	IIG Acc.	g	18/06/2020 11:59:26	1.3397	1.2692	-5.26	0	2	4	BON	
Palier 8 Ro	IIG Vit.	mm/s	18/06/2020 11:59:35	2.1677	2.6241	21.05	0	6	8	BON	

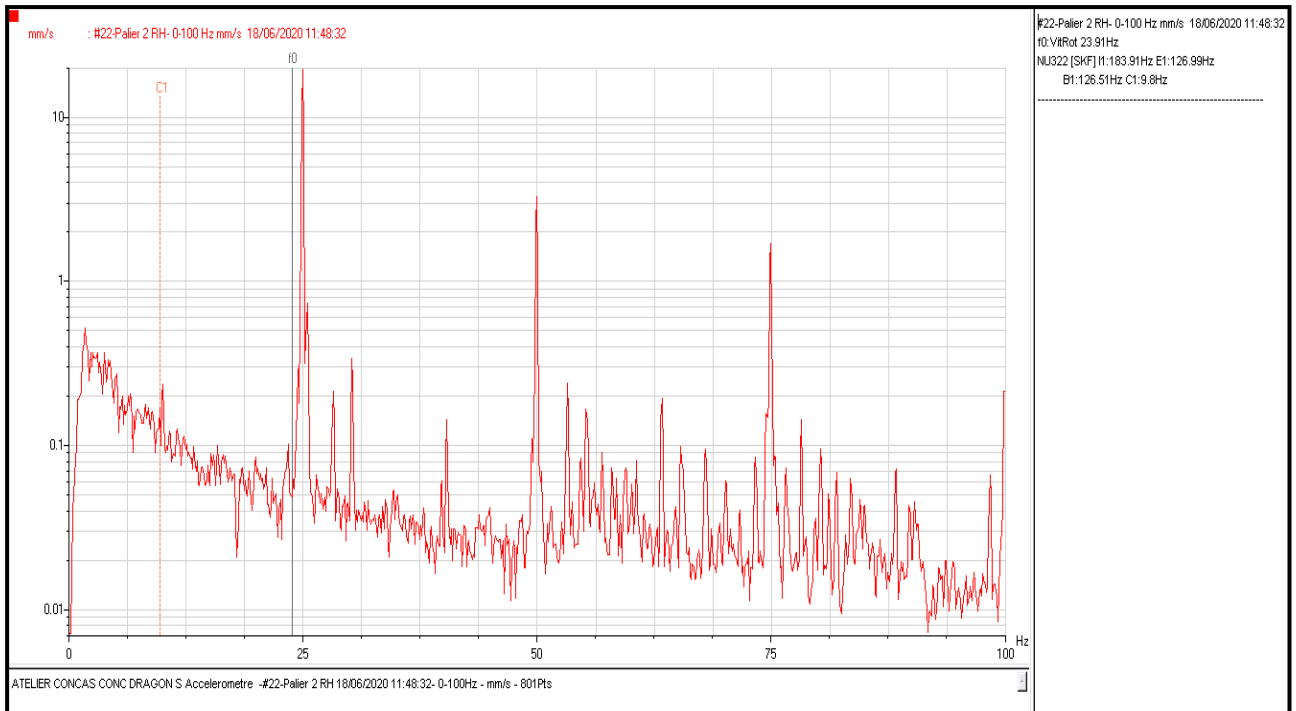
Tableau 4-4 : Tableau récapitulatif des niveaux vibratoires en vitesse « mm/s » et en accélération g



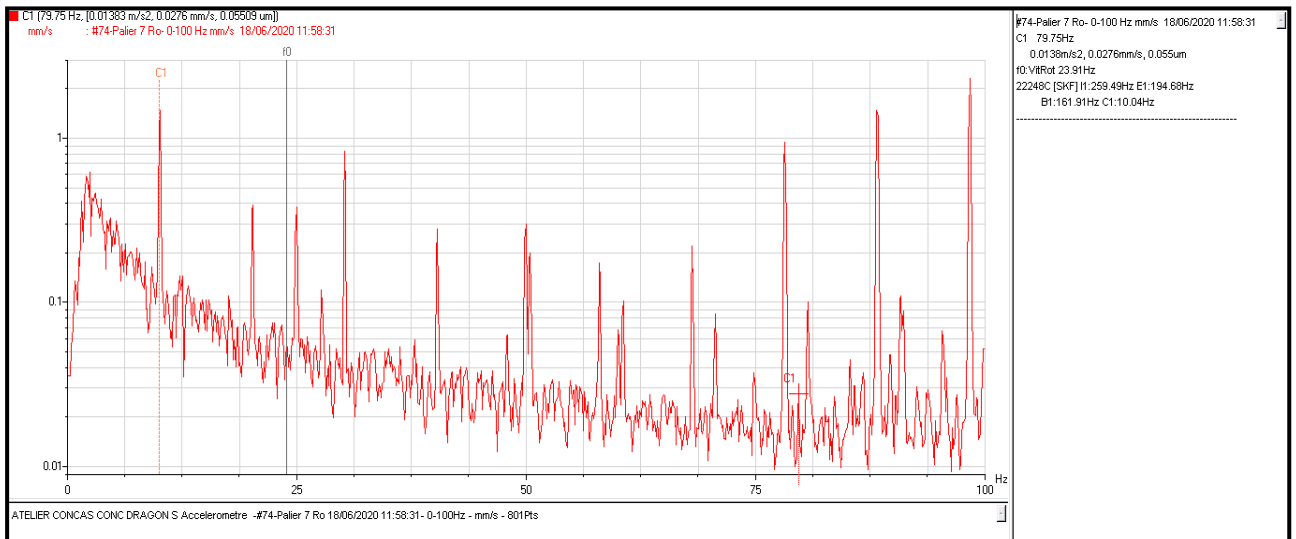
• **Figure 4-9** : courbe de tendance sur les deux paliers Moteur «N°1. N°2 », illustrant une évolution remarquable des niveaux en vitesse « mm/s »



• **Figure 4-10** : courbe de tendance sur le palier Rotor «N°7 », illustrant une évolution remarquable du niveau en vitesse « mm/s »



- **Figure 4-11:** image spectrale a la gamme de [0 – 100hz] , sur le palier Moteur « N°02RH », en position radiale horizontale, illustrant un balourd sur le Moteur de « 20mm/s »



- **Figure 4-12:** image spectrale a la gamme de [0 – 200hz] , sur le palier du rotor « N°07RO », en position oblique, illustrant un défaut de roulement

4-5-1. Résultats D'analyse :

Suite a l'analyse des courbes de tendance et les niveaux globaux, nous enregistrons des niveaux vibratoires en vitesse « **mm/s** » sont demeurent intolérables sur le palier Moteur coté Ventilateur de refroidissement « **N°01RH** » en direction radiale horizontale, le palier Moteur coté accouplement « **N°02RH** » en direction radiale horizontale et le palier; les , niveaux en accélération sur le palier supportant le rotor du Concasseur coté accouplement « **N°07RH** » **est demeurent intolérable**, suivant la norme **AFNOR 10826** des machines tournante ,« voir le schéma sus indiqué le tableau récapitulatif des niveaux vibratoires , **Figure 4-9, Figure 4-10, Figure 4-11, Figure 4-12 ci-dessus** ».

L'interprétation basée sur l'analyse spectrale a révélé

- Un balourd sur l'arbre du Moteur de « **20 mm/s** », **demeure intolérable.**
- Un choc sur les deux paliers du Moteur « **N°1.N°2** », **demeure intolérable.**
- Un défaut de roulement sur le palier « **N°7** », supportant le rotor du concasseur

Mesures à entreprendre :

Nous préconisons d'assurer les actions suivantes :

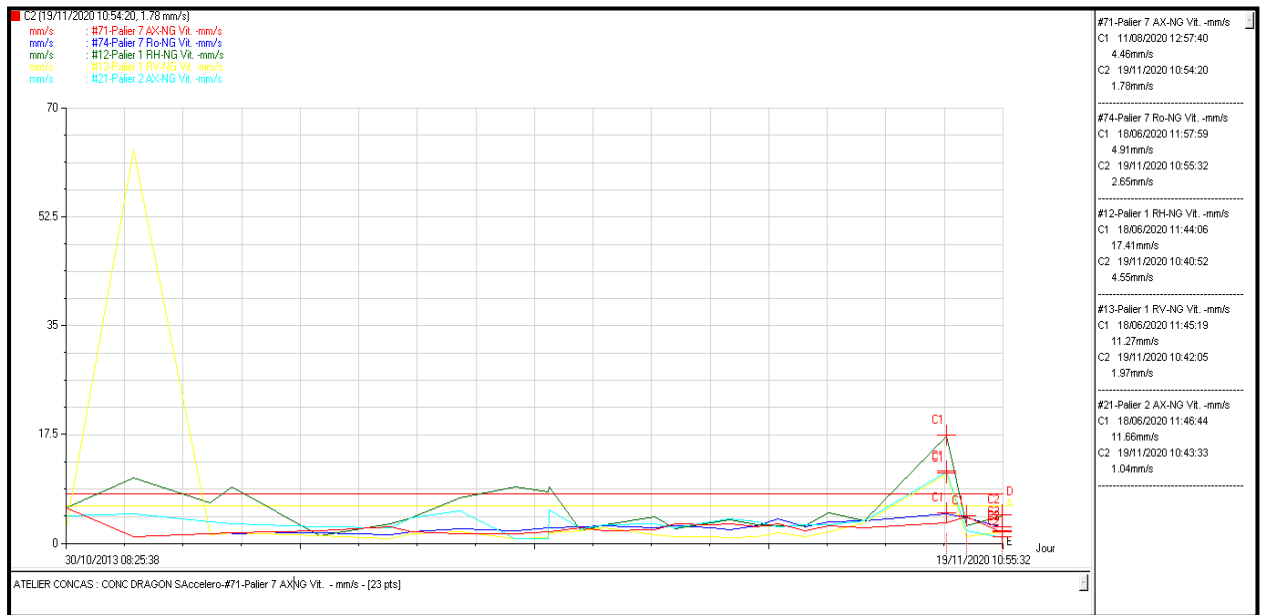
- Changement les doigts d'accouplement.
- L'alignement des deux arbres « Moteur / Rotor ».
- Changement le roulement sus-indiqué

4-6. CAMPAGNE DE SUIVI VIBRATOIRE MOI DE NOVEMBRE 2020

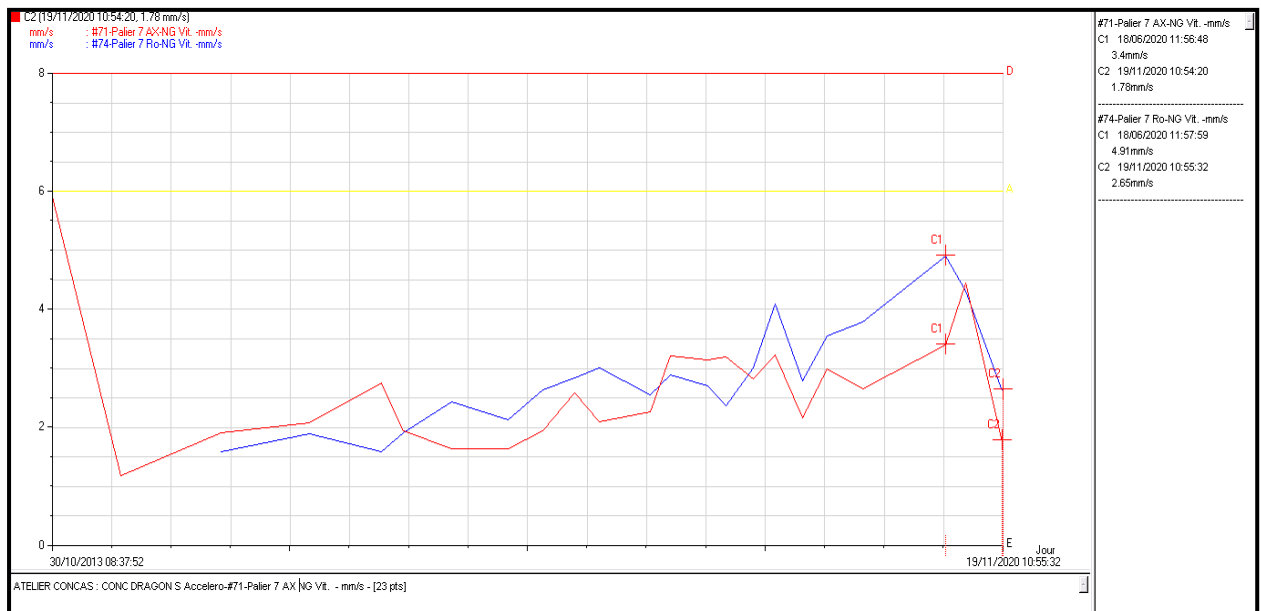
« après l'intervention sur le concasseur »

Ronde 'SCMI_AT CONCASSAGE' du 19/11/2020										
CONC DRAGON S (1435 tr/mn)										
point	paramètre	unité	date	mes-1	mes	%	erreur	alarme	danger	diagnostic
Palier 1 RH	IG Acc.	g	19/11/2020 10:40:43	0.3542	0.2935	-17.1	0	2	4	BON
Palier 1 RH	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:40:52	2.9805	0.5565	52.87	0	6	8	BON
Palier 1 RV	IG Acc.	g	19/11/2020 10:41:56	0.1182	0.1134	-3.99	0	2	4	BON
Palier 1 RV	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:42:05	1.138	1.9716	73.24	0	6	8	BON
Palier 2 AX	IG Acc.	g	19/11/2020 10:43:24	1.2896	0.3977	-69.1	0	2	4	BON
Palier 2 AX	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:43:33	2.171	1.0453	-51.8	0	6	8	BON
Palier 2 RH	IG Acc.	g	19/11/2020 10:44:44	1.6867	0.921	-45.3	0	2	4	BON
Palier 2 RH	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:45:32	3.6183	1.8458	89.19	0	6	8	BON
Palier 2 RV	IG Acc.	g	19/11/2020 10:46:53	1.5132	0.6364	-57.9	0	2	4	BON
Palier 2 RV	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:47:02	1.8898	1.4558	-22.9	0	6	8	BON
Palier 3 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:48:12	0.5925	1.1985	102.2	0	2	4	BON
Palier 3 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:48:21	1.7185	2.0378	18.57	0	6	8	BON
Palier 4 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:49:26	0.8171	1.5372	88.12	0	2	4	BON
Palier 4 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:49:35	1.9901	2.5895	30.11	0	6	8	BON
Palier 5 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:50:42	0.5132	0.8225	60.27	0	2	4	BON
Palier 5 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:50:51	1.7845	1.5082	-15.4	0	6	8	BON
Palier 6 AX	IG Acc.	g	19/11/2020 10:51:58	0.7724	1.4448	87.06	0	2	4	BON
Palier 6 AX	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:52:07	3.5192	0.2945	-6.38	0	6	8	BON
Palier 6 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:53:03	0.7225	0.8933	23.64	0	2	4	BON
Palier 6 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:53:12	2.137	1.6298	-23.7	0	6	8	BON
Palier 7 AX	IG Acc.	g	19/11/2020 10:54:11	1.6157	0.2552	-84.2	0	2	4	BON
Palier 7 AX	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:54:20	4.4646	1.7857	-60	0	6	8	BON
Palier 7 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:55:23	1.3364	0.4369	-67.3	0	2	4	BON
Palier 7 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:55:32	4.3235	0.6547	-38.5	0	6	8	BON
Palier 8 Ro	IG Acc.	g	19/11/2020 10:57:01	0.3783	0.7145	88.83	0	2	4	BON
Palier 8 Ro	IG Vit.	mm/s	19/11/2020 10:57:10	3.0315	1.0885	-64	0	6	8	BON

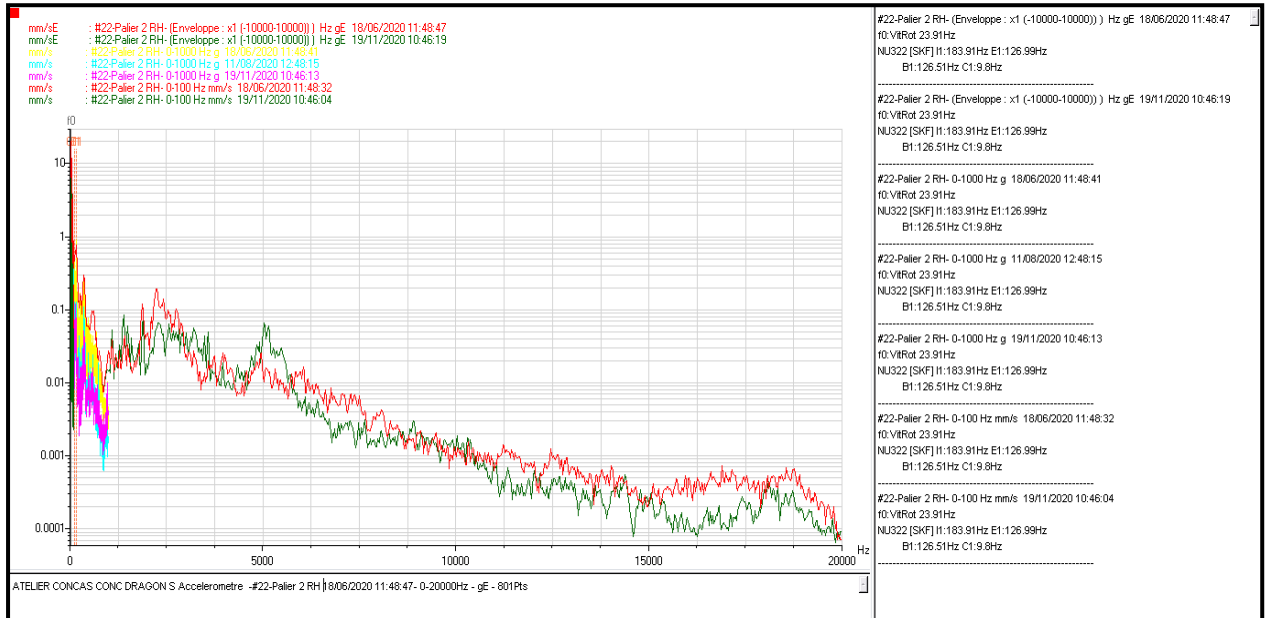
Tableau 4-5 : Tableau récapitulatif des niveaux vibratoires en vitesse « mm/s » et en accélération g



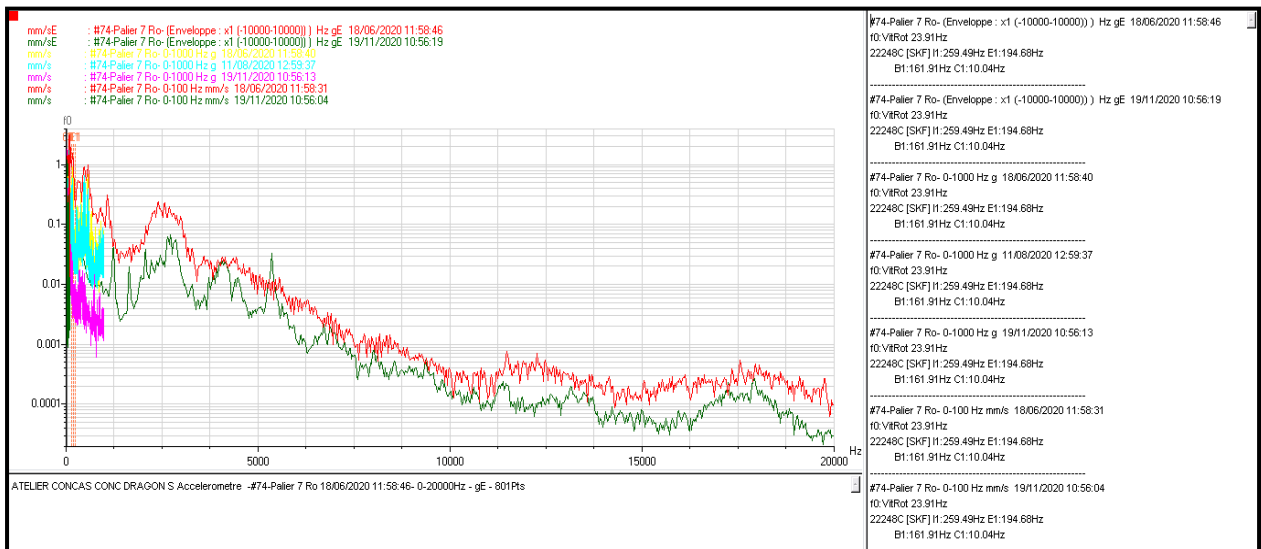
● **Figure 4-13** : courbe de tendance sur les deux paliers Moteur «N°1. N°2 », illustrant une amélioration remarquable des niveaux en vitesse « mm/s »



● **Figure 4-14** : courbe de tendance sur le palier Rotor en position oblique «N°7RO », illustrant l'amélioration du niveau en vitesse « mm/s »



• **Figure 4-15** : spectrale a la gamme de [0 – 200hz] , sur le palier Moteur « N°02RH », en position radiale horizontale.



• **Figure 4-16** : image spectrale superposé, sur le palier du rotor « N°07RO », en position oblique

4-6-1. Résultats D'analyse :

Après l'intervention sur l'équipement, suite à l'analyse des courbes de tendance, et les niveaux globaux, nous enregistrons une amélioration remarquable des niveaux vibratoires en vitesse « mm/s », sur l'ensemble des paliers du concasseur, en particulier les paliers Moteur « N°1.N°2 » et le palier « N°7 » supportant le rotor du concasseur, suivant la norme AFNOR 10826 des machines tournante, « voir tableau récapitulatif des niveaux vibratoires et **Figure 4-13, Figure 4-14, Figure 4-15, Figure 4-16**, cités ci-dessus ».

L'interprétation basée sur l'analyse spectrale a révélé que le comportement vibratoire du concasseur **demeure satisfaisant.**

chapitre 5 : Conception et simulation de rotor de concasseur FCB

1. Introduction :

Cette partie d'étude, nous permet d'établir une analyse modale numérique du système. A travers la conception et la simulation numérique du système par ANSYS, nous avons déterminé les modes et fréquences propres du système. La simulation est faite sur le rotor sans les marteaux avec la volant d'inertie figure 1

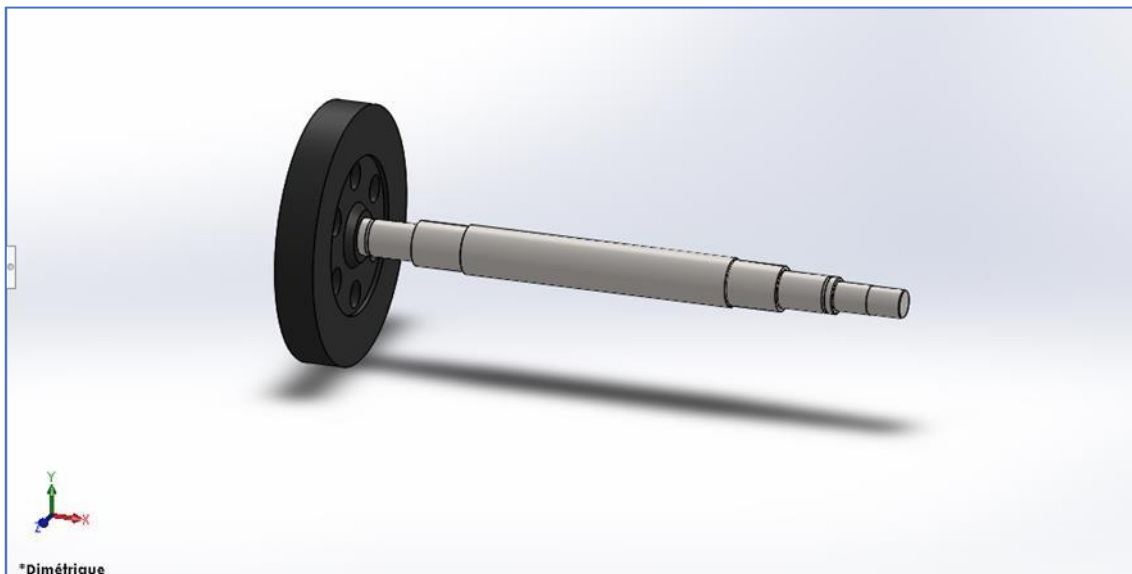


Figure 5.1: arbre et volant d'inertie

2. Les propriétés de simulation :

2-1. 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. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

2-2. Les propriétés physiques des éléments du rotor



Référence du modèle	Propriétés	Composants
	<p>Nom: 0.7043 (EN-GJS-400-18-LT)</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Inconnu</p> <p>Limite d'élasticité: 2.5e+008 N/m²</p> <p>Limite de traction: 4e+008 N/m²</p> <p>Masse volumique: 7250 kg/m³</p> <p>Module d'élasticité: 1.2e+011 N/m²</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.26</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: 1.2e-005 /Kelvin</p>	VOLANT D'INERTIE
	<p>Nom: 1.6582 (34CrNiMo6)</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Inconnu</p> <p>Limite d'élasticité: 1e+009 N/m²</p> <p>Limite de traction: 1.2e+009 N/m²</p> <p>Masse volumique: 7800 kg/m³</p> <p>Module d'élasticité: 2.1e+011 N/m²</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.28</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: 1.1e-005 /Kelvin</p>	ARBRE

Tableau 5.1 : les matériaux

Nom de l'objet	ARBRE	VOLANT D'INERTIE
Etat	Maillé	
Propriétés graphiques		
Visible	Oui	
Transparence	1	
Définition		
Désactivé	Non	
Comportement de raideur	Flexible	
Système de coordonnées	Système de coordonnées par défaut	
Température de référence	Par environnement	
Comportement	Aucun	
Matériau		
Affectation	Acier	Fonte grise
Effets non linéaires	Oui	
Effets de déformation thermique	Oui	

Propriétés		
Volume	2,4387e+008 mm ³	5,0472e+008 mm ³
Masse	1914,4 kg	3634, kg
Coord. X du centre de gravité	1667,4 mm	-134,62 mm
Coord. Y du centre de gravité	2226,4 mm	
Coord. Z du centre de gravité	2863,9 mm	
Statistiques		
Nœuds	23543	3372
Éléments	13923	1828
Paramètres de maillage	Aucun	

2-3. Maillage

Nom de l'objet	<i>Maillage</i>
Etat	Résolu
Affichage	
Style d'affichage	Utiliser les réglages de géométrie
Réglages par défaut	
Physique de préférence	Mécanique
Ordre des éléments	Contrôlé par le programme
Taille des éléments	Par défaut
Qualité	
Vérifier la qualité du maillage	Oui, Erreurs
Contrôle de forme	Mécanique standard
Qualité cible	Par défaut (0.050000)
Lissage	Moyen
Paramètres de maillage	Aucun
Statistiques	
Nœuds	26915
Éléments	15751

Tableau 5.2 : les paramètre de maillage

3. Analyse modal stationnaire : vitesse de rotation = 0 tr/min :

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

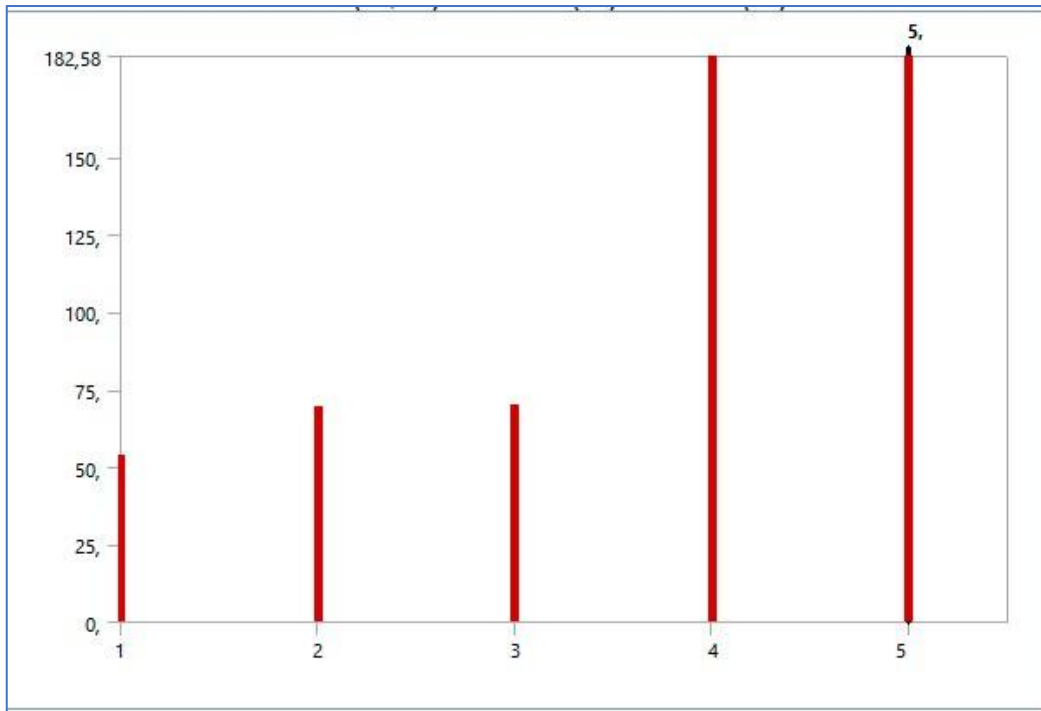


Figure 5.2 :Le graphique de la fréquence spécifique de chaque mode calculé

Nom de l'objet	Déplacement total	Déplacement total 2	Déplacement total 3	Déplacement total 4	Déplacement total 5
Etat	Résolu				
Champ d'application					
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie				
Géométrie	Tous les corps				
Définition					
Type	Déplacement total				
Mode	1,	2,	3,	4,	5,
Résultats					
Minimum	0, mm				
Maximum	0,71196 mm	1,0006 mm	1,0005 mm	1,2196 mm	1,2194 mm
Nodal moyenné	5,6914e-002 mm	5,5947e-002 mm	5,564e-002 mm	0,11206 mm	0,11143 mm
Valeur minimale sur	ARBRE				
Valeur maximale sur	VOLANT D'INERTIE			ARBRE	
Informations					
Fréquence	54,026 Hz	69,716 Hz	69,971 Hz	182,37 Hz	182,58 Hz

Tableau 5.3 : résultat de simulation

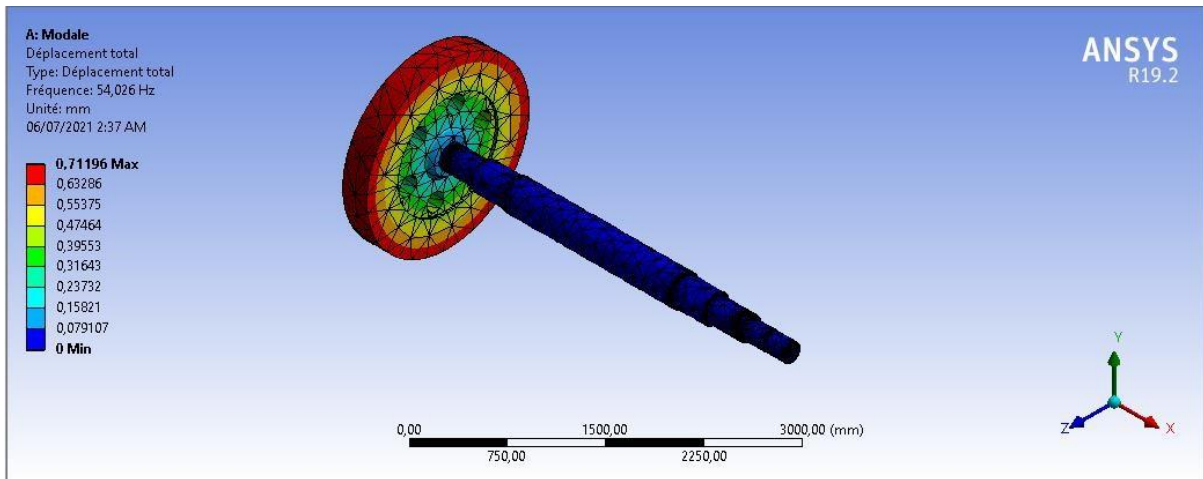


Figure 5.3: Mode 1 54,026 Hz torsion sur l'axe X

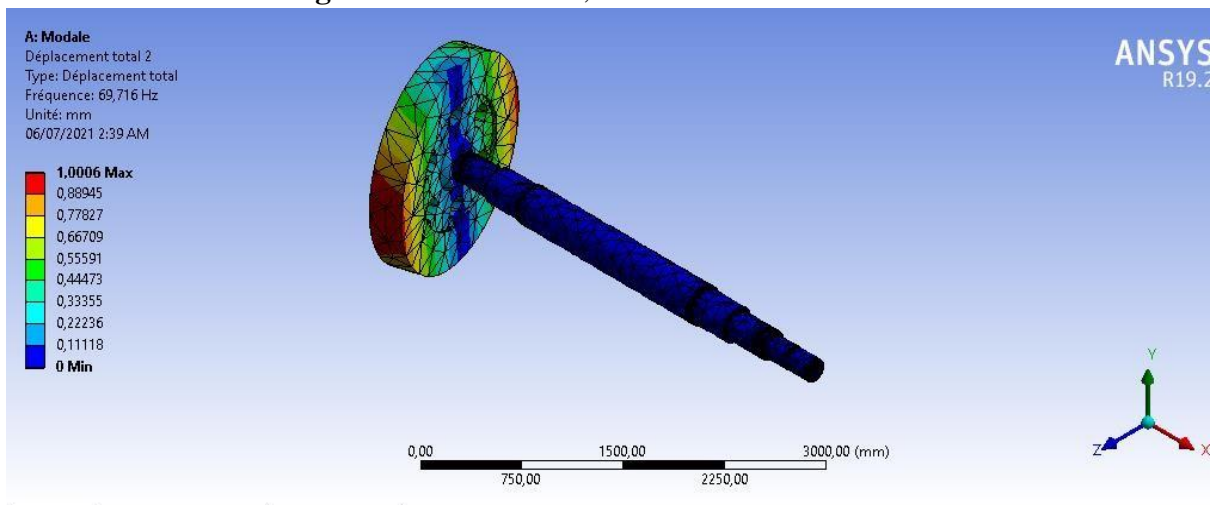


Figure 5.4: Mode 2 69,716 Hz flexion sur l'axe Y

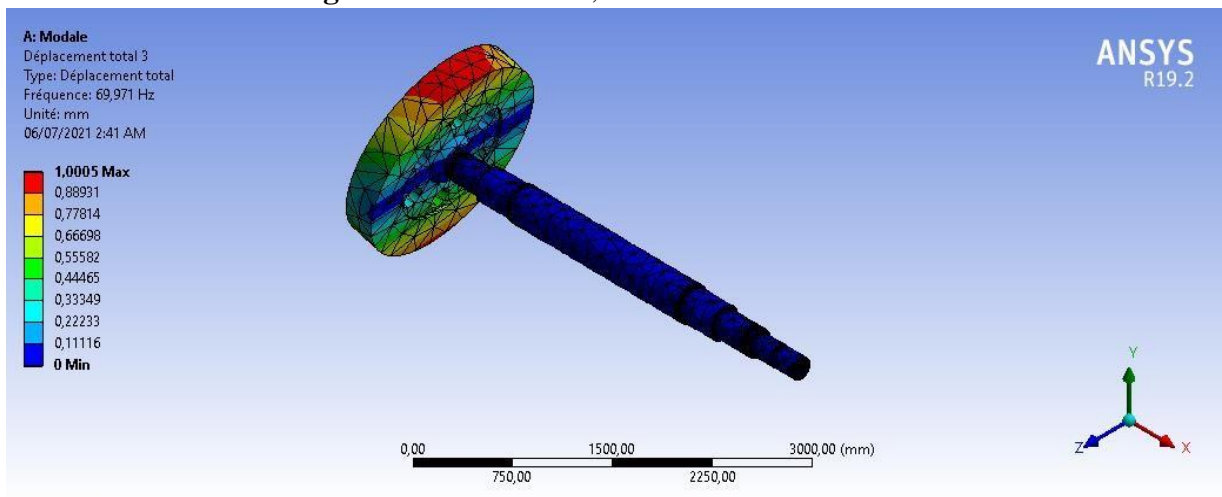


Figure 5.5: Mode 3 69,971 Hz Flexion sur l'axe Z

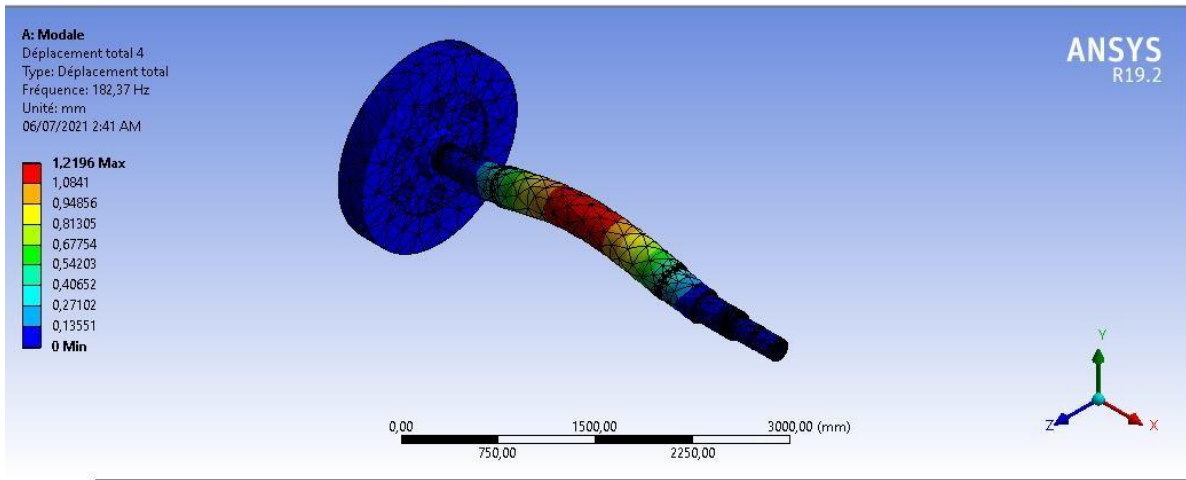


Figure 5.6: Mode 4 182,37 Hz flexion sur l'axe Y

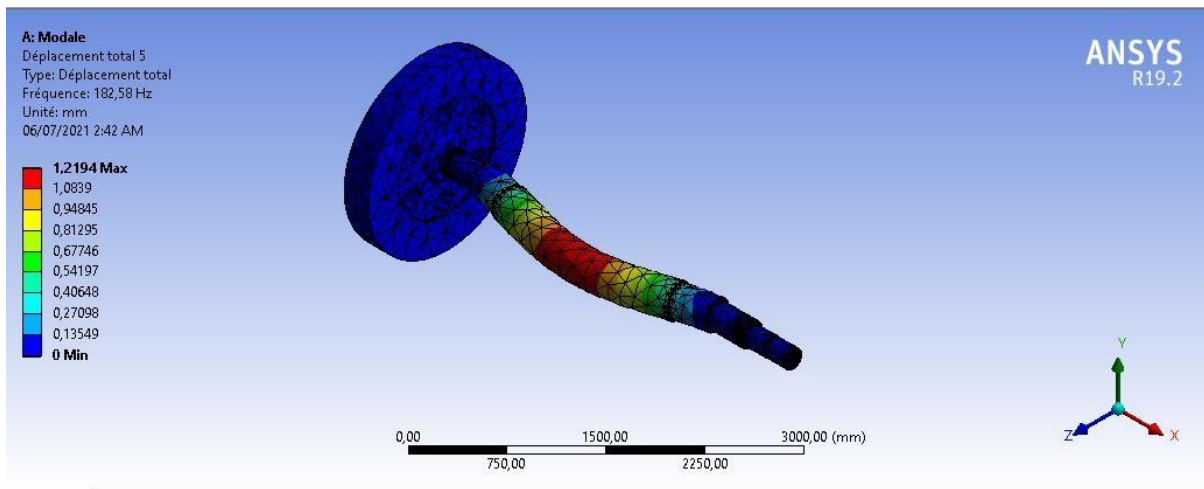


Figure 5.7: Mode 5 182,58 Hz flexion sur l'axe Z

4. **Analyse modal rotationnelle** : vitesse de rotation de rotor = 570 tr/min Dans ce cas on a déterminé les vitesses critiques à partir le diagramme de Campbell tel qu'on a prolongé la vitesse de rotation dans le diagramme à 5000tr/min, pour voir la position de la vitesse critique de rotation de rotor

La Vitesse de rotation :

Points	X [tr/min]	Y [tr/min]	Z [tr/min]
1	500,		
2	2000,	0,	0,
3	5000,		

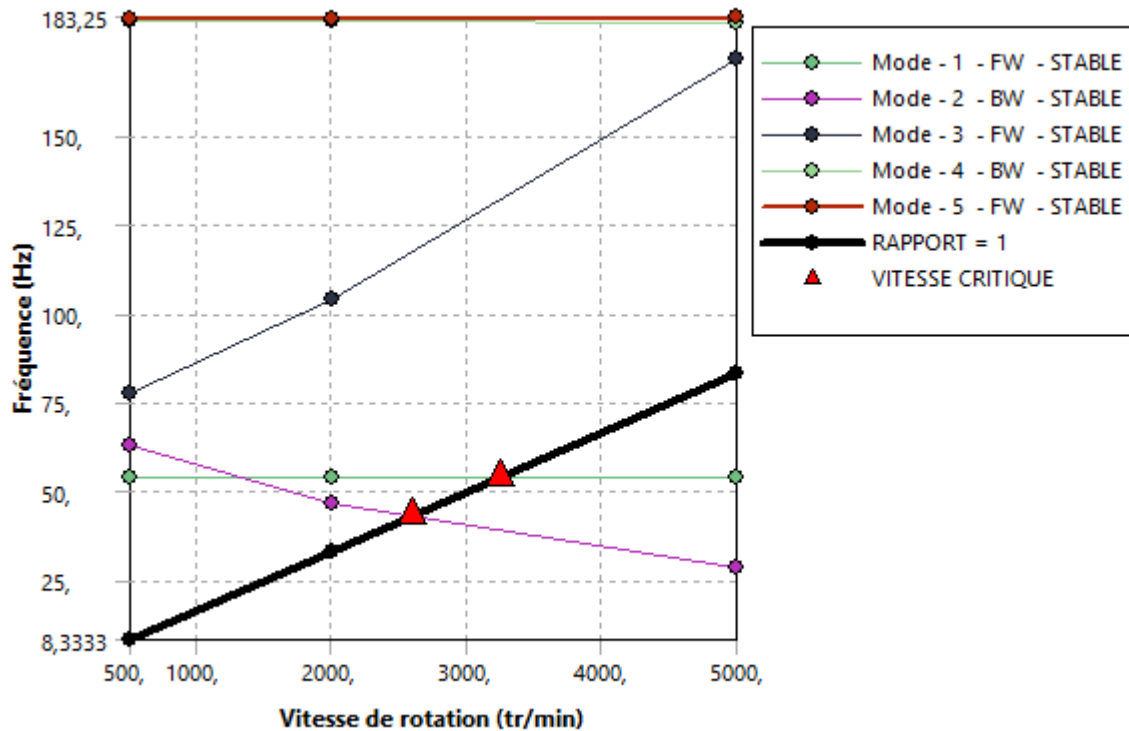


Figure 5.8: Diagramme de Campbell

Dans le diagramme de Campbell on utilisant la commande SLOPE = 1, qui permet de tracer une ligne à partir de zéro, afin de définir les points qui représentent les vitesses critiques.

Nom de l'objet	Diagramme de Campbell 2
Etat	Résolu
Champ d'application	
Sélection de la vitesse de rotation	Vitesse de rotation
Contrôles du diagramme de Campbell	
Données de l'axe Y	Fréquence
Vitesse critique	Oui
Rapport	1,
Tri	Oui
Axe	
Libellé d'axe X	Vitesse de rotation
Plage de l'axe X	Contrôlé par le programme
Minimum de l'axe X	500, RPM
Maximum de l'axe X	5000, RPM
Libellé d'axe Y	Fréquence
Plage de l'axe Y	Contrôlé par le programme
Minimum de l'axe Y	8,3333 Hz
Maximum de l'axe Y	183,25 Hz

Tableau 5.4: les paramètre de diagramme de Campbell

Tableau de résultat :

Mode	Vitesse critique	500, tr/min	2000, tr/min	5000, tr/min
1,	3241,6 tr/min	54,026 Hz	54,026 Hz	54,026 Hz
2,	2592,3 tr/min	63,047 Hz	46,842 Hz	28,417 Hz
3,	0, tr/min	77,373 Hz	104,14 Hz	171,66 Hz
4,	0, tr/min	182,35 Hz	182,15 Hz	181,71 Hz
5,	0, tr/min	182,61 Hz	182,8 Hz	183,25 Hz

Tableau 5.5 : résultats d'analyses modale rotationnelle

Observation :

on observe qu'il y a deux vitesse critique 3241,6 tr/min 2592,3 tr/min sure le mode 1 et 2 très grand a la vitesse de rotation de rotor 570 tr/ min pour qu'ils ne soient pas pris en compte

5. les contraintes

Nom de l'objet	<i>Contrainte de cisaillement</i>	<i>Déformation élastique équivalente</i>
Etat	Résolu	
Champ d'application		
Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie	
Géométrie	Tous les corps	
Définition		
Type	Contrainte de cisaillement	Déformation élastique équivalente
Orientation	Plan XY	
Résultats des points d'intégration		
Option d'affichage	Moyenne	
Moyenne sur les corps	Non	
Résultats		
Minimum	-2,9925e-003 MPa	9,374e-020 mm/mm
Maximum	3,1109e-003 MPa	3,9681e-008 mm/mm
Nodal moyenné	1,4427e-005 MPa	2,0223e-009 mm/mm
Valeur minimale sur	ARBRE	
Valeur maximale sur	ARBRE	
Informations		
Mode	1	
Fréquence amortie	54,026 Hz	
Stabilité	0, Hz	

Tableau 5.6 : les contraintes

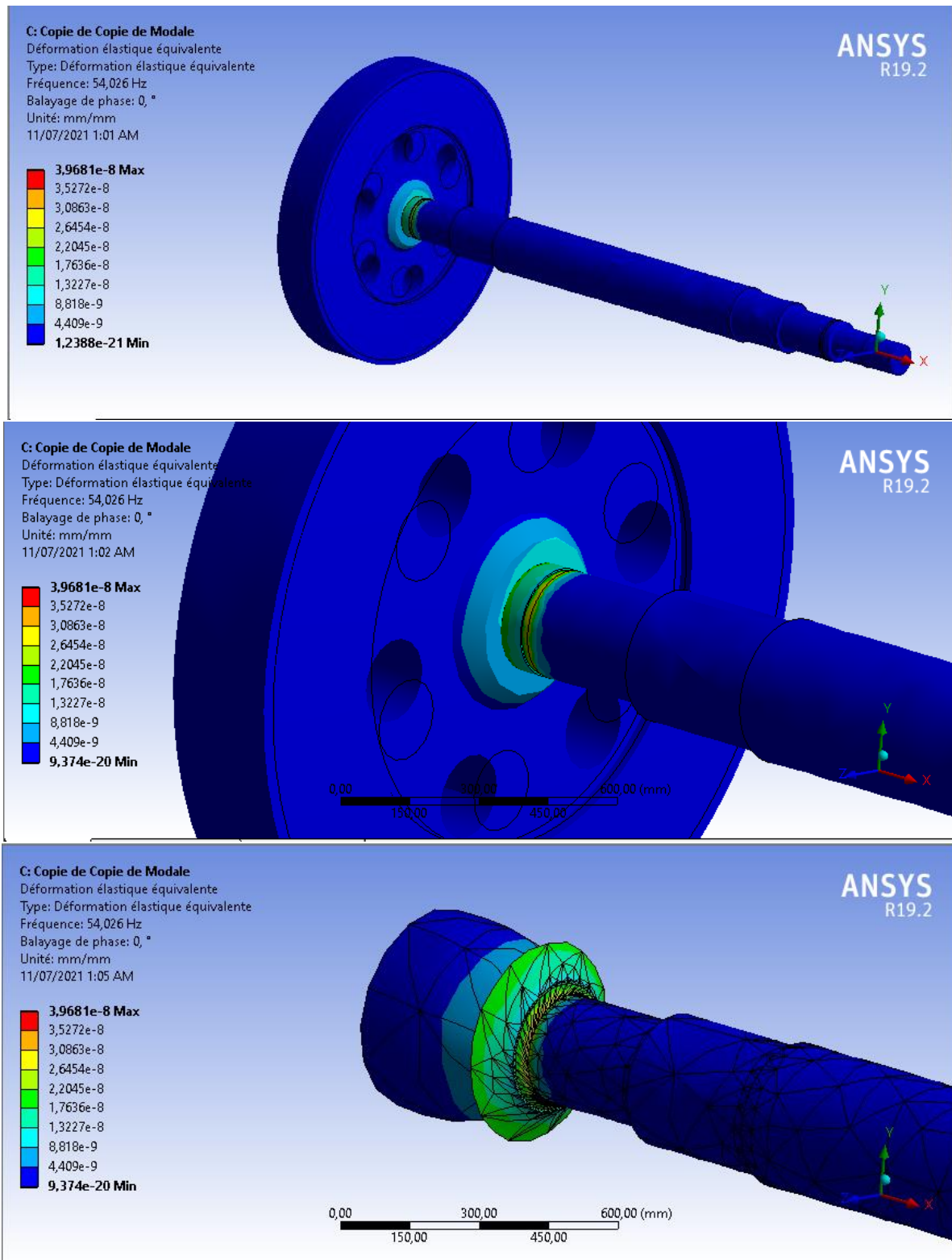


Figure 5.9: déformation élastique équivalente

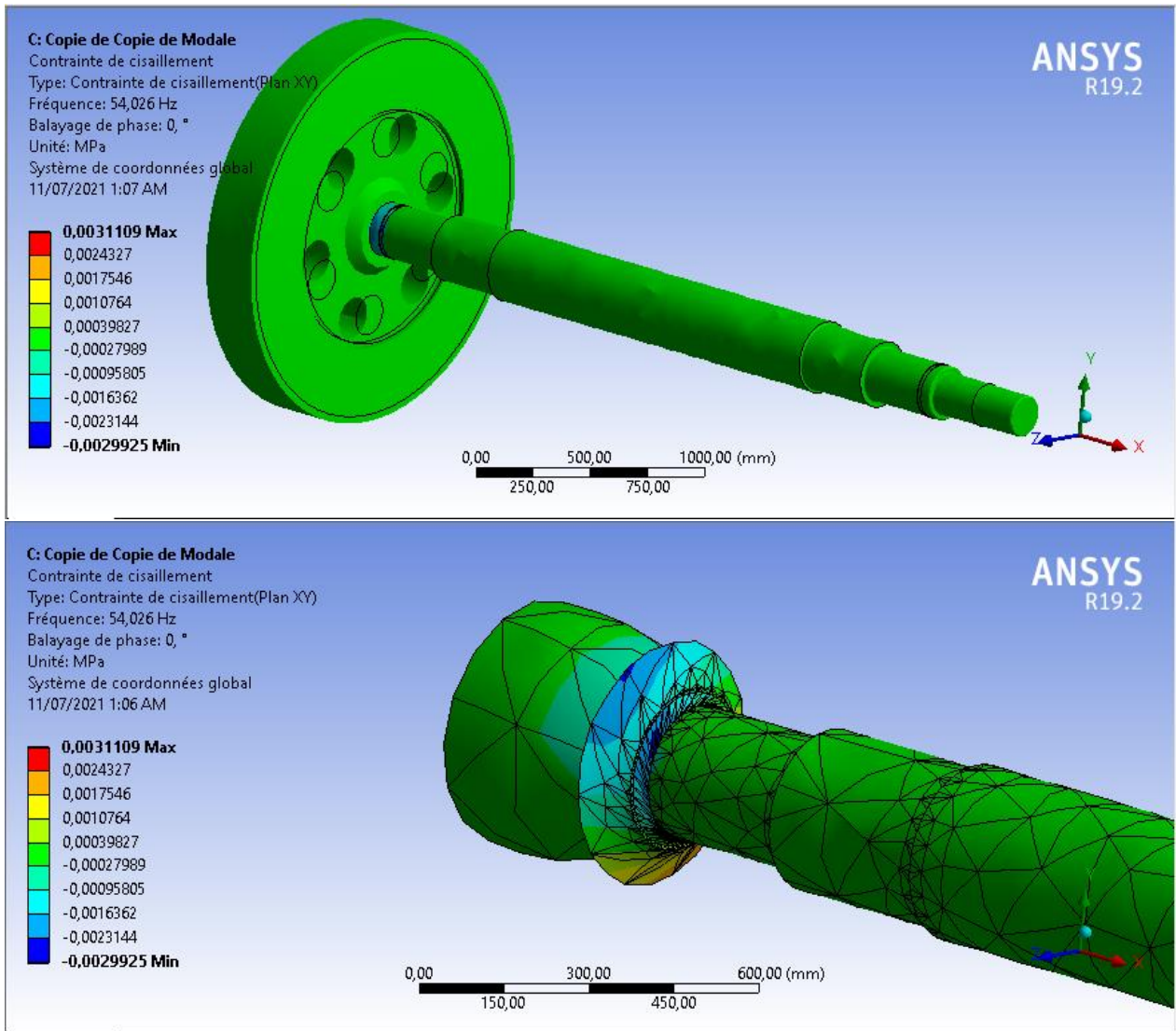


Figure 5.10: contrainte de cisaillement



Comme la simulation

Figure 5.11: arbre cisillé de concasseur FCB

Observation :

Nous notons que cette partie de l'arbre est la vulnérable a cisaillement , alors nous suggérons donc de la redessiner , en tente compte de ces résultats

5. Conclusion

L'application de l'analyse modale détermine les fréquences et les modes propres qui définissent les caractéristiques physiques du rotor dans le cas stationnaire et le cas rotationnel . dans le dernier cas en peut trouver les fréquences naturelles de définir les vitesses critique qui exciter .

Conclusion générale

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.

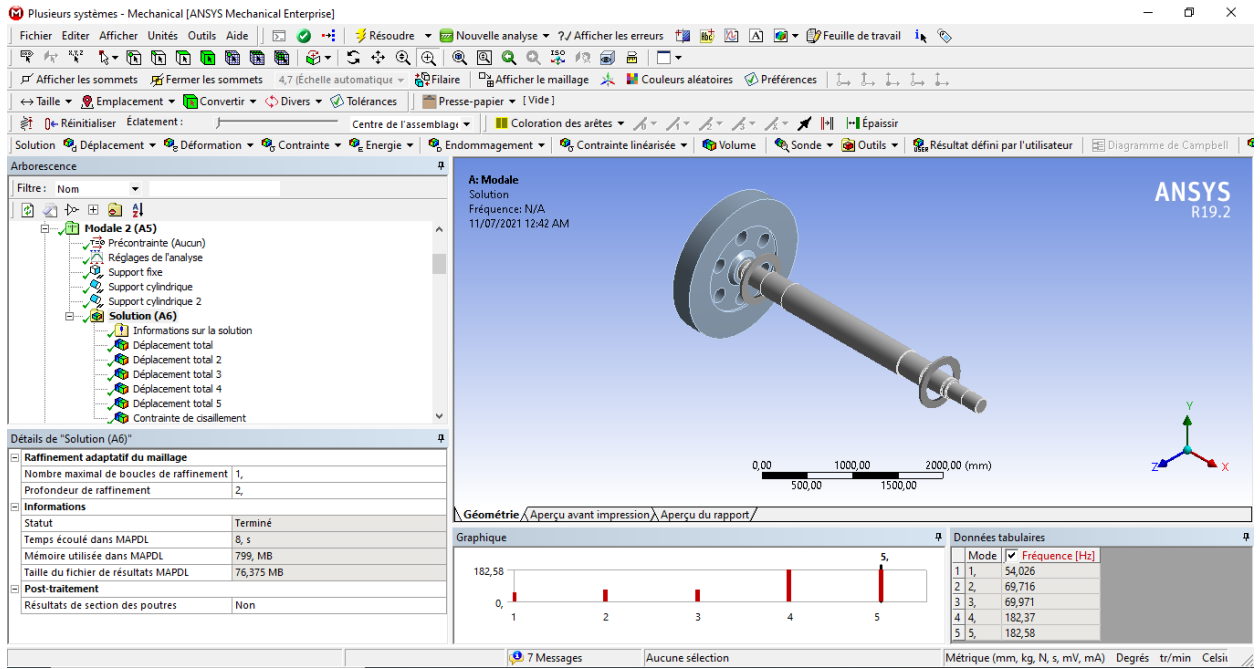
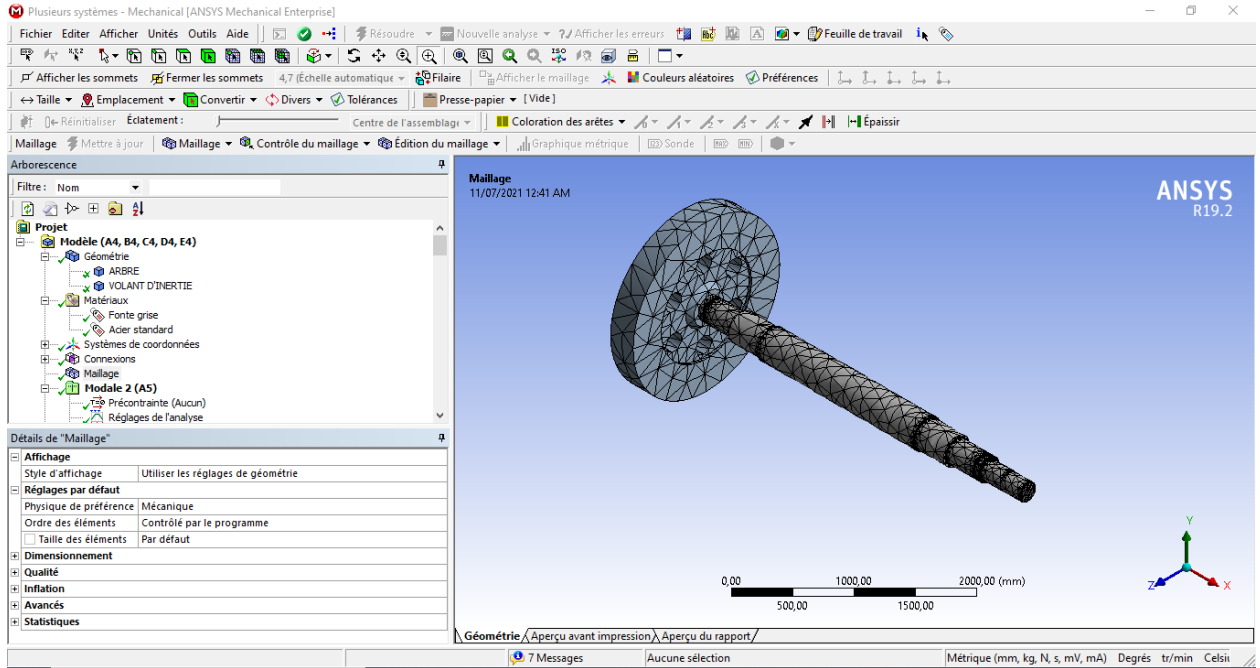
Pour faire face à ces nouveaux enjeux, la maintenance doit faire appel à des techniques d'investigation modernes très spécifiques telles que l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, l'analyse des lubrifiants,...

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 qu'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 a celle de la rotation.

Annex



Plusieurs systèmes - Mechanical [ANSYS Mechanical Enterprise]

Fichier Editer Afficher Unités Outils Aide

Résoudre Nouvelle analyse ?/ Afficher les erreurs

Afficher les sommets Fermer les sommets 4,7 (Échelle automatique) Filaire Afficher le maillage Couleurs aléatoires Préférences

Centre de l'assemblage

Solution Déplacement Déformation Contrainde Energie Endommagement Contrainde linéarisée Volume Sonde Outils Résultat défini par l'utilisateur Diagramme de Campbell

Arborescence

- Modèle 2 (A5)
 - Précontrainte (Aucun)
 - Réglages de l'analyse
 - Support fixe
 - Support cylindrique
 - Support cylindrique 2
 - Solution (A6)
 - Informations sur la solution
 - Déplacement total
 - Déplacement total 2
 - Déplacement total 3
 - Déplacement total 4
 - Déplacement total 5
 - Contrainde de cisaillement

Détails de "Solution (A6)"

Raffinement adaptatif du maillage

Nombre maximal de boucles de raffinement 1, Profondeur de raffinement 2,

Informations

Statut Terminé, Temps écoulé dans MAPDL 8, s, Mémoire utilisée dans MAPDL 799, MB, Taille du fichier de résultats MAPDL 76,375 MB

Post-traitement

Résultats de section des poutres Non

A: Modale
Solution
Fréquence: N/A
11/07/2021 12:42 AM

ANSYS R19.2

Géométrie Aperçu avant impression Aperçu du rapport/

Graphique

Données tabulaires

Mode	Fréquence [Hz]
1	54,026
2	69,716
3	69,971
4	182,37
5	182,58

Métrique (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrés tr/min Celsi

Plusieurs systèmes - Mechanical [ANSYS Mechanical Enterprise]

Fichier Editer Afficher Unités Outils Aide

Résoudre Nouvelle analyse ?/ Afficher les erreurs

Afficher les sommets Fermer les sommets 4,7 (Échelle automatique) Filaire Afficher le maillage Couleurs aléatoires Préférences

Centre de l'assemblage

Solution Déplacement Déformation Contrainde Energie Endommagement Contrainde linéarisée Volume Sonde Outils Résultat défini par l'utilisateur Diagramme de Campbell

Arborescence

- Modèle (C5)
 - Précontrainte (Aucun)
 - Réglages de l'analyse
 - Vitesse de rotation
 - Support cylindrique
 - Support cylindrique 2
 - Support cylindrique 3
 - Solution (C6)
 - Informations sur la solution
 - Déplacement total
 - Déplacement total 2
 - Déplacement total 3
 - Déplacement total 4
 - Déplacement total 5

Détails de "Solution (C6)"

Raffinement adaptatif du maillage

Nombre maximal de boucles de raffinement 1, Profondeur de raffinement 2,

Informations

Statut Terminé, Temps écoulé dans MAPDL 25, s, Mémoire utilisée dans MAPDL 1,0059 GB, Taille du fichier de résultats MAPDL 427, MB

Post-traitement

Résultats de section des poutres Non

C: Copie de Copie de Modale
Solution
Fréquence: N/A
11/07/2021 12:43 AM

ANSYS R19.2

Géométrie Aperçu avant impression Aperçu du rapport/

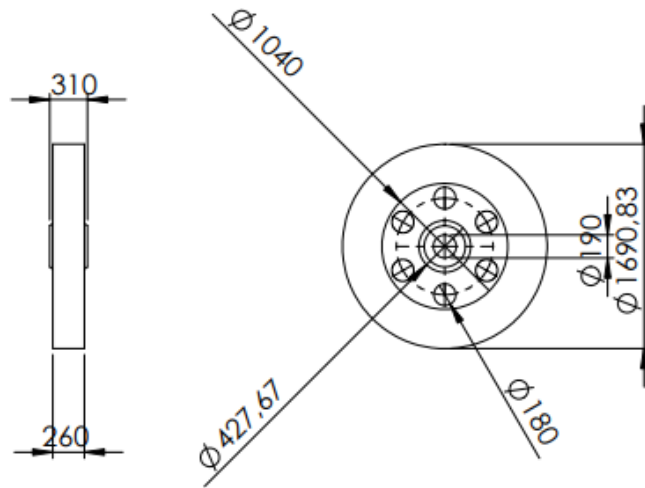
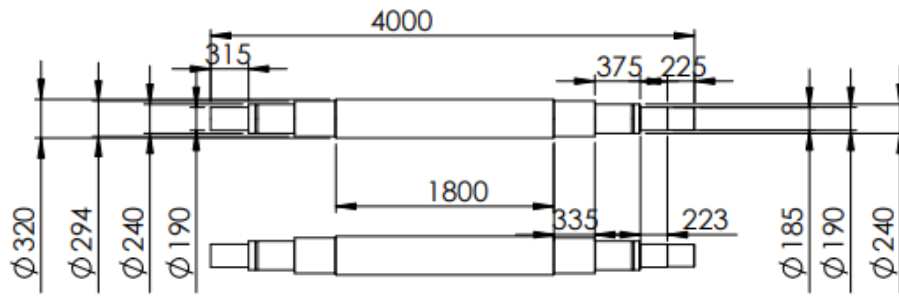
Graphique

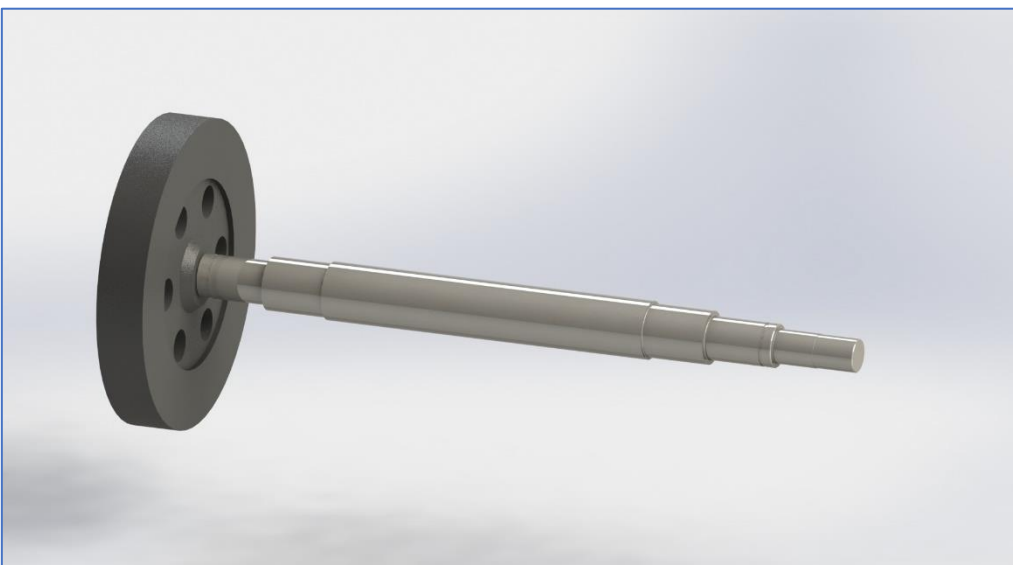
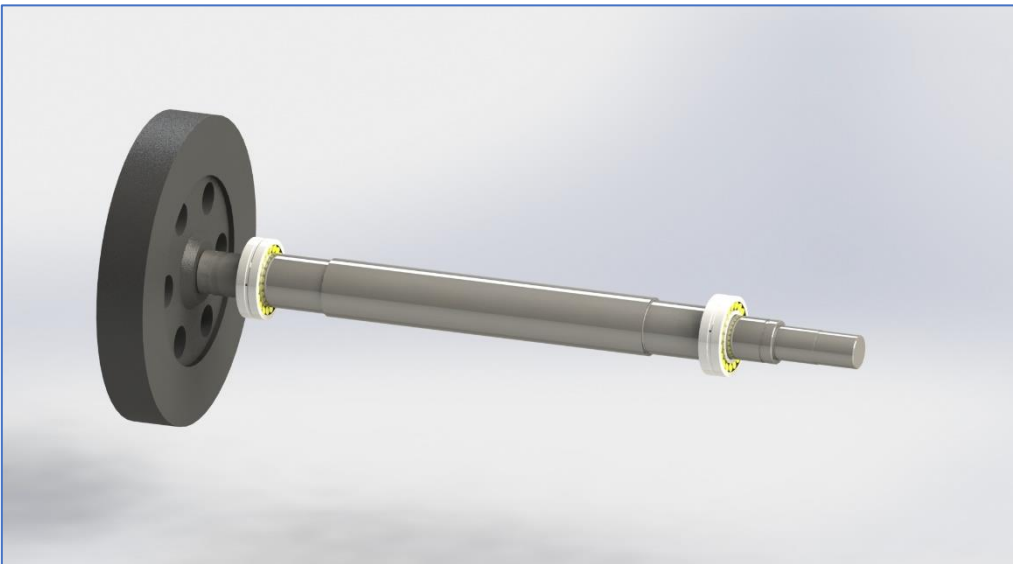
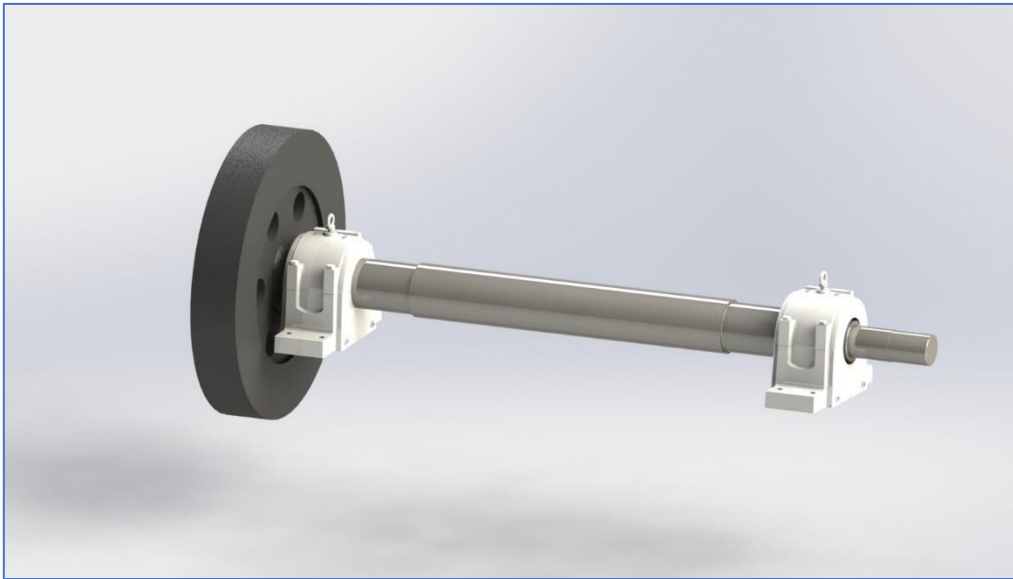
Données tabulaires

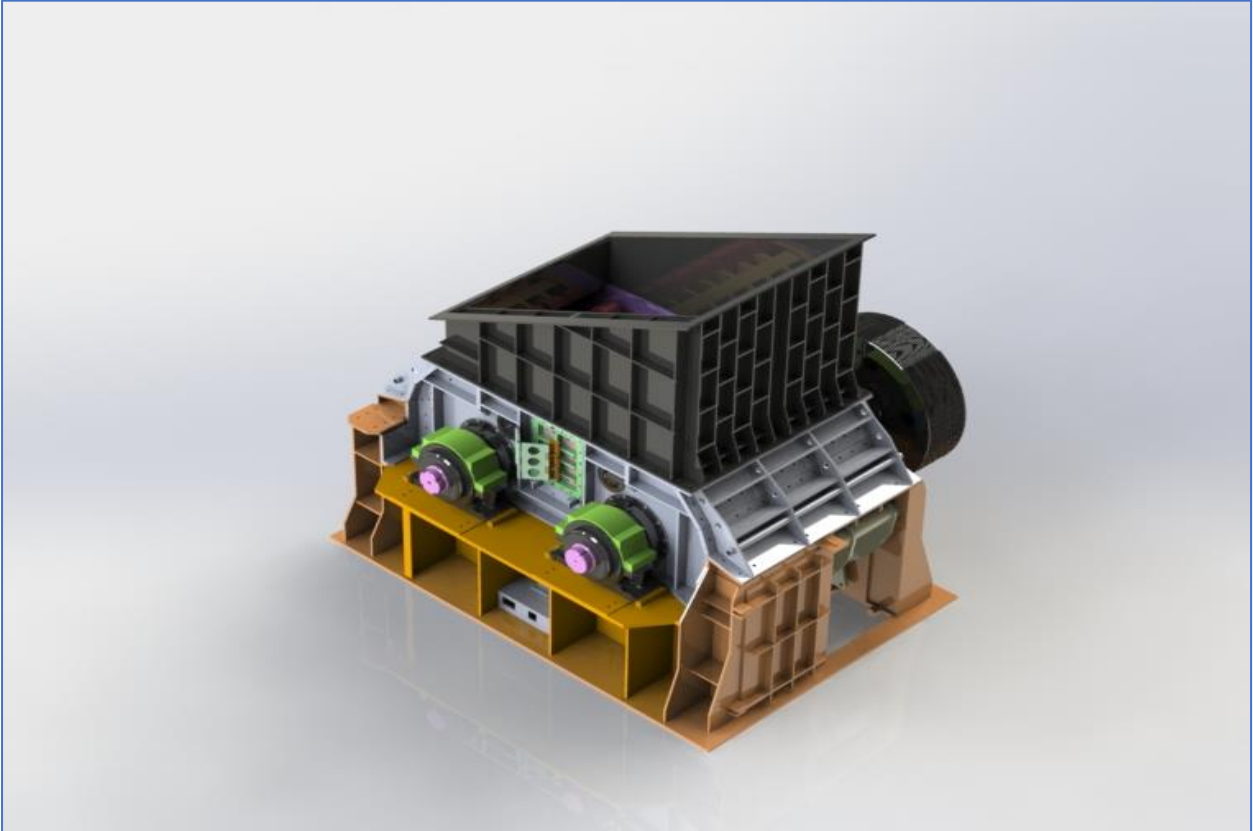
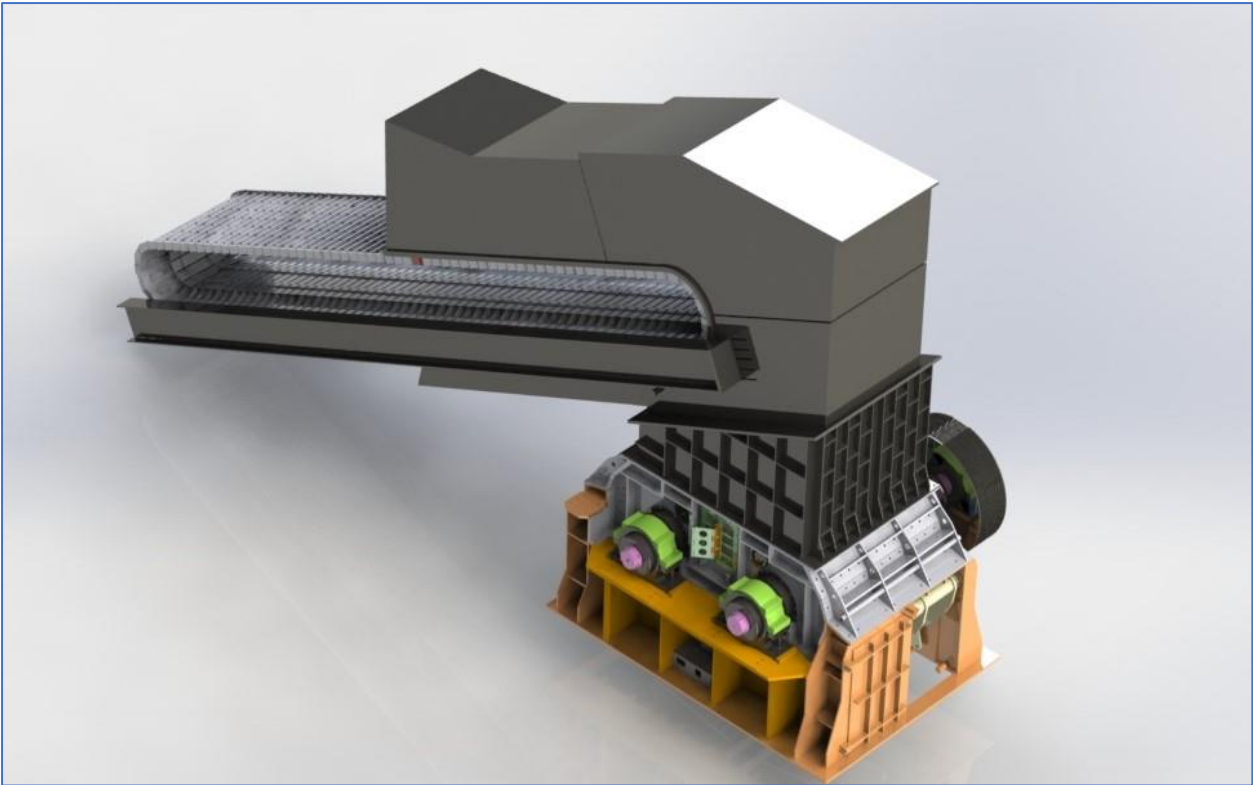
Définir	Point de résolution	Mode	Fréquence am
1	1,	1,	54,026
2	1,	2,	63,047
3	1,	3,	77,373
4	1,	4,	182,35

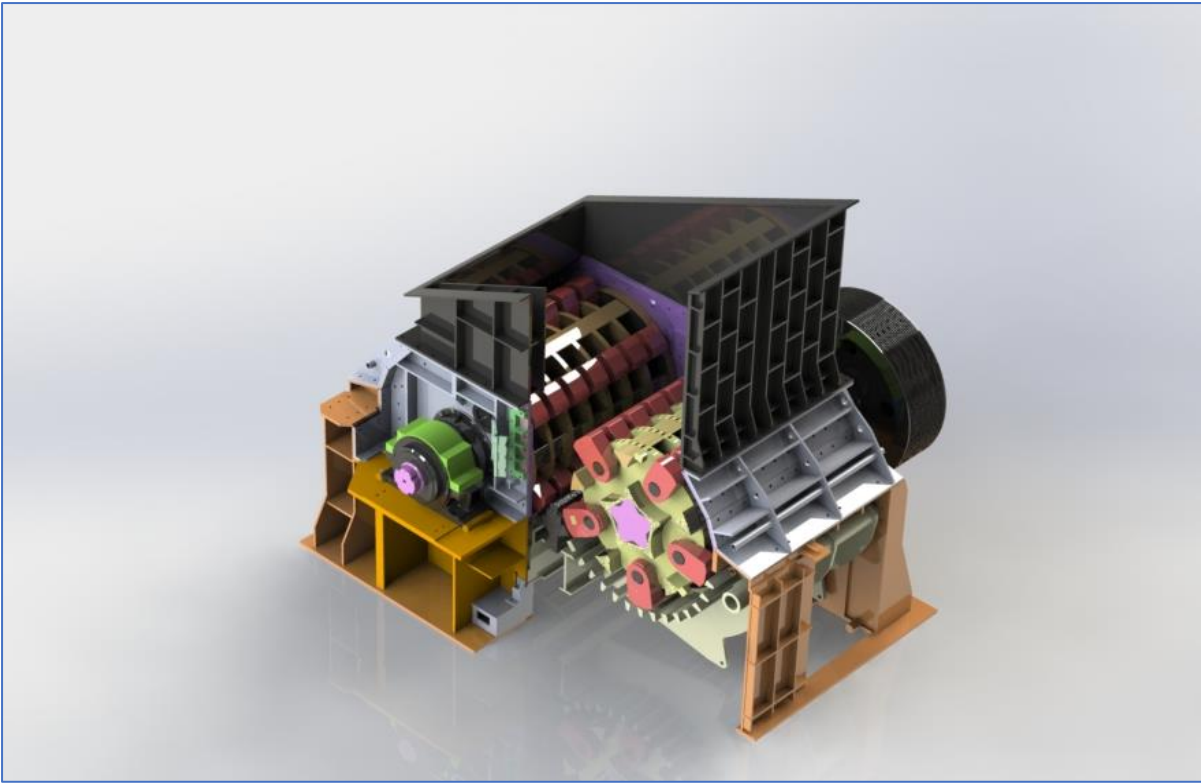
Métrique (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrés tr/min Celsi

Annexe









Bibliographie

- [1] : Gilles DUCHEMIN, « Maintenance des machines et des moteurs ». Technique de l'ingénieur BM 4 188.
- [2] : Bernard MECHIN, , « Introduction aux méthodes de maintenance ». Technique de l'ingénieur MT 9 280
- [3] : François MONCHY, « Maintenance méthodes et organisations » DUNOD_ 2000.
- [4] : D. Khaled BELMADH, Technique of maintenance, 2ème édition, Université Pierre and Marie Curie- Paris VI_2006
- [5] : Marie LINE ZANI, « la surveillance des machines tournantes », mesure 757_ Septembre 2003
- [6] : Alain BOULENGER, Christian PACHAUD, « Diagnostic vibratoire en maintenance préventive ». Dunod _1998.
- [7] : Jean-Marie Auberville, « Maintenance industrielle », Paris _2004
- [8] : Alain BOULENGER • Christian PACHAUD, 'Aide-mémoire' « Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Paris, Dunod, 2009