

Dédicaces

À nos très chers parents qui ont toujours été là pour nous, et qui nous ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous espérons qu'ils trouveront dans ce travail toute notre reconnaissance et tout notre amour.

À nos très chers frères et nos très chères sœurs, vous avez toujours été pour nous d'une aide très précieuse. Nous vous dédions ce travail en témoignage de notre grande affection.

À tous nos amis et à tous ceux avec lesquels nous avons partagé des moments de bonheur, de joie et de respect.

Remerciements

Au terme de ce Projet de licence, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Président et au Doyen de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, ainsi qu'au cadre administratif et professoral pour leur aide et leur soutien.

Nous tenons aussi à témoigner toute notre reconnaissance à M.FATIMI YOUNESS, Encadrant industriel de ce projet, qui nous a prodigué ses directives précieuses et ses conseils pertinents.

Nos vifs remerciements vont également à M.TOUACHE ABDELHAMID, Professeur à la FSTF et chef de filière CAM, pour sa disponibilité et sa coordination, pour tout l'apport qu'il a donné à ce projet par ses importantes contributions.

Une gratitude particulière aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Un grand MERCI à tous les agents de l'entreprise qui nous ont soutenus durant la période de ce projet, spécialement M.AYMAN, M. NAJI et M. ABDELATIF ,M.RACHID , qui nous ont aidés à avoir toutes les informations professionnelles ainsi que l'accès aux machines sur le chantier dont nous avons besoin.

Merci, enfin, à toute personne qui nous a offert l'occasion de découvrir le monde du travail, d'apprendre l'esprit de ponctualité, de confirmer les techniques acquises et de nous préparer à affronter la vie active.

Résumé

Parmi les outils de maintenance préventive conditionnelle et de maintenance préventive prévisionnelle, l'analyse des vibrations est celui qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants du fait de l'évolution des techniques dans les domaines de l'informatique et du traitement du signal. Dans une perspective de réduction des coûts de la production, ce type de surveillance est destiné à assurer la sécurité des installations, la détection précoce des anomalies, l'analyse et diagnostic après incidents.

Notre Projet de licence est consacré à l'amélioration de la disponibilité des équipements stratégiques de l'usine de LafargeHolcim de Meknès par la maintenance préventive prévisionnelle basée sur l'analyse vibratoire. Le Travail réalisé se présente, essentiellement, en deux volets importants : la préparation des documents nécessaire à la surveillance vibratoire d'une part, et la stratégie de mise en œuvre d'autre part.

Ainsi, nous avons consacré les deux premiers chapitres de ce rapport à la présentation des éléments nécessaires à la mise en œuvre du programme de surveillance. Dans les deux derniers chapitres du manuscrit, nous exposons aussi bien la démarche à suivre le long des différentes phases du programme de surveillance ainsi qu'une étude des cas réels traduisant une méthodologie de diagnostic vibratoire.

Table des matières

<i>Dédicaces</i>	1
<i>Remerciements</i>	2
<i>Résumé</i>	3
<i>Liste des figures</i>	7
<i>Liste des tableaux :</i>	8
<i>Introduction générale</i>	9
Chapitre 1 :	11
<i>Présentation de l'entreprise et du procédé de fabrication du ciment</i>	11
I. INTRODUCTION	12
1. Lafarge.....	12
2. Holcim	12
3. FUSION LafargeHolcim	13
I. GENERALITE SUR LE CIMENT	15
1. Qu'est-ce que le ciment ?	15
2. Matières premières	15
II. DESCRIPTION DE LA CHAINE DE PRODUCTION	15
• Préparation de la matière première :	15
1. Extraction des matières premières	16
2. Echantillonnage (pré-homogénéisation)	16
3. Broyage cru	17
4. Dépoussiérage	18
5. Homogénéisation	18
6. Préchauffage	18
7. Cuisson (four rotatif)	18
8. Refroidissement	19
9. Broyage du « CLINKER »	19
10. Séparation	20
11. Ensachage et expédition du ciment	20
• Ensachage	20
• Expédition	21
• Sécurité	21
Chapitre 2: Présentation du projet et étude de faisabilité	22

I.	<i>Faisabilité du projet</i>	23
1.	Cout de la non surveillance	23
	Exemple 1	23
•	Coûts directs	23
•	Coûts indirects	23
•	Coût total	24
	Exemple 2 :	24
•	Couts directs	25
•	Coûts indirects	25
•	Coût total	25
2.	Décision de faisabilité du projet	26
•	Avantages de la maintenance prévisionnelle par analyses des vibrations	26
•	Inconvénients de la maintenance prévisionnelle par analyses des vibrations	27
II.	<i>Classification des équipements</i>	27
III.	<i>Etude du contexte d'utilisation des machines à surveiller</i>	29
•	Périmètre du travail :	29
•	Décomposition fonctionnelle :	30
•	Les tableaux AMDE :	30
IV.	<i>Préparation de la surveillance</i>	30
V.	<i>Fiche machine</i>	31
1.	Codification des machines	31
2.	Groupement des caractéristiques générales de chaque machine	31
3.	Calcul des fréquences caractéristiques	31
4.	Repérage des points de mesure	31
VI.	<i>Mise en place d'un plan de surveillance</i>	33
VII.	<i>Elaboration des procédures et des guides de défauts</i>	34
1.	Elaboration d'une Fiche de défauts	34
2.	Elaboration des Fiches techniques (guide) de défauts	34
	<i>Chapitre3 : Mise en place de la maintenance prévisionnelle par analyse vibratoire</i>	35
1.	Commande Broyeur clinker BK5 : Réducteur combiFlex	36
•	Chaine cinématique du Broyeur clinker BK5	36
•	Calcul des fréquences de rotations, d'engrènements et de roulements	37

<i>Application</i>	38
2. Ventilateur tirage séparateur Broyeur clinker BK5.....	39
• <i>Calcul des fréquences</i>	40
<i>Application</i>	40
3. Broyeur clinker BK4.....	42
• <i>Calcul des fréquences caractéristiques</i>	42
<i>Application</i>	43
4. Ventilateur tirage séparateur Broyeur clinker BK4.....	44
• <i>Calcul des fréquences caractéristiques</i>	44
<i>Application</i>	45
<i>Conclusion générale</i>	47
<i>Bibliographie</i>	49

Liste des figures

Figure 1: Carrière Zone 4	16
Figure 2: Hall de pré homogénéisation polaire	16
Figure 3: Bande Navette	17
Figure 4: Broyeur Cru vertical BC	17
Figure 5: Système BC de préchauffage	18
Figure 6: Four rotatif	19
Figure 7: Refroidisseur	19
Figure 8: Broyeur à boulets	20
Figure 9: Fissures et écaillage de la denture sur le réducteur BK4	24
Figure 10: Opération de ressuage effectué sur les roues du réducteur BK4	25
Figure 11: Schéma de définition de criticité	28
Figure 12: Notion de mobilité dans les vibrations	32
Figure 13: Constituants d'une fiche machine	32
Figure 14: Commande combiFlex BK5	36
Figure 15: Repérage des points de mesures	38
Figure 16: Mesure vibratoire obtenu	38
Figure 17: Spectre obtenu lors de la mesure	39
Figure 18: Résultats des mesures	40
Figure 19: Spectre obtenu	41
Figure 20: Mesure obtenu	43
Figure 21: Spectre obtenu	44
Figure 22: Mesure obtenu	45
Figure 23: Spectre observé dans la moyenne fréquence	45
Figure 23: Spectre observé dans la moyenne fréquence	45
Figure 23: Spectre observé dans la moyenne fréquence	45
Figure 23: Spectre observé dans la moyenne fréquence	45

Liste des tableaux :

Tableau 1: caractéristique de chaque Haver	20
Tableau 2: Coutts directs de la non surveillance	23
Tableau 3: Coutts indirects de la non surveillance	24
Tableau 4 : Coutts directs	25
Tableau 5: Tableau de classification selon la criticité TPM	28
Tableau 6: Les 3 classes de criticité des équipements stratégiques de LafargeHolcim....	29
Tableau 7: Suivi et périodicité de surveillance	34
Tableau 8: Calcul des fréquences.....	37
Tableau 9: calcul des fréquences et références de roulements	40
Tableau 10: fréquence caractéristique BK4.....	43
Tableau 11: Fréquence caractéristique du ventilateur	44

Introduction générale

L'amélioration de la disponibilité des équipements, d'une part, et la réduction des coûts de la maintenance et de la non-qualité d'autre part constituant une étape essentielle dans la réduction des coûts de production de l'usine de LafargeHolcim ciment de Meknès. La maintenance préventive prévisionnelle permet de répondre à un tel défi.

Parmi les méthodes utilisées en maintenance préventive conditionnelle et en maintenance préventive prévisionnelle, l'analyse des vibrations est une des méthodes les plus utilisées pour le suivi des machines tournantes. La surveillance des machines tournantes était essentiellement destinée à permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre Projet de Licence, dont l'objectif est d'améliorer la disponibilité des machines stratégiques de l'usine par la politique de maintenance préventive prévisionnelle basée sur l'analyse vibratoire, cette politique doit permettre une détection précoce des défauts d'en identifier la nature, d'en déterminer la gravité et d'en suivre l'évolution. Ceci offrirait la possibilité de planifier et de préparer les interventions nécessaires en les intégrant, dans un premier temps, dans les arrêts programmés, et par la suite organiser des retours d'expérience permettant de les éviter dans le futur.

La qualité et la fiabilité de la surveillance dépendent de la qualité de la pré-étude (schémas cinématiques, fiches machine, le calcul des fréquences caractéristique, la connaissance des défauts et de leurs manifestations...), du choix judicieux des emplacements des points de mesures et des indicateurs, des alarmes associées à chaque indicateur, des techniques de diagnostic à mise en œuvre.

Ce rapport, exposant le déroulement de ce travail, est constitué de quatre chapitres, qui seront présentés comme suit :

Le premier chapitre comprendra une présentation du contexte général du projet. Il donnera une présentation du LafargeHolcim de Meknès en tant qu'organisme d'accueil, le processus de fabrication du ciment.

Le deuxième chapitre portera sur la mise en place du programme de surveillance, une partie est consacrée à la faisabilité du projet, la deuxième partie comprendra la préparation du programme de surveillance et la prise des mesures. Nous avons proposé par la suite des règles et des procédures de retour d'expérience.

Le troisième chapitre aura pour objectif de montrer l'intérêt des vibrations, comme le moyen le plus adapté à la détection en fonctionnement des défauts des machines tournantes en étudiant un exemple réel de diagnostic vibratoire.

Chapitre 1 :
Présentation de l'entreprise
et du procédé de fabrication
du ciment

I. INTRODUCTION

1. Lafarge

Pour faire face à la concurrence et aux enjeux de la mondialisation qui exigent une compétitivité de plus en plus accrue, les cimenteries marocaines, notamment LAFARGE MAROC, cherchent à minimiser leur prix de revient tout en répondant aux exigences du marché. Dans cette perspective, ils déploient des efforts insatiables pour améliorer les performances de leurs équipements et réduire ainsi le coût de production. Le groupe LAFARGE possède une longue tradition et un savoir-faire exceptionnel dans les matériaux de construction.

Depuis plus de 160 ans le groupe Lafarge s'est développé en France d'abord, puis en Amérique du Nord et du Sud, et progressivement sur tous les continents.

2. Holcim

Holcim est un cimentier, entreprise familiale devenue multinationale au cours du XXe siècle et qui compte parmi les plus grands producteurs mondiaux de ciment. Son siège principal est en Suisse, à Zurich.

En 2015, Holcim fusionne avec le N°1 mondial du secteur, le groupe français Lafarge dont le nouvel ensemble prend le nom de LafargeHolcim.

C'est ainsi qu'à la veille de l'indépendance, le niveau de production du ciment au Maroc approchait les 850 000 tonnes. Alors que, de nos jours, le Maroc produit environ 700 000 T/ an, assurant ainsi son autosuffisance depuis 1982.

La fiche technique de Lafarge

- **Raison sociale** : Lafarge Ciment Usine de MEKNES
- **Forme juridique** : Société anonyme
- **Date de création** : 1953
- **Numéro de patente** : 17045015
- **Capitale sociale** : 476 430 500
- **Effectif du personnel** : 331

Fiche technique de Holcim

- **Raison sociale** : Holcim (MAROC)
- **Forme juridique** : société anonyme de droit privé.
- **Date de création** : 1976 pour une durée de 99 ans.
- **Activité** : production et commercialisation du ciment.
- **Capital social** : 91.000.000 MAD.
- **Registre commercial** : 24713.
- **Effectif** : 181 (HOLCIM DEKKARAT ET REM)

3. FUSION LafargeHolcim

Les actionnaires de Lafarge Ciments et de Holcim Maroc ont approuvé à l'unanimité la fusion des deux entités lors d'assemblées générales réunies le 4 juillet. Dans le cadre d'un accord conclu le 17 mars entre le groupe LafargeHolcim et la SNI pour absorber Holcim Maroc au sein de Lafarge Ciments, l'AMMC (l'Autorité marocaine du marché des capitaux) avait donné son feu vert, fin juin, pour l'opération. Ce sont désormais les actionnaires qui s'y accordent : les actionnaires de Holcim Maroc seront rémunérés par le biais d'une émission de 5 935 512 actions nouvelles de Lafarge Ciments. Elles seront attribuées aux actionnaires de Holcim Maroc, à raison de 1,20 action Lafarge Ciments pour 1 action Holcim Maroc.

La date d'échange des titres est prévue pour le 13 juillet. La nouvelle entité, baptisée « LafargeHolcim Maroc », deviendra désormais la première capitalisation boursière industrielle.

Procédés de Fabrication du **Ciment**

I. GENERALITE SUR LE CIMENT

1. Qu'est-ce que le ciment ?

Poudre minérale, le ciment est un liant hydraulique utilisé dans différents domaines, principalement comme matériau de construction. Il est fabriqué à partir de la cuisson, le mélange et le broyage de différentes matières premières. Tout d'abord, sont mélangés du calcaire, de l'argile et des additifs tels que le minerai de fer et le sable ; ce mélange appelé "cru", est broyé et porté à haute température ($\sim 1450^{\circ}\text{C}$) dans un four cylindrique *. Les transformations physico-chimiques provoquent la création d'un produit appelé clinker. Par la suite l'ajout de différents éléments tels que le gypse, la pouzzolane et le calcaire nous donne le ciment.

2. Matières premières

Les matières premières qui rentrent dans la fabrication du Ciment sont essentiellement le calcaire, l'argile :

Calcaire : Le gisement du calcaire se trouve près de l'usine. Les réserves sont estimées à 600 millions de tonnes, il est aussi utilisé comme matière d'ajout.

-Argile : Le gisement est situé à 7 km de l'usine avec une réserve de l'ordre de 200 millions de tonnes.

Matière d'ajout :

-Gypse : dont le gisement est situé à 7km de l'usine

II. DESCRIPTION DE LA CHAINE DE PRODUCTION

La préparation du ciment de l'usine de Meknès passe par des étapes principales

• Préparation de la matière première :

La fabrication du ciment est un processus très complexe dans lequel les matières premières subissent des transformations physico-chimiques successives jusqu'au produit fini. Ce procédé comprend deux phases importantes :

- La première phase du processus est la fabrication du Clinker suite à la cuisson d'un mélange cru(ou farine), cette farine est composée en grande proportion de calcaire (80%), de schistes (15%) et des matières de correction(ou ajouts) sous forme de minerais de fer et de

sables (5%).

- La dernière phase du processus est le broyage du Clinker mélangé à des matières de corrections (ou ajouts) constituées.

1. Extraction des matières premières

Le Calcaire est exploité à partir de la carrière située à proximité de l'usine, l'extraction se fait à partir d'un abattage à l'explosif, le pourcentage du calcaire dans la production peut atteindre 80%. La carrière du schiste est située à 7 Km du site de l'usine, l'extraction est sous-traitée et le pourcentage peut aller de 13 à 14%.



Figure 1: Carrière Zone 4

2. Echantillonnage (pré-homogénéisation)

La pré-homogénéisation (prononcé souvent pré homo) constitue un mode de stockage qui permet de construire un tas de matière pré dose à partir des différentes matières



Figure 2: Hall de pré homogénéisation polaire

La bande navette est une bande qui peut tourner dans un sens ou dans l'autre suivant le sens de rotation du moteur d'entraînement.

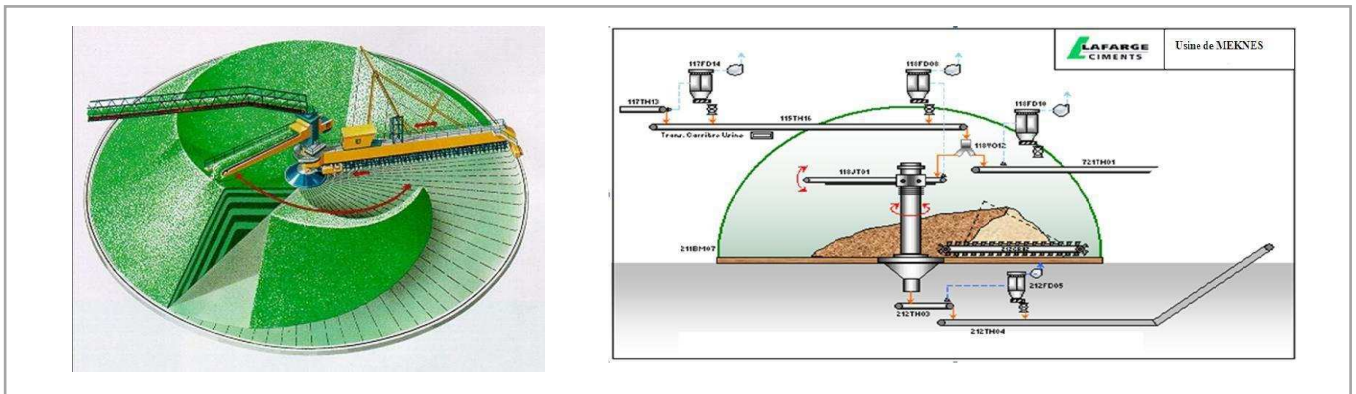


Figure 3: Bande Navette

La trémie d'alimentation du broyeur appelée trémie de mélange.

Une fois le dosage effectué, les constituants sont rejetés dans une bande transporteuse pour le broyage.

3. Broyage cru

La matière, que l'on appelle aussi cru car elle n'a pas encore été cuite, passe tout d'abord dans un doseur. Ce doseur a pour but de « corriger » le cru par l'ajout de schistes, de minéral de fer, et de calcaire. Deux broyeurs verticaux BC1 et BC2 viennent ensuite qui sont donc alimentés par le cru provenant du pré homo et par le schiste de la correction.

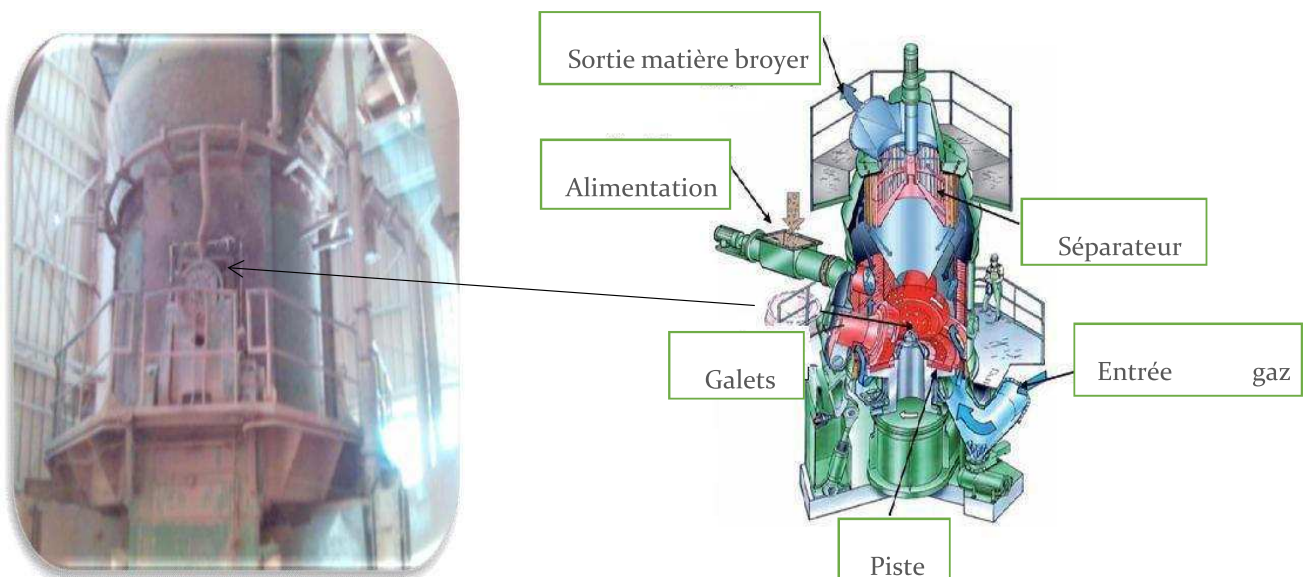


Figure 4: Broyeur Cru vertical BC

4. Dépoussiérage

Une fois la matière broyée, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela, on dispose avant la disparition des gaz, de filtres à manches, ils libèrent donc la matière des gaz.

5. Homogénéisation

A la sortie du broyeur, après séparation, la cimenterie dispose d'un produit sec d'une extrême finesse comparable à celle du boulanger, d'où le nom de "Farine" qu'on lui donne en cimenterie.

6. Préchauffage

Avant d'introduire la matière dans le four, elle passe par une tour. Cette dernière est composée d'un ensemble de cyclones disposés verticalement sur cinq étages, et d'un ventilateur situé à sa partie basse qui sert à tirer les gaz chauds avec une grande vitesse, du four vers les cyclones. La matière est ensuite remontée par des élévateurs jusqu'à la partie supérieure puis elle descend et en même temps se réchauffe grâce à son contact avec les gaz chauds.

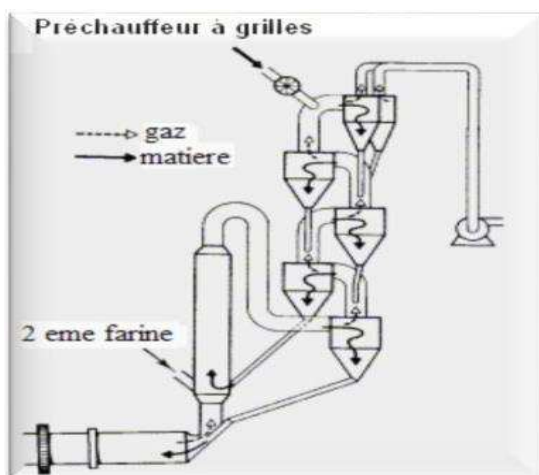


Figure 5: Système BC de préchauffage

7. Cuisson (four rotatif)

A la sortie du préchauffeur, la farine arrive dans le four rotatif où s'effectue l'étape la plus importante de sa transformation. L'alimentation farine est située à l'extrémité opposée au brûleur. Le four rotatif est de forme cylindrique de 3,6m de diamètre, de 62,5m de longueur,

avec une pente d'inclinaison de 3% et une vitesse de rotation pouvant atteindre 2,5 tr/mn. L'isolation du four se fait par des briques réfractaires.



Figure 6: Four rotatif

8. Refroidissement

Quand le « clinker » sort du four, à environ 1300°C, il faut le refroidir pour le stockage, pour cela, l'usine dispose d'un refroidisseur à grille. Il est constitué de deux grilles, chaque grille est composée de plusieurs éléments légèrement inclinés. Le « clinker » progresse le long de la grille, grâce au mouvement alternatif des plaques de la grille, ce mouvement est actionné par des vérins hydrauliques. Sous la grille, cinq ventilateurs propulsent de l'air à travers la couche de « clinker », assurant un refroidissement progressif.



Figure 7: Refroidisseur

9. Broyage du « CLINKER »

Après refroidissement, le « clinker » se présente sous forme de nodules gris foncé d'environ 2 cm de diamètre. Pour la fabrication du ciment, le « clinker » doit être broyé à une finesse inférieure à 40 microns.

10. Séparation

Le séparateur joue un rôle très important dans le fonctionnement global de l'atelier de broyage ciment. En effet, il augmente l'efficacité du broyeur car il optimise la récupération des fines, détermine la taille maximale des grains dans le ciment et diminue le temps de rétention dans le broyeur.

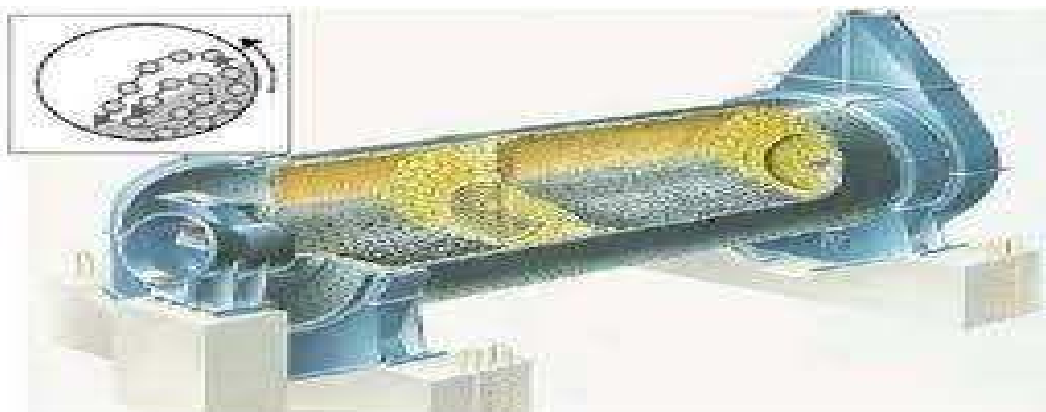


Figure 8: Broyeur à boulets.

11. Ensachage et expédition du ciment

- **Ensachage**

Après sa fabrication, le ciment est acheminé, par voies pneumatiques ou mécaniques, vers des silos de stockage dont la capacité est de plusieurs milliers de tonnes.

Pour ceci, l'usine dispose de 3 ensacheuses rotatives (Haver), de débit 90t/h chacune disposées selon le tableau suivant.

Type de machine	Débit t/h	N° silo	Capacité des silos	Type ciment
Haver n° 1	90	1 ou 2	Silo1 : 5000 t	CPJ 35
Haver n° 2	90	1 ou 2	Silo2 : 5000 t	CPJ 35
Haver n° 3	90	1 ou 7	Silo 7 : 5000 t	CPJ 45

Tableau 1: caractéristique de chaque Haver

- **Expédition**

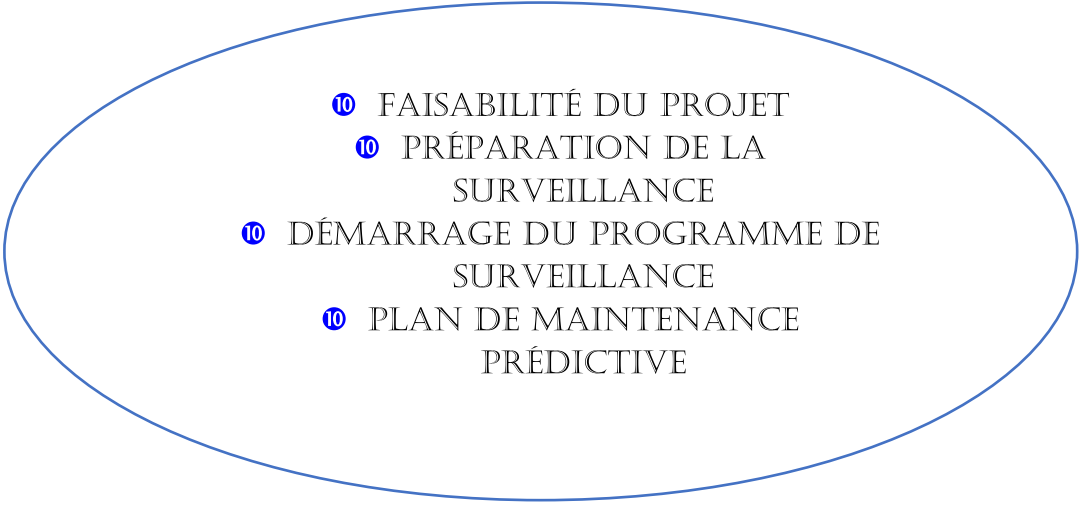
Il est expédié vers les lieux de consommation sous deux formes :

- ▶ En sac : Les sacs contiennent généralement 25 ou 50 Kg de ciment sur lesquels est marquée la classe de résistance du ciment (35 ou 45).
- ▶ En vrac : la livraison du ciment en vrac se fait sur des citernes. Le ciment est injecté avec l'air dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint.

- **Sécurité**

La sécurité des ouvriers dans LafargeHolcim est une loi de travail dans tous les secteurs pour atteindre zéro accident et respecter les sentiments des ouvriers.

Chapitre 2 : Présentation du projet et étude de faisabilité

- 
- ⑩ FAISABILITÉ DU PROJET
 - ⑩ PRÉPARATION DE LA SURVEILLANCE
 - ⑩ DÉMARRAGE DU PROGRAMME DE SURVEILLANCE
 - ⑩ PLAN DE MAINTENANCE PRÉDICTIVE

I. Faisabilité du projet

Le but de l'étude de la faisabilité est de vérifier au terme de coût que notre projet est faisable et rentable avec les besoins de l'entreprise dans le cadre de démarrage du programme de la maintenance prévisionnelle basée sur l'analyse vibratoire.

On abordera alors les couts de la non surveillance et quelques exemples réels d'estimation pour mieux illustrer l'intérêt de notre projet.

1. Cout de la non surveillance

Le coût de la non surveillance des installations peut être estimé par les coûts de réparation (personnel et pièces de rechange...), des indisponibilités (manques de production).

Exemple 1

Nous illustrons par l'exemple du ventilateur refroidisseur V1 du four 1 afin de donner une idée sur le coût de la panne. Une simple panne due à un défaut de roulement dans les paliers engendrera un arrêt d'au moins 4h. Nous allons dans ce qui suit estimer le taux horaire du coût de cette panne.

- Coûts directs

Les coûts directs de la panne sont constitués : du (1) coût d'intervention de la main d'œuvre (4 mécaniciens), (2) des pièces de rechange (2 paliers, 2 roulements et des joints d'étanchéité) et du (3) calorifugeage du four après arrêt qui dure ½ heure par heure (pour une durée d'arrêt inférieur à 10 heures).

Coût d'intervention de la main d'œuvre	4 x 35DH/heure= 140DH
Coût des pièces de rechange	(800x2+500x2+200) /4=700DH
Coût du calorifugeage	(3000 ℓ de fuel du F1+2000 ℓ de fuel pour PRECA) x 2.9DH = 14 500 DH
Le total des couts directs	(140DH + 700DH + 14500DH) = 15 340 DH

Tableau 2: Couts directs de la non surveillance

- Coûts indirects

Les coûts indirects de la panne sont constitués du (1) manque de la production et de (2) la consommation de l'énergie non exploitée.

Une heure de pannes cause 3/2h d'arrêt (1h d'arrêt pour réparation + ½ heures de chauffe). Le four1 produit 1800 tonnes de clinker par jour et chaque tonne de clinker donne 1.41 tonnes des ciments.

Le four consomme en énergie électrique (89KW) /(tonne du ciments) ce qui vaut 0.75 DH/KW.)

Coût du manque de la production	$(1800t \times 1.5h) / 24 \times 1.41 \times 800DH = 126\,900\,DH$
Coût de consommation de l'énergie non exploitée	$1.41 \times 112.5t \times 89\,KW/tonnes \times 0.75\,DH/KW = 10447DH$
Le total des couts indirects	$126\,900\,DH + 10447DH = 137\,347\,DH$

Tableau 3: Couts indirects de la non surveillance

- **Coût total**

Coût total = coûts directs + coûts indirects



Coût total= 152 687 DH

Cette estimation suppose que les pièces de rechange et la main d'œuvre sont disponibles et que la panne s'est produite pendant les heures de travail normal. Sinon le coût d'une heure supplémentaires d'arrêt est de l'ordre de :

137 347/heures DH

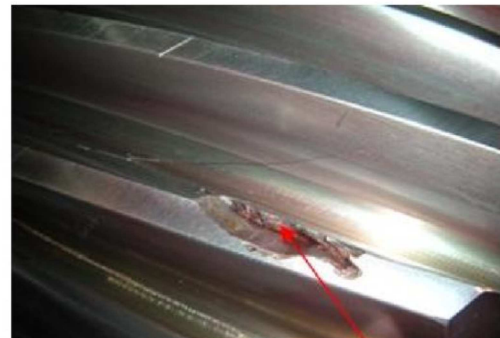
Exemple 2 :

Le réducteur du broyeur BK4 a subi un arrêt qui a duré 46 heures (du 04/04/2011 au 05/04/2011) suite à des fissures au niveau de la denture hélicoïdale sur le pignon (arbre PV) et une autre fissure prolongée sur la denture voisine ainsi que des puttings accentués sur la roue PV, pignon GV et la roue MV (voir le figure 23 et figure 24).

Après la réparation de la denture du réducteur BK4, ce dernier reste un équipement inquiétant (pendant une année) sur le personnel d'une part (visites journalière, préparation les pièces de rechange nécessaires, arrêt de 16h pour chaque 2 mois), d'autre part il a influencé indirectement sur la production (réduction de la quantité produite).



Denture fissurée



Ecaillage et fissure

Figure 9: Fissures et écaillage de la denture sur le réducteur BK4



Figure 10: Opération de ressuage effectué sur les roues du réducteur BK4

- **Coûts directs**

Les coûts directs de la panne du réducteur BK4 qui a duré 46 heures et leurs effets pendant une année sont constitués :

Du (1) coût d'intervention de la main d'œuvre (01 contremaître mécanicien, 01 chef d'équipe, 02 mécaniciens et une société sous-traitante), (2) des pièces de rechange.

Coût d'intervention de la main d'œuvre (01 contremaître mécanicien, 01 chef d'équipe, 02 mécaniciens et une société sous-traitante)	$[(50 \text{ DH} + 35 \text{ DH} + 2 \times 25 \text{ DH}) \times 12 \text{ h/j} \times 2 \text{ j}] + 4000 \text{ DH} = 7240 \text{ DH}$
Coût des pièces de rechange	$[(14405 \times 5 + 20027 \times 8 + 15 \times 7700)] + 1000000 = 1347741 \text{ DH}$
Le total des coûts directs	$1347741 \text{ DH} + 7240 \text{ DH} = \mathbf{1\ 354\ 981 \text{ DH}}$

Tableau 4 : Coûts directs

- **Coûts indirects**

Les coûts indirects de la panne sont constitués du (3) chute de la production. Le broyeur Bk4 produit 40t/heure de ciment au lieu de 70 t/heure pendant une année.

$$(1) = (70 \text{ t/h} - 40 \text{ t/h}) \times 46 \text{ h} \times 0.8 \times 1000 \text{ DH/t} = 1104000 \text{ DH}$$

$$\text{Coûts indirects} = 1\ 104\ 000 \text{ DH}$$

- **Coût total**

Coût total = coûts directs + coûts indirects

$$\text{Coût total} = 2\ 458\ 981 \text{ DH}$$

✋ Cette panne a eu un effet catastrophique sur la production au terme de perte, ils ont décidé de remplacer le réducteur BK4 par un autre (frais d'achat et d'installation d'un nouvel équipement).

Il est à noter que la surveillance vibratoire aurait facilement permis une détection précoce de ce type de défaut (détériorations de la denture, fissures ou écaillage de la denture) et donc de planifier de l'intervention lors d'un arrêt programmé.

2. Décision de faisabilité du projet

- **Avantages de la maintenance prévisionnelle par analyses des vibrations**

Nous énumérons ci-dessous les principaux facteurs déterminants pour la prise de décision de démarrage d'un tel système :

- ✚ **Bénéfices financiers :**

- Augmentation du temps d'utilisation
- Réduction du coût des interventions
- Réduction du coût de maintenance

- ✚ **Améliorations techniques :**

- Avertissements précoces
- Pas de fausses alarmes
- Méthodes fiables pour détecter tous types de défauts
- Multi utilisateur

- ✚ **Meilleur organisation et planification :**

- Espacement des interventions
- Augmentation de l'efficacité dans la planification et la prévision
- Coopération technico-opérationnelle

- ✚ **Bénéfices opérationnels :**

- Augmentation de la disponibilité
- Détection précoce voire prévision de la naissance des défauts
- Augmentation de la qualité de fonctionnement
- Meilleure protection de la machine et du personnel

- ✚ **Qualité sur site :**

- Augmentation de la durée de vie

- Surveillance protectrice de la machine
- Réduction du temps de maintenance
- Réduction du stock de rechanges

- **Inconvénients de la maintenance prévisionnelle par analyses des vibrations**

La mise en place d'une maintenance prévisionnelle par analyses des vibrations présente : habituellement plusieurs contraintes essentiellement liées aux coûts de la pré-étude (Dans le cas présent l'étude que nous avons menée a permis de s'en affranchir), et les coûts de la formation, le coût de l'acquisition et entretien du matériel.

En se basant sur les couts du non surveillance, les exemples réels ainsi que les avantages de la mise en place de la maintenance prévisionnelle par analyse vibratoire on peut alors déduire le résultat suivant :

Pronostic :

Le projet de démarrage du programme de la maintenance prévisionnelle par analyse des vibrations est faisable.

Afin de mettre en place et de démarrer le projet de la maintenance prévisionnelle basé sur l'analyse vibratoire il est bien évident de suivre une démarche précise pour contribuer à la réussite de ce projet, qui commence par la classification des équipements.

II. Classification des équipements

Afin de fiabiliser la surveillance, et par la suite déterminer les périodicités des tournés nous avons classé les équipements en 3 classes de criticités en se basant sur les critères ci-dessous :

1. Critères de classification

Il existe plusieurs critères qui peuvent servir de base pour la classification des machines, à savoir :

- La taille : définie par la puissance, la hauteur d'axe,
- Les assises : fondations légères, lourdes, rigides ou souples.
- La vitesse de rotation : variable ou constante, petite ou grande.
- La capacité totale de la production
- La sûreté de fonctionnement et la sécurité des personnes
- Les coûts de la maintenance, la disponibilité et le coût des pièces de rechange
- La Maintenabilité
- La criticité : Le temps de non production pour remise en état ou remplacement de l'équipement.

Nous définissons dans le tableau ci-dessous « la criticité » selon trois niveaux (A, B, C) de chacun des critères retenus :

Classe Influence	A	B	C
Sécurité et Environnement	Conséquences graves sur la sécurité des personnes et de L'environnement	Conséquences Localisées sur L'environnement ou risque sécurité accru	Pas de Conséquences
Qualité	Conséquences importantes sur la qualité (production de rebuts)	Influence qualité modérée (variation qualité, reprise)	Pas de Conséquences
Taux D'utilisation	100 %	1 à 2 postes par jour	Occasionnel
Délai de Livraison	L'usine s'arrête	L'environnement direct (la ligne) de la machine s'arrête	Doublon disponible/Stock Tampon suffisant/Autre solution de Rechange
Fréquence des Pannes	Pannes fréquentes (plusieurs par an)	Pannes occasionnelles (une par an)	Pannes rares
Maintenabilité	Pannes > 4 heures Coût de réparation > 15000 DH	Pannes de 1 à 4h Coût de réparation entre 3000 et 15000 DH	Pannes > 1 heure Coût de réparation < 3000 DH

Tableau 5: Tableau de classification selon la criticité TPM

Le schéma de la figure 24 donne une idée générale sur les critères de criticité utilise pour déterminer les équipements stratégiques et critique de l'entreprise LafargeHolcim, les critères de ce schéma se base pratiquement et principalement sur la classification faite par la TPM.

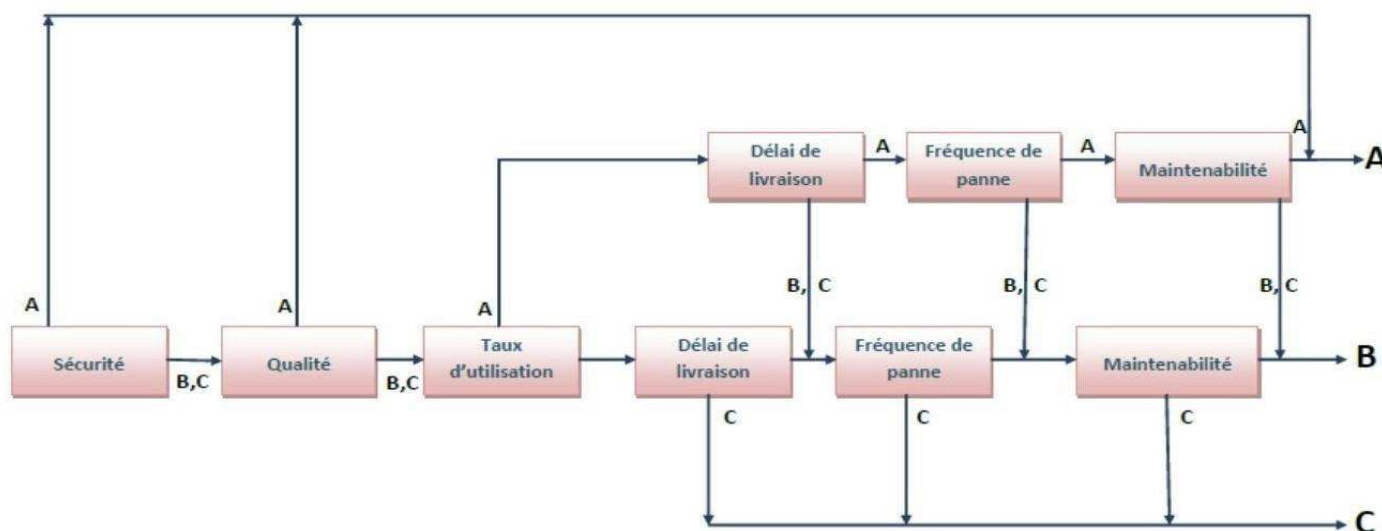


Figure 11: Schéma de définition de criticité

En respectant la démarche schématisée par le diagramme de la figure 25 nous avons classé les équipements choisis selon les 3 classes A, B, C comme suit :

Equipements	Classe
Broyeur BC1	A
Four 1	A
Ventilateur EVS Four 1	A
Ventilateur filtre Amant	A
Ventilateur filtre Aval	A
Ventilateur de refroidissement	A
Commande BK4	A
Commande BK5	A
Transporteur à godet (gratteur 1)	B
Ventilateur tirage Broyeur BC1	B
Transporteur AMUND Four 1	B
Ventilateur filtre broyeur BK4	B
Ventilateur filtre séparateur BK4	B
Filtre broyeur	B
Ventilateur séparateur	B
Concasseur FCB	C
Concasseur HAZEMAG	C
Elévateur BC1	C
Ventilateur extracteur filtre au lit F1	C
Elévateur sortie BK5	C

Tableau 6: Les 3 classes de criticité des équipements stratégiques de LafargeHolcim

III. Etude du contexte d'utilisation des machines à surveiller

Dans le but d'évaluer les points critiques de chaque machine, de prévoir les défaillances potentielles susceptibles d'y apparaître, d'étudier leurs conséquences vis-à-vis les différents composants et de définir les actions à entreprendre pour les éliminer ou réduire leurs effets nous allons utiliser l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et leurs Effets) comme outil qui permet d'assurer cette tâche.



Périmètre du travail :

Les équipements stratégiques que nous avons sélectionnés précédemment se divisent principalement en trois familles de machines : les ventilateurs à accouplement direct, les ventilateurs à transmission par poulies-courroies et les groupes de commande

(Motoréducteurs). L'étude AMDE est appliquée sur un équipement de chaque famille. Ces équipements sont les suivants :

- Le ventilateur de tirage séparateur Broyeur Clinker BK5 comme exemple des ventilateurs à transmission poulies-courroies

- Le groupe de commande du broyeur Clinker BK5
- Le groupe de commande du Broyeur Clinker BK4
- Le ventilateur tirage séparateur du BK4

- **Décomposition fonctionnelle :**

Cette opération nous permet d'identifier les groupements des sous-systèmes susceptibles d'être source de vibration.

- **Les tableaux AMDE :**

Les tableaux AMDE de chaque équipement sont établis L'annexe A.3

IV. Préparation de la surveillance

Cette tâche était, au fait, la plus importante. Pour chaque installation nous avons construit un dossier complet qui doit être intégré dans le logiciel d'exploitation du système de surveillance afin d'être immédiatement accessible à l'exploitant des résultats de collectes.

Pour élaborer la documentation nécessaire à la préparation du dossier, nous nous sommes basées sur la documentation du service Bureau des Méthodes qui comprend les :

- Plans et documents des fournisseurs classés par secteur,
- Fiches techniques

N.B : *Le travail effectué n'est pas seulement exploitable pour le système de surveillance, en effet cela servira de référence pour le bureau des méthodes et bureau d'études. En ce qui concerne le bureau des méthodes chaque visiteur maintenance aura un support ramassé des principales caractéristiques actualisées des installations à visiter.*

V. Fiche machine

1. Codification des machines

Nous avons adopté la codification figurante dans le logiciel de **GMAO, MAXIMO**, afin de permettre d'abord une meilleure gestion du dossier constitué, et conserver, par le même, une standardisation des codes.

2. Groupement des caractéristiques générales de chaque machine

Nous avons relevé (à partir des plans, des fiches machines des documentations des fournisseurs, et souvent des plaques signalétiques sur site) puis intégré dans la fiche machine les caractéristiques mécaniques et électriques générales de chaque machine et organe annexe ainsi que les caractéristiques susceptibles de permettre l'identification des composantes vibratoires.

3. Calcul des fréquences caractéristiques

Toute anomalie, sur machine tournante se traduit par des vibrations dont la fréquence correspond à celle du phénomène qui la provoque. Nous avons eu à calculer ces fréquences dites de défaut. Chacune de ces fiches indiquera, alors, les fréquences fondamentales caractéristiques de chaque installation et les fréquences d'excitation :

- Les fréquences de rotation des arbres ;
- Les fréquences d'engrènements ;
- Les fréquences de passage des pales ;
- Les fréquences des défauts des roulements ;
- Les fréquences de passage de courroies.

4. Repérage des points de mesure

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers et qu'il serait déraisonnable de prendre des mesures sur des carter non massifs ou posés.

Les mesures doivent être significatives et reproductibles pour être comparées par la suite. Or, chaque point est unique. La "mobilité" de la structure change considérablement d'un point à autre (même s'ils sont très proches) et cette mobilité influence les mesures vibratoires (voir la figure 26). ***Les conditions de fonctionnement de la machine doivent être identiques (charge et vitesse) à chaque prise de mesure***

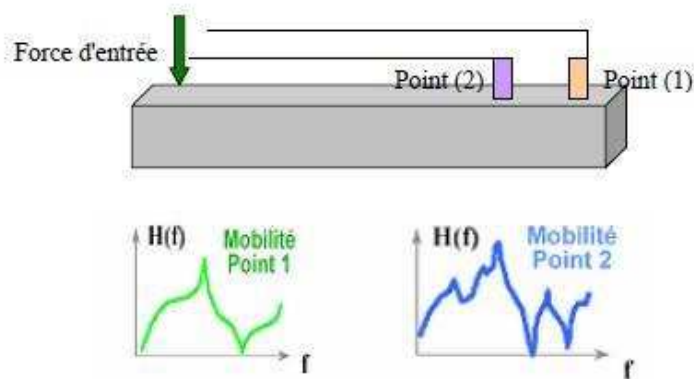


Figure 12: Notion de mobilité dans les vibrations

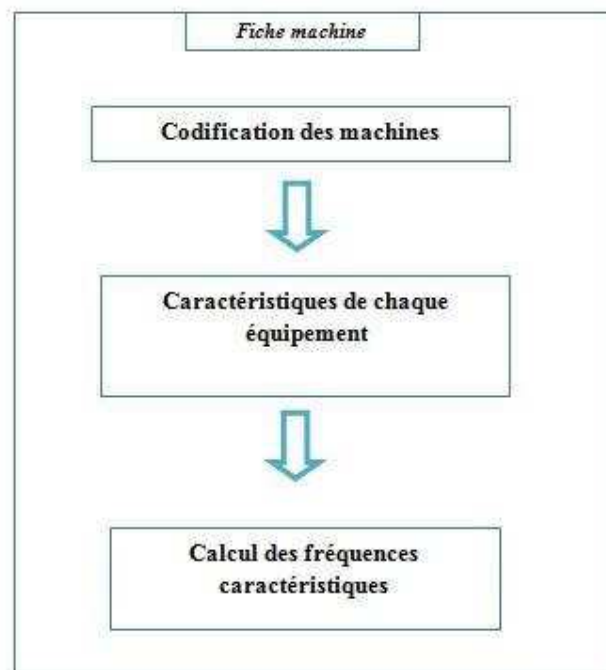


Figure 13: Constituants d'une fiche machine

Les fiches machines des équipements étudiés sont établies dans l'annexe A.6

VI. Mise en place d'un plan de surveillance

Un des objectifs de la maintenance prédictive est de prévenir toutes les défaillances sur un équipement ou du moins de limiter le nombre de défaillances à un niveau acceptable. Pour être efficaces les fréquences des mesures ne doivent pas être réalisées trop fréquemment ou trop rarement.

En se basant sur les critères de criticités déjà cités précédemment (**TPM et schéma de définition de criticité**) on mettra en évidence alors tous équipements critiques pour déterminer la périodicité de surveillance et de prise de vibrations

Pour ceci on proposera 2 types de relevés :

- Un relevé qui sera global pris par l'appareil de vibration ONE PROD XPR dont la périodicité sera déterminée selon la criticité des équipements.
- Un relevé journalier ou hebdomadaire pour **la classe A** en particulier (classe contenant les équipements stratégiques) qui se contentera que sur les sens (toucher, ouïe son : **sifflement des roulements** à titre d'exemple, vue) ou des mesures prises par un capteur de vibration déplaçable : le **VibPen**.

Plan des routes de surveillance vibratoire	responsable HACHMI Naji	Matériels de mesure : - Capteur triaxial - Collecteur FALCON	mensuel	bimensuel	trimestriel
Machines à surveiller					
- Commande broyeur + harnais BK4 - Commande broyeur + harnais BK5 - Ventilateur EVS Four 1 - Ventilateur de refroidissement - Ventilateur filtre Aval - Ventilateur filtre Amant - Broyeur BC1 - Four			□		
- ventilateur tirage séparateur BK4 - Transporteur à godet (gratteur 1) - Ventilateur tirage broyeurBK4 - Ventilateur tirage Broyeur BC1 - Ventilateur tirage séparateur BK5 - Ventilateur tirage broyeur BK5 - Transporteur AMUND Four 1				□	

Elévateur sortie BK5 Ventilateur extracteur filtre au lit F1 Concasseur FCB Concasseur HAZEMAG Elévateur BC1			□
--	--	--	---

Tableau 7: Suivi et périodicité de surveillance

VII. Elaboration des procédures et des guides de défauts

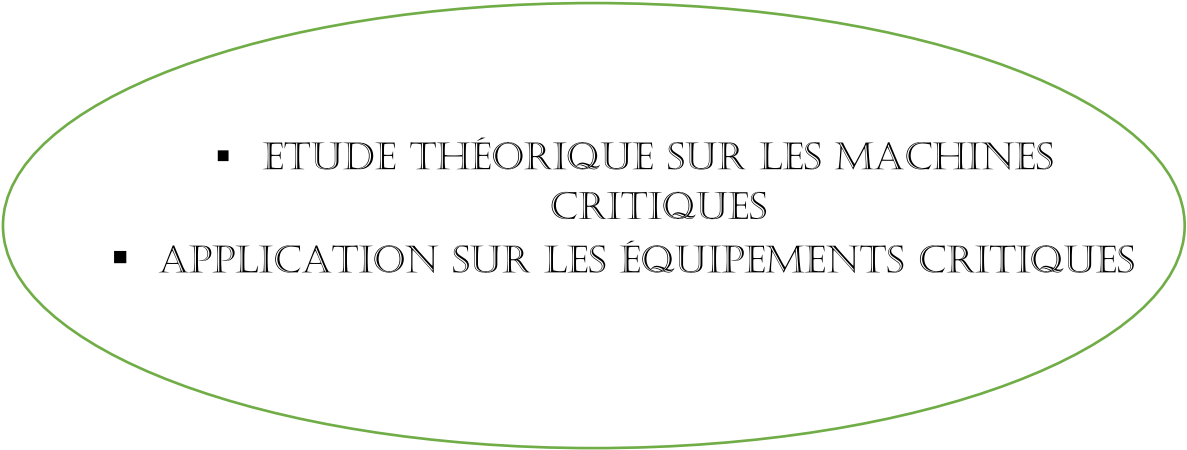
1. Elaboration d'une Fiche de défauts

Afin de quantifier la réussite de notre projet et de renforcer la surveillance des équipements. Nous avons établi alors une fiche de défauts pour chaque machine qui réunira plusieurs informations concernant les défauts détectés et les actions programmées pour éviter les avaries dans cette machine et contribuera au suivi de surveillance de cet équipement. (**Voir annexe A.4**)

2. Elaboration des Fiches techniques (guide) de défauts

Suite à la non formation des visiteurs de l'usine LafargeHolcim sur les défauts détectés par analyse vibratoire et les résultats ainsi les spectres générés par l'appareil de mesure. Nous avons alors opté à faciliter la tâche et à réaliser des fiches techniques de défauts de chaque composant comme les défauts roulements, les défauts d'engrenages, les défauts de transmissions (systèmes poulies courroies) et les défauts d'arbre. Ces fiches contiendront : les causes de vibration, les fréquences de manifestation, les directions de la force causante, les domaines d'observation et les actions préventives à anticiper et à entretenir pour éviter les défauts. Ces fiches initialiseront les visiteurs à la vibration et fiabiliseront le diagnostic et la surveillance des machines. (**Voir annexe A.5**)

Chapitre3 : Mise en place de **la maintenance** **prévisionnelle par analyse** **vibratoire**

- 
- ETUDE THÉORIQUE SUR LES MACHINES CRITIQUES
 - APPLICATION SUR LES ÉQUIPEMENTS CRITIQUES

Pour pouvoir appliquer l'analyse vibratoire sur les équipements stratégiques de LafargeHolcim en étudiant tous ce qui est théorique comme le calcul des fréquences caractéristiques, et pratique comme l'analyse des spectres obtenus générés par l'appareil et fiabiliser le diagnostic des défauts. Nous nous sommes royalement basés sur le chapitre de la généralité sur l'analyse vibratoire établi dans l'annexe A.1.

1. Commande Broyeur clinker BK5 : Réducteur combiFlex

Le broyeur clinker BK5 est classé dans le groupe 1 selon la norme ISO 10816, plus précisément dans les machines de grandes puissances dont la puissance est >300KW monté sur des fondations rigides. Ce mécanisme est alors l'un des équipements les plus stratégiques de LafargeHolcim puisque 50% de la production des ciments est généré par celui-ci. Nous allons alors aborder dans cette partie l'étude de cet équipement en commençant par illustrer la chaîne cinématique puis le calcul de fréquence et finalement analyser les résultats et les spectres obtenus.

• Chaîne cinématique du Broyeur clinker BK5

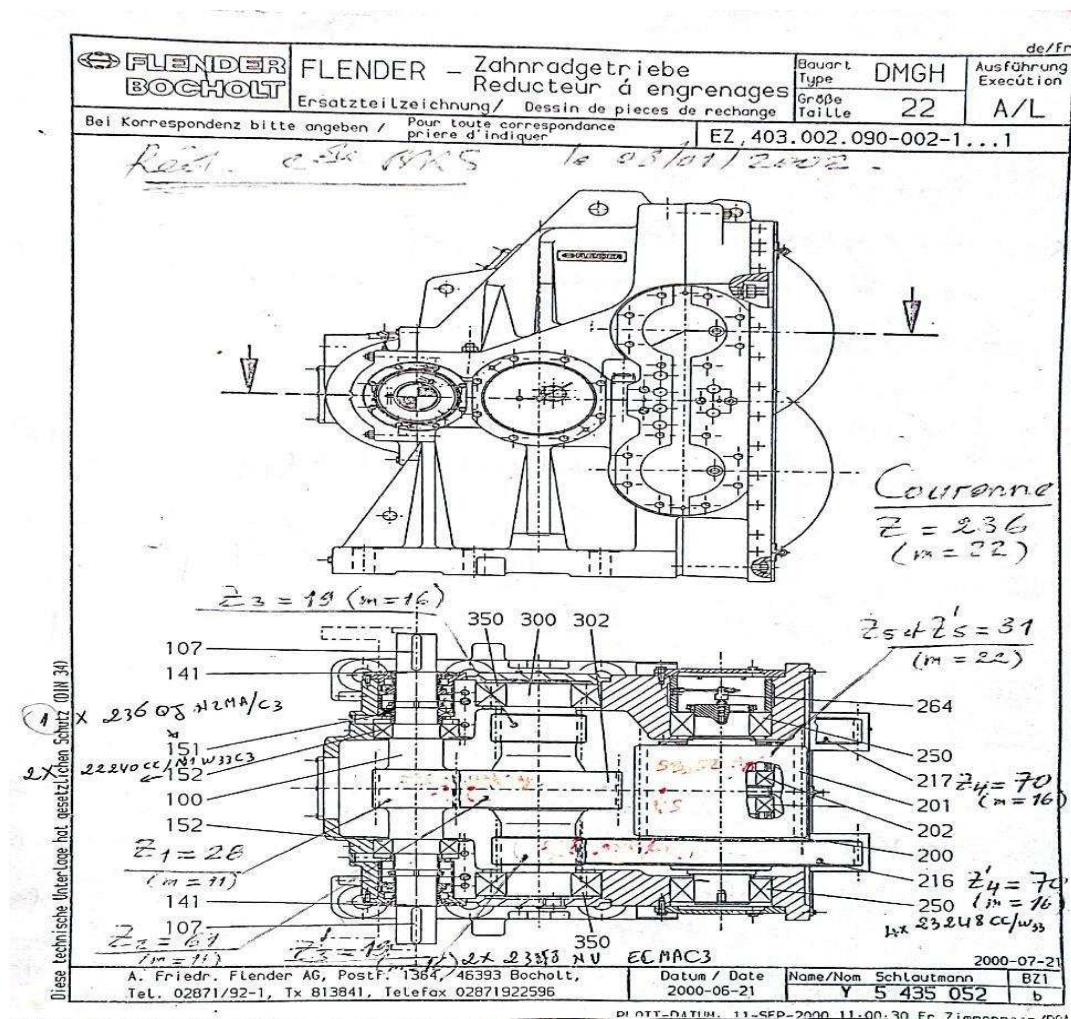


Figure 14: Commande combiFlex BK5

- **Calcul des fréquences de rotations, d'engrènements et de roulements**

Après avoir collecté les données nous avons alors calculé les fréquences caractéristiques de l'équipement BK5. Les résultats sont mentionnés dans (le tableau 14) pour mieux se renseigner sur la méthode de calcul voir annexe A.6.

Fréquences caractéristiques (Hz)				
Réducteur		Moteur		16.56
GV	16.56	Transmission	Accouplement GV	16.56
MV1	7.60		Accouplement MV	7.60
MV2	*		Accouplement PV	2.06
MV3	*	Harnais	Pignon	2.06
PV	2.06		Couronne	0.27
Fréquence d'engrènement GV/MV1				463.68
Fréquence d'engrènement MV1/MV2				*
Fréquence d'engrènement MV2/MV3				*
Fréquence d'engrènement MV3/PV				144.42
Fréquence d'engrènement PV/Couronne				63.95
Référence de Roulements				
Arbre GV		1*2360JN2MA/C3		
		2*22240CC/N1W33C3		
Arbre MV		2*23458NUECMAC3		
Arbre PV		4*23248CC/W33		
Fréquences des défauts des roulements				
La cage		6.95		
La bague interne		125.37		
La bague externe		172.8		
Les éléments roulants		100.14		

Tableau 8: Calcul des fréquences

Dans le but de concevoir une mesure correcte et reproductible pour être comparé par la suite, il faut choisir aisément des points de mesurages significatifs et bien précis, dans ce cadre d'après la fiche machine les meilleurs points de mesurages sont les paliers. Ceci est

applique dans la mesure des vibrations du broyeur clinker BK5 qui est composé de 10 paliers (figure 15)

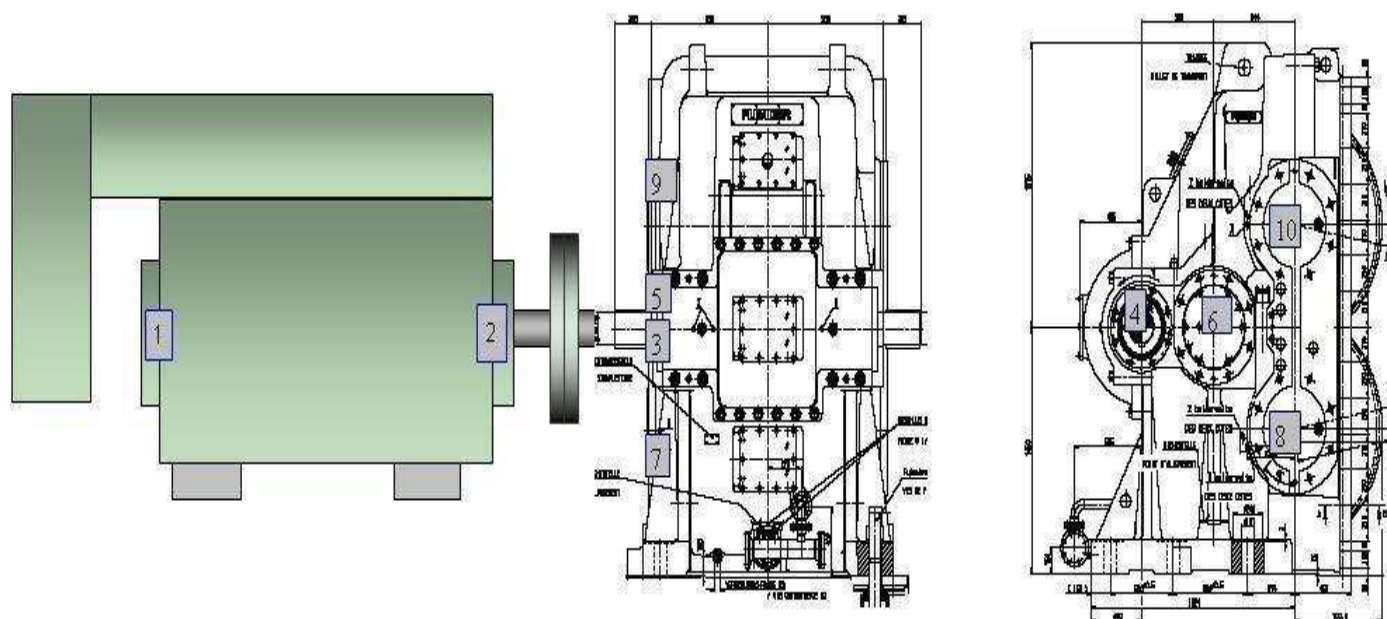


Figure 15: Repérage des points de mesures

Après avoir effectué les mesures des vibrations sur les paliers à l'aide l'appareil de mesure ONEPROD, nous avons obtenu les résultats suivants, l'analyse du niveau global de la vitesse vibratoire (NG Vit VIB) montre que certains paliers dépassent le seuil d'alarme 4.5 mm/s par rapport à la norme ISO 10816 (la figure 16) :

Vibration & Process	Huile	Images	Préco./Diagno./Avis	Actions	Archives				
Vue d'Ensemble des Paramètres, Signaux & Alarmes									
Paramètres de Fonctionnement	Vit Rot								
	994								
Afficher  Tous	 Autres	☒ Hard	☒ Soft	☒ Inhibé	☒ Non suivi				
VEP	4-RM-Ax	4-RM-RH	4-RM-RV	5-RM-Ax	5-RM-RH	5-RM-RV	6-RM-Ax	6-RM-RH	6-RM-RV
NG Vit Vib	2.20	2.31	3.21	2.12	2.39	1.63	1.56	5.23	1.98
NG Acc	0.806	0.776	0.995	0.677	0.408	0.396	0.354	0.555	0.402
Facteur Def	3.60	4.20	4.45	2.79	2.53	2.84	2.78	2.31	2.61
Kurtosis								2.37	

Figure 16: Mesure vibratoire obtenu

• Application

Les mesures observées sont normalement considérées comme suffisamment importantes pour endommager la machine.

Moteur

Etat global du moteur est admissible

Réducteur

Etat réducteur alarme

La sévérité vibratoire est de 5.23mm/s au point 6-RM-RH, cette valeur est générée en grande partie par une fréquence d'engrènement 144.5Hz et d'une amplitude de 4.66mm/s.

Le spectre représentant les résultats obtenus est ci-dessous :

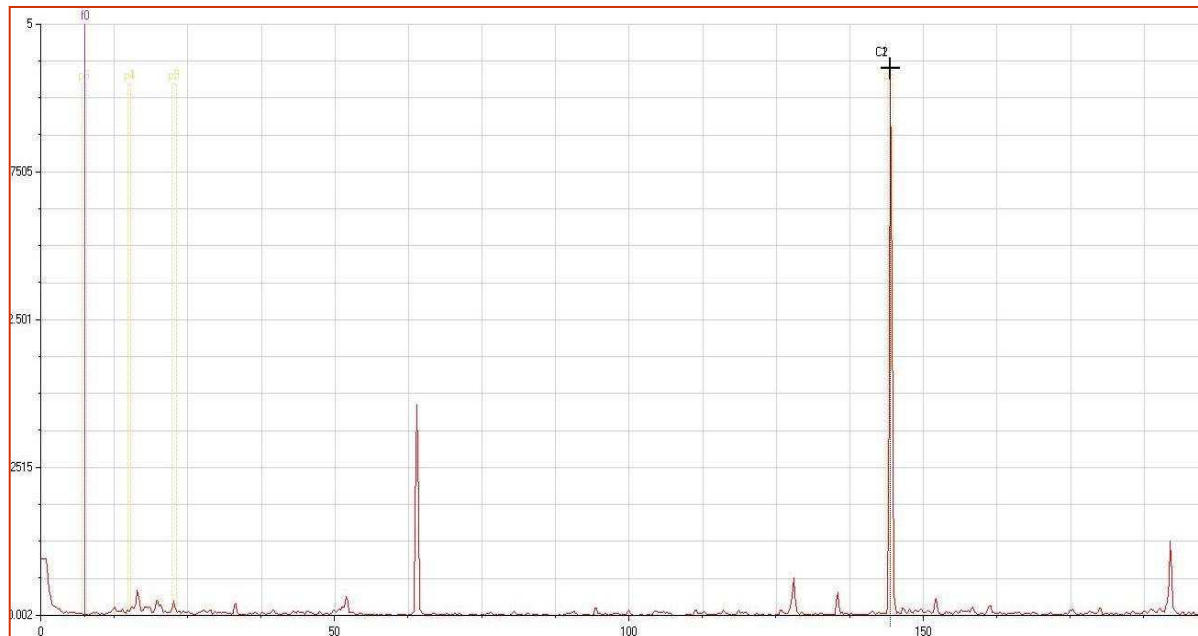


Figure 17: Spectre obtenu lors de la mesure

Les vibrations mesurées sont prépondérantes dans la direction horizontale plus que dans les directions verticale et axiale cela pourra être dû, soit à un phénomène de résonance de la structure du réducteur qu'une fréquence propre coïncide avec la fréquence d'engrènement 144.5Hz, soit à l'état d'engrènement. Il est nécessaire alors de :

- Surveiller l'état vibratoire du réducteur BK5 à des intervalles proches
- Consulter le constructeur pour qu'il garantisse le fonctionnement du réducteur pour une longue durée.
- Vérifier l'état des engrènements.

2. Ventilateur tirage séparateur Broyeur clinker BK5

Le ventilateur tirage séparateur du BK5 est un équipement qui prend place dans le 2^{ème} groupe à savoir les machines de moyennes puissance puisque sa puissance est de 110KW<300KW. Ce mécanisme joue aussi un rôle majeur vu ses fonctions dans un broyeur qui sont généralement : Transporter les fines dès leur création pour augmenter l'efficacité de broyage, refroidir la matière pour la ramener aux cibles imposées, ainsi éliminer les particules extra fines. On reprend la même étude faite pour le BK5.

• **Calcul des fréquences**

Sous - équipement	Puissance	Vitesse	Reference de roulement	
Moteur	110Kw	1480tr/min	1 LA6 310-4AA60-Z	
Ventilateur	****	1480tr/min	Palier fixe	[SKF] 2318 E C3
			Palier mobile	[SKF] 2314 C3

Tableau 10: Fréquence caractéristique du ventilateur

En reprenant la même procédure de mesure mais cette fois pour le ventilateur tirage séparateur on obtient les résultats mentionnés dans la figure suivante

4-VT-RH	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité	T-1	Réf.	Moy.	CdF	TypAl _m	DG-	AL-	pA-	pA+	AL+	DG+	Err
NG Vit Vib	IND-0001	Hard	04/05/2018 11:16:04	5.01	mm/s	4.21	11.4	7.82	CpD	Haut	0	0	0	2	3.5	8	0
NG Acc	IND-0002	Hard	04/05/2018 11:16:04	1.35	g	5.98	7.04	6.51	CpD	Sans							
Facteur Def	IND-0003	Hard	04/05/2018 11:16:04	4.41	DEF	6.19	6.58	6.38	CpD	Haut	0	0	0	4	8	9	0
3-VT-RH	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité	T-1	Réf.	Moy.	CdF	TypAl _m	DG-	AL-	pA-	pA+	AL+	DG+	Err
NG Vit Vib	IND-0001	Hard	04/05/2018 11:16:04	4.60	mm/s	2.59	5.11	3.85	CpD	Haut	0	0	0	2	3.5	8	0
NG Acc	IND-0002	Hard	04/05/2018 11:16:04	0.251	g	0.804	1.21	1.01	CpD	Sans							
Facteur Def	IND-0003	Hard	04/05/2018 11:16:04	2.84	DEF	4.07	3.80	3.94	CpD	Haut	0	0	0	4	8	9	0

Figure 18: Résultats des mesures

• **Application**

-La Sévérité vibratoire maximale au point 4VT-RH est de 5.01mm/s et d'amplitude 4.14mm/s.

-La sévérité vibratoire maximale au point 3VT-RH est de 4.60mm/s et d'amplitude 3.85mm/s.

Le spectre alors obtenu lors de l'extraction des données collectées est dans la figure 19.

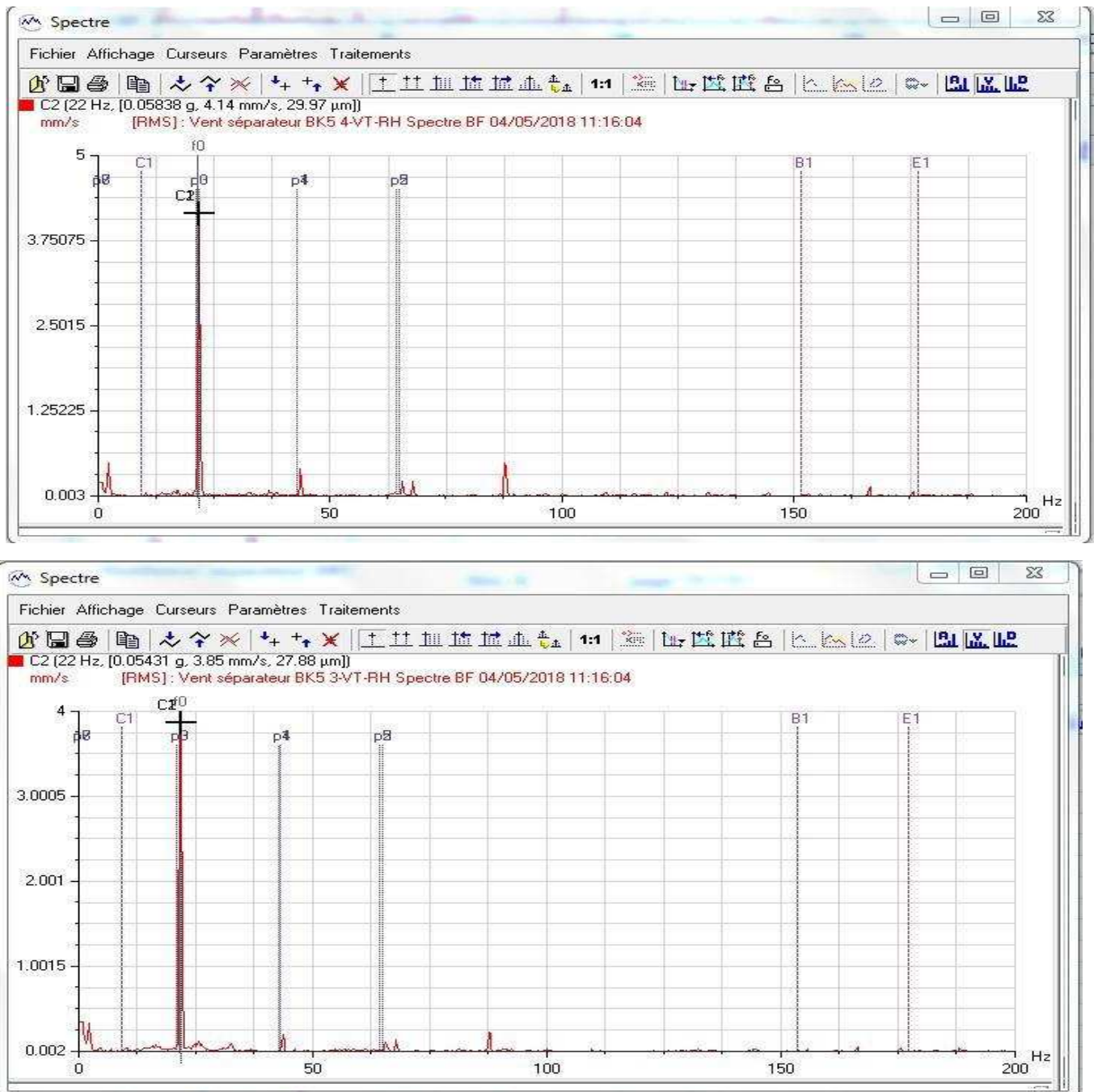


Figure 19: Spectre obtenu

Les vibrations sont prépondérantes dans la direction horizontale plus que les directions verticales et axiales les niveaux de vitesse sont généralement tolérables ceci est dû à un défaut de balourd léger soit à un dépôt de la poussière dans la turbine. Pour ceci nous avons lancé :

- une action de nettoyage de la turbine.
- un suivi vibratoire après l'action pour contrôler la tendance.

-Si la tendance des vibrations augmente on programmera un équilibrage par des masses



Figure 35 : Notification de lancement de nettoyage de turbine

3. Broyeur clinker BK4

Le broyeur clinker BK4 est aussi un des équipements stratégiques de LafargeHolcim et faisant partie du groupe 1 d'après la norme (puissance >300 KW) et des fondations rigides comme le BK5 mais ce dernier se caractérise par une puissance et une taille moins que ceux du BK5. Nous reprendrons alors la procédure et démarches d'études faite pour le BK5 et son ventilateur.

- **Calcul des fréquences caractéristiques**

Equipement		Fréquence de rotation(Hz)	Fréquence d'engrènement (Hz)	Réf roulement	Fréquences des défauts des roulements			
					ER	BI	BE	C
Moteur		16.66	*****	Paliers lisses				
Réducteur	Arbre GV	16.66	350	QJ232 [NTN]	95.2	112.5	151.3	6.93
				23036[SKF]	154.3	184.6	227.7	7.3
				23136[SKF]	133.3	159.7	203.2	7.26
	Arbre MV1	8.97	347.49	22330[SKF]	47.7	55.0	78.5	3.6
	Arbre MV2	8.97	347.49	22330 [SKF]	47.7	55.0	78.5	3.6
	Arbre MV3	8.97	347.49 152.56	22338 [SKF]	48.4	55.2	78.3	3.6
	Arbre PV	2.24	152.56	23056 [SKF]	25.9	30.5	36.1	1.0

				24056 [SKF]	22.4	27.1	32.9	1.0
pignon	2.22	51.1	Palier lisse					
Couronne	0.297	51.1	Palier lisse					

Tableau 11: fréquence caractéristique BK4

Après avoir effectué les mesures des vibrations sur les paliers à l'aide l'appareil de mesure ONEPROD XPR, nous avons obtenu les résultats suivants, l'analyse du niveau global de la vitesse vibratoire (NG Vit VIB) montre que certains paliers dépassent le seuil d'alarme 4.5 mm/s par rapport à la norme ISO 10816 (la figure 20) :

G1-Ax	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité
Ng-Vitesse vib	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	1.20	mm/s
Ng:Acceleration003	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.080	g
Ng:Acceleration	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.080	g
G1-RH	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité
Ng-Vitesse vib	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	2.03	mm/s
Ng:Acceleration003	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.104	g
Ng:Acceleration	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.104	g
G1-RV	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité
Ng-Vitesse vib	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	4.91	mm/s
Ng:Acceleration003	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.171	g
Ng:Acceleration	NG Acc	Hard	21/05/2018 13:44:03	0.171	g

Figure 20: Mesure obtenu

- **Application**

Les mesures observées sont normalement considérées comme suffisamment importantes pour endommager la machine d'après la norme ISO10816.

Moteur

Etat global du moteur est inadmissible.

Sévérité maximale au point G1-RV est de 4.91mm/s et d'amplitude 3.83mm/s.

Réducteur

Etat normal

Le spectre obtenu de cette mesure de vibration de la commande du broyeur clinker BK4 est illustré dans la figure suivante

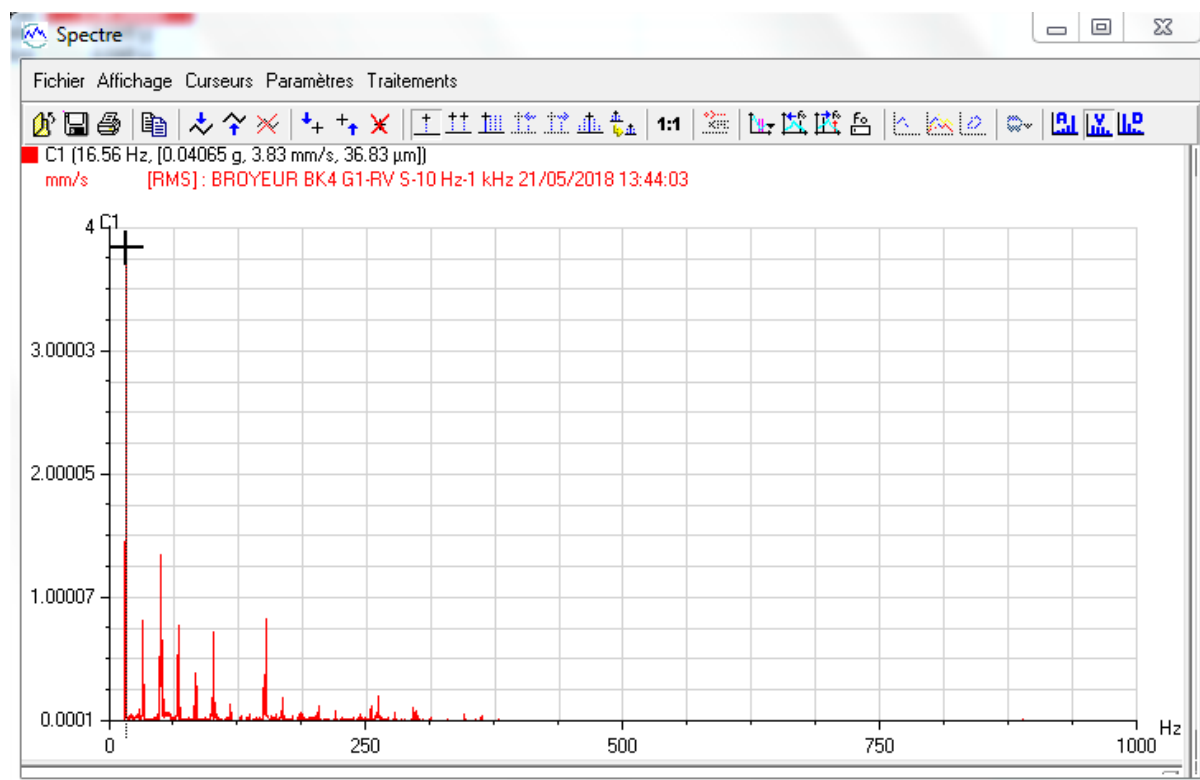


Figure 21: Spectre obtenu

Les vibrations sont prépondérantes dans la direction verticale plus que dans les directions horizontales et axiales ceci est dû d'après le spectre obtenu à un défaut de balourd qu'il faut vivement le rectifier en procédant à un équilibrage par des masses. Pour cela on a lancé une action d'équilibrage.

4. Ventilateur tirage séparateur Broyeur clinker BK4

Comme tout autre ventilateur comme celui du BK5, le ventilateur tirage séparateur du BK4 fait partie aussi du 2eme groupe jouissant d'une puissance <300KW et jouant le même rôle que celui du BK5, mais se caractérisant d'une vitesse variable, nous allons effectuer le même travail.

• Calcul des fréquences caractéristiques

Equipement	Paliers (Roulements/coussinets)	
	Repère	Désignation
Moteur	C.A	
	C.O. A	
Ventilateur	Palier. Fixe	22213 CCK
	Palier. Libre	22313 CCK

Tableau 12: Fréquence caractéristique du ventilateur

En effectuant les mesures à l'aide de l'appareil ONEPROD, nous avons relevé les résultats suivants qui sont d'après la norme ISO10816 des mesures tolérables et admissibles, mais un défaut figure au niveau du point 4-VT-RH

NG Vir Vib	IND-0001	Hard	21/05/2018 13:53:34	2.31 mm/s	7.40	8.03	7.72	CpD	Haut	0	0	0	3	8	8	0
NG Acc	IND-0002	Hard	21/05/2018 13:53:34	1.27 g	0.474	0.483	0.479	CpD	Sans							
Facteur Def	IND-0003	Hard	21/05/2018 13:53:34	4.34 DEF	4.98	4.22	4.60	CpD	Haut	0	0	0	4	8	8	0
4-VT-RH	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité	T-1	Réf.	Moy.	CdF	TypAl m	DG-	AL-	pA-	pA+	AL+	DG+ Err
NG Vir Vib	IND-0001	Hard	21/05/2018 13:53:34	4.09 mm/s	20.3	24.9	22.6	CpD	Haut	0	0	0	3	8	8	0
NG Acc	IND-0002	Hard	21/05/2018 13:53:34	1.54 g	0.984	0.929	0.957	CpD	Sans							
Facteur Def	IND-0003	Hard	21/05/2018 13:53:34	4.41 DEF	5.15	4.43	4.79	CpD	Haut	0	0	0	4	8	8	0
4-VT-RV	3	H/S	Dernière Date	Valeur	Unité	T-1	Réf.	Moy.	CdF	TypAl m	DG-	AL-	pA-	pA+	AL+	DG+ Err
NG Vir Vib	IND-0001	Hard	21/05/2018 13:53:34	2.33 mm/s	4.41	5.59	5.00	CpD	Haut	0	0	0	3	8	8	0
NG Acc	IND-0002	Hard	21/05/2018 13:53:34	1.74 g	1.07	0.812	0.942	CpD	Sans							
Facteur Def	IND-0003	Hard	21/05/2018 13:53:34	5.20 DEF	6.07	3.88	4.98	CpD	Haut	0	0	0	4	8	8	0

Figure 22: Mesure obtenue

- **Application**

Comportement non tolérable pour un service de longue durée en continu

Moteur électrique :

Etat global acceptable

Ventilateur

Etat global tolérable mais la partie palier COA à corriger.

Les mesures relevées nous donnent un spectre qui figure ci-dessous :

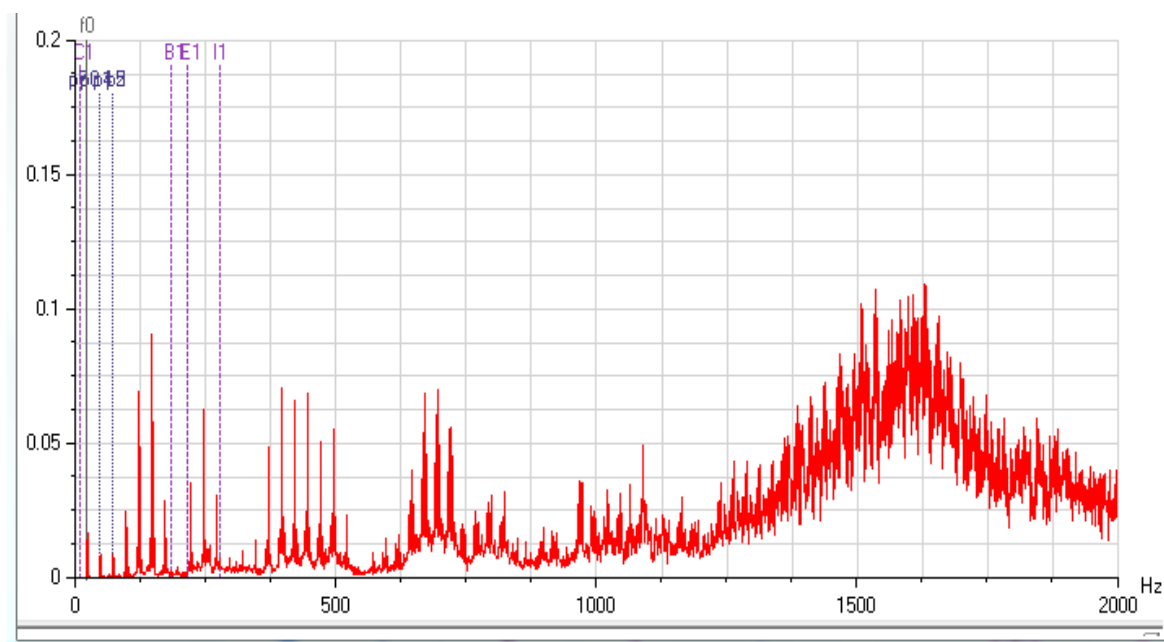


Figure 23: Spectre observé dans la moyenne fréquence

Les vibrations sont prépondérantes dans la direction verticale plus que dans les directions horizontales et axiales, on peut juger alors que c'est choc qui est dû probablement à un jeu dans le palier du côté opposé à l'accouplement ou à des défauts de montage pour ceci nous avons lancé une action pour le réglage de jeu.

Mots techniques

BK : Broyeur clinker

Arbre GV : arbre à grande vitesse

Arbre MV : arbre à moyenne vitesse

Arbre PV : arbre à petite vitesse

CA : côté accouplement

COA : côté opposé à l'accouplement

BC : broyeur Cru

BM : bureau de Méthode

PF : Palier fixe

PL : Palier Libre

Conclusion générale

Dans le but d'obtenir notre licence en Sciences et Techniques à la faculté des sciences et techniques de Fès, notre formation est couronnée par un stage d'application d'une durée de 2 mois. Ce stage a été effectué au sein de la société LafargeHolcim Meknès. C'est une fusion entre deux entreprises occupant la position de leader dans les produits des matériaux de construction, et qui dans le cadre de son amélioration continue, a opté pour le perfectionnement de la maintenance préventive par analyse vibratoire des équipements stratégiques de son usine.

Notre travail en tant que stagiaires fût l'installation de cette stratégie de surveillance par analyse vibratoire à l'ensemble des équipements stratégiques de l'usine de LafargeHolcim Meknès. Cette amélioration contribuera au perfectionnement et à la fiabilisation du fonctionnement des équipements mécaniques, ainsi, à l'optimisation des dépenses de l'entreprise en termes de couts de pannes et du temps de maintenance et donc aura également de l'effet directe sur un manque de gain en production.

En premier temps nous étions censés d'acquérir une formation solide dans le domaine de l'analyse vibratoire vu que c'était notre première expérience et premier contact avec ce domaine, nous étions alors invités à une autoformation afin de réussir notre objectif.

Au cours de notre stage nous avons commencé par l'étude de la faisabilité de notre projet en raisonnant en termes de coûts de non-surveillance et en illustrant ceci par des exemples réels de pannes en introduisant les couts directs et indirects. Puis on a passé à la décision de la faisabilité en évoquant les avantages et les inconvénients de la maintenance prévisionnelle par analyse vibratoire. Vu que notre projet a plus d'avantages que d'inconvénients nous avons alors lancé le démarrage.

Le travail que nous avons réalisé a démarré par la classification des équipements de l'entreprise selon le schéma de criticité proposé par la société. Ce schéma se base principalement sur la classification de la TPM qui se caractérise par 3 classes de criticités A, B et C.

Après avoir identifié les équipements les plus stratégiques. Nous avons procédé à l'étude du contexte de surveillance en cernant le périmètre du travail, la décomposition fonctionnelle ainsi que l'étude de l'AMDE. Pour pouvoir réaliser une première préparation à la surveillance, nous avons procédé à la collection des données. En établissant une fiche machine qui regroupe des informations sur les équipements. Elle commence par la codification du mécanisme puis le regroupement de ses caractéristiques mécaniques et

électriques générales ensuite, le calcul des fréquences et finit par le repérage des points de mesures.

Par la suite, nous avons mis en place un plan de surveillance pour chaque équipement celui-ci dépendra de la criticité de l'équipement. Pour la classe A, nous avons proposé 2 types de suivis : un qui sera hebdomadaire par un capteur de vibration déplaçable (VibPen) et un relevé global mensuel à l'aide de l'appareil professionnel ONEPROD. Pour la classe moins critique B, un relevé global bimensuel et pour la classe 3, un relevé global trimestriel. Ainsi nous avons mis en place des fiches techniques qui vont initialiser les techniciens aux vibrations et à la détection des défauts à un stade précoce de plus elles aideront les visiteurs à l'analyse des spectres obtenus. Nous avons aussi suggéré une fiche de défauts qui permettra un suivi rigoureux et fiable, vu qu'elle sera comme une documentation sur ces machines et les actions préventive entretenues.

Finalement, pour concrétiser notre projet de mise en place d'une maintenance prévisionnelle par analyse vibratoire. Nous avons appliqué l'analyse vibratoire sur certains équipements de LafargeHolcim notamment la commande du broyeur clinker BK5, le ventilateur séparateur BK5 et la commande du broyeur clinker BK4 ainsi que son ventilateur séparateur. Les relevés que nous avons pris des spectres que nous avons analysé ont montré que l'état vibratoire des machines étudiés est médiocre et risque de passer dans l'intervalle inadmissible, vu que certains paliers dépassent le seuil d'alarmes 4.5mm/s par comparaison avec la norme ISO10816. Pour ceci nous avons programmé des actions préventives à entretenir, dont une de ces actions a été réalisé et mise en place.

Lors de nos derniers jours on a remarqué que notre projet a eu un effet positif vu que la fiche de défauts a été validé par Mr WAZGUITI ABDELATIF responsable et superviseur au sein de LafargeHolcim et instaurée dans le système de l'entreprise .

En guise de conclusion, nous ne pouvons guère nier l'importance de ce stage vu l'opportunité que nous avons eu de travailler sur un sujet qui apportait de nouvelles connaissances techniques et scientifiques pour nous et nous a donné une valeur ajoutée et enrichissante à notre formation académique.

Bibliographie

- Notions de Base de Certification d'Inspection – Outils d'Inspection : Introduction à la surveillance par Analyse vibratoire
- Alain Boulenger, Christian Pachaud : Aide-mémoire Surveillance des machines par Analyse des Vibrations
- Maintenance Prédictive et préventive basée sur l'analyse vibratoire des rotors: EL HANNANI Abdelhak, REFASSI Kaddour, EL MAICHE Abbes, BOUAMAMA Mohamed Laboratoire de Mécanique des Solides et des Structures Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Sidi Bel Abbes.
- Hubertfaigner : stratégies de Maintenance : Analyse vibratoire Des machines Tournantes
- Cours de techniques de surveillance : L'analyse spectrale.
- AREVA, analyse vibratoire des machines tournantes - Origine des vibrations, 2006, 73 pages.
- AREVA, analyse vibratoire des machines tournantes - La surveillance des machines, 2006, 85 pages.
- Stratégie de Maintenance : Lycée Albert EINSTEIN : Pole d'enseignement.
- O. DJEBILI, Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement, thèse mécanique, Université de Reims Champagne Ardenne, 2013.
- OneproD : Manuel d'utilisateur, Logiciel de maintenance prédictive et d'analyse vibratoire. OneporD XPR-300.

Table des matières

Annexe A1 : Généralités sur l'analyse vibratoire	3
I. Introduction sur les techniques de maintenance conditionnelle	3
II. Objectifs et démarches principales d'analyse vibratoire :	3
1) Objectifs	3
2) Démarches principales	3
3) Organisation du programme de maintenance prévisionnelle par analyse des vibrations	4
III. Choix d'une technique d'analyse	5
IV. Principaux défauts des machines tournantes et leurs manifestations	8
1) Le défaut de balourd	8
❖ Manifestation	8
2) Défaut d'alignement	9
➤ Délignage angulaire	9
➤ Délignage axial	10
➤ Manifestation	10
3) Défaut d'engrenages	11
➤ Signatures vibratoires des défauts d'engrènement	11
4) Les défauts de roulements	12
➤ Signatures vibratoires des principaux défauts	13
Remarque	15
• Seuil d'intervention	16
Annexe. A2 : Description du matériel utilisé	17
I. Introduction	17
1. Description du logiciel NEST	17
2. Description du logiciel ONEPROD XPR	17
3. Le collecteur de données FALCON	19
II. Initialisation des données sur les logiciels d'analyse vibratoire	20
1. Création des emplacements du parc machine	20
2. Création des machines	21
III. Repérage des points de mesures sur site	22

1. Prise des mesures.....	23
Annexe.A3 : Etude AMDE des équipements	25
I. Introduction	25
Annexe A.4 : fiche de défauts	31
Annexe A.5 : fiches et guides techniques des défauts de composants	33
Annexe A.6 : fiches machines	34
Annexe A.7 : Calcul des fréquences	35

Annexe A1 : Généralités sur l'analyse vibratoire

I. Introduction sur les techniques de maintenance conditionnelle

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation (ou de performance). Il existe différentes techniques d'analyse (*figure 1*) tels que l'analyse vibratoire, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc...

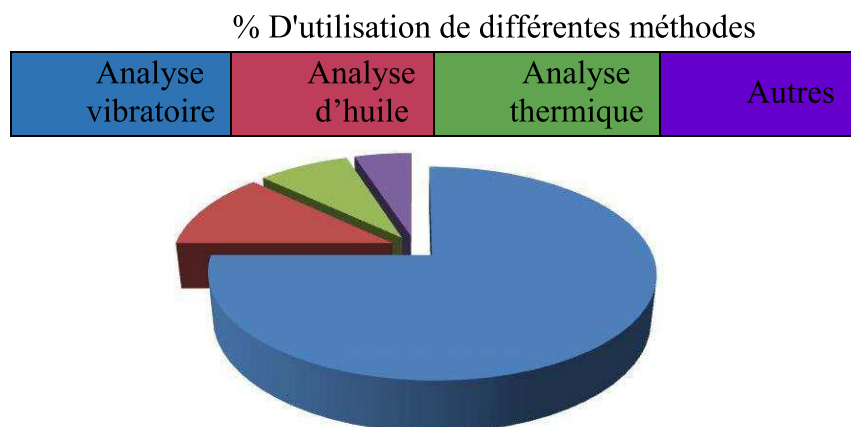


Figure 1 : Différents méthodes d'analyse

II. Objectifs et démarches principales d'analyse vibratoire :

1) Objectifs

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- ❖ La détection des défauts.
- ❖ L'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- ❖ Soit dans le domaine temporel
- ❖ Soit dans le domaine fréquentiel
- ❖ Soit dans les deux à la fois

2) Démarches principales

Ce sont des techniques reposant essentiellement sur la comparaison des mesures vibratoires, globales ou spectrales, effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions, si possible, identiques. L'évolution des défauts en exploitant le signal vibratoire

sera ainsi suivi. Il convient, toutes fois, de bien distinguer les deux principales étapes de la démarche utilisée en maintenance prévisionnelle basée sur les analyses des vibrations :

La surveillance : la démarche consiste à suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence (*la signature*) alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable. Idéalement, la signature est établie à partir d'une première campagne de mesures sur la machine neuve ou révisée et remise en état jugé "bon" ou "normal".

Le diagnostic : il met en œuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il fait suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance et il permet de désigner l'élément de la machine défectueux. Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis la détection d'une anomalie : défaut naissant, progressant ou générant une évolution dangereuse du signal vibratoire. Le diagnostic fait appel à des connaissances approfondies en mécanique et une formation spécifique en analyse du signal.

3) Organisation du programme de maintenance prévisionnelle par analyse des vibrations

Il est évident pour la réussite d'une mise en place d'une maintenance prévisionnelle de prendre en compte les points principaux suivants :

1. Sélectionner et codifier les machines à surveiller.
2. Etudier le contexte d'utilisation des machines à surveiller, ses particularités et ses points faibles (**Etude AMDE**).
3. Choisir les indicateurs de surveillance les mieux adaptés à chaque machine et le repérage des points de mesure.
4. Etablir les chaînes et les schémas cinématiques, documentation vibratoire, le calcul des fréquences caractéristiques de chaque installation, la périodicité des relevés ainsi que la création des routes de collecte.
5. Enregistrer les machines dans la base de données du système ONEPROD, prendre les mesures, gérer les données vibratoires et établir des courbes de tendances.
6. Au cas où une alarme a été déclenchée cette étape permet de faire un diagnostic précis afin de déterminer l'élément défaillant.
7. Cette étape comprend les corrections nécessaires lorsqu'un défaut a été formellement établi.
8. Fiabiliser la surveillance et enrichir l'expérience du personnel.

III. Choix d'une technique d'analyse

Afin de faire un choix réussi et bien précis de la technique d'analyse on évoquera les avantages et les inconvénients de chaque technique (tableau 1)

	Principaux avantages	Principaux limitations	Champs d'applications privilégiés
Analyse vibratoire	-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).	-Spectre parfois difficile à interpréter -Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuse	-Détection des défauts de tous les organes cinématique de la machine (balourd, défaut d'alignement, jeux...) et de sa structure
Analyse d'huile	-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.	-Ne permet pas de localiser précisément le défaut. -Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.	-Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrifiant analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	-Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. -Interprétation souvent immédiate des résultats.	-Détection des défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire -Contrôle limité à ce que « voit » la caméra (échauffement de surface)	-Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)

		-Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi	
Analyse acoustique	-Permet de détecter l'apparition des défauts audibles -Autorise une surveillance continue	-Sensibilité au bruit ambiant -Diagnostic souvent difficile à réaliser -Problèmes de répétabilité des mesures	-Détection d'un bruit inhabituel pouvant par la suite être analysé par analyse vibratoire

Tableau 1: Différents techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante

La surveillance des machines ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut, mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un *diagnostic* approfondi pour le localiser précisément et quantifier sa sévérité. **L'analyse vibratoire** est une technique qui permet de réaliser ce diagnostic. Pour plus de précision, le diagnostic par analyse vibratoire nécessite d'étudier (Tableau 2) :

<i>Indicateurs vibratoires simples</i>	Principaux avantages	Principales limitations
Mesure d'accélération	Indicateur simple et fiable	-Détection tardive -Diagnostic difficile -Peu adapté aux faibles vitesses de rotation -Détermination des seuils empiriques
Kurtosis (moment statique d'ordre 4)	-Adapté à la surveillance des roulements, des arbres tournant à de faible vitesse de rotation (<600tr/min) -Détection à stade précoce	-Décroissance de l'indicateur en fin de vie du roulement -Diagnostic souvent difficile

	-Grande sensibilité aux chocs périodiques et non périodiques	
<i>Facteur de crête (rapport entre la valeur crête et la valeur efficace)</i>	-indépendant des conditions de fonctionnement (dimensions des roulements, charge, vitesse de rotation)	-Décroit lorsque les défauts se développent

Tableau 2: Technique d'analyse vibratoire

<i>Méthode d'analyse vibratoire qualitative</i>		
<i>Analyse temporelle</i>	-Adapté aux faibles vitesses de rotation -Permet d'analyser des phénomènes non périodiques (chocs aléatoires, chocs répétitifs à vitesse variable)	-Diagnostic souvent difficile
<i>Analyse fréquentielle</i>	-Permet de localiser les défauts et de réaliser le diagnostic fiable -Ne nécessite pas une mesure supplémentaire	-interprétation des spectres parfois difficile -Détection tardive -inopérant à vitesse ou à charge variable
<i>Analyse d'enveloppe</i>	-Détection de défauts à un stade précoce -permet de déterminer d'une manière fiable et rapide les fréquences de répétition du choc	-interprétation des spectres parfois difficile -nécessite de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt -Inopérant à vitesse ou à charge variable -généralement associé à d'autres indicateurs kurtosis par exemple

<i>Analyse cepstrale</i>	-met en évidence les composantes périodiques d'un spectre -permet de localiser et déterminer l'origine des défauts induisant les chocs périodiques -interprétation des spectres complexes	-utilisation en complément d'autres techniques
---------------------------------	---	--

Tableau 3: Méthode d'analyse

IV. Principaux défauts des machines tournantes et leurs manifestations

1) Le défaut de balourd

Un balourd est caractérisé par un déséquilibre massique autour de l'axe de rotation (**l'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation**) qui produit des forces d'inertie (figure 2). Ces forces agissent sur les corps en rotation et surtout sur les roulements et excitent les paliers.

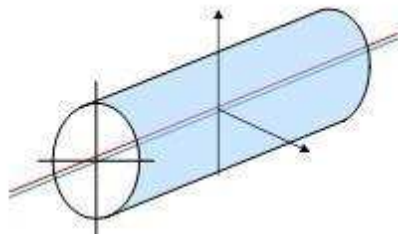


Figure 2: Défaut de Balourd (l'axe d'inertie en bleu, l'axe de rotation en rouge)

❖ Manifestation

Ce défaut se manifeste par :

L'augmentation du niveau global choisi en moyennes fréquences, V_{eff} [0-1000Hz],

La nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation, fr).

$$f_r = \frac{N}{60}$$

N : vitesse de rotation.

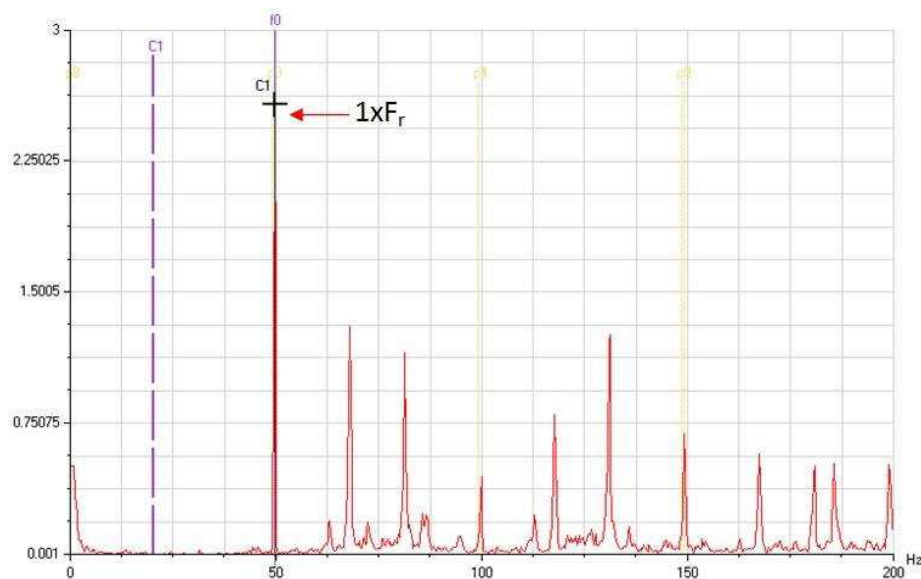


Figure 3 : Spectre réel d'un défaut de balourd (réf : Hubertfaigner)

➤ **Origine des différents types de balourds :**

↪ **Balourd d'origine mécanique** : lorsqu'il y a une masse de matière qui se détache du rotor ou vient se déposer sur ce dernier .On observe généralement une évolution instantanée des vibrations.

↪ **Balourd d'origine thermique** : lorsque les rotors ne sont pas homogènes ou la température n'est pas répartie de façon uniforme, les rotors se déforment sous l'effet de contraintes thermiques :

- Déformation des rotors de turbines,
- Déformation des rotors d'alternateurs ou de moteurs électriques.

2) Défaut d'alignement

Le délignage est un défaut commun dans les machines tournantes. En pratique, la puissance mécanique est généralement transmise par des arbres couplés qui sont nominalement alignés. Mais, l'alignement parfait ne peut être réalisé et ceci pour différentes raisons. Le délignage est dû au fait que l'arbre menant et l'arbre mené ne soient pas axialement alignés. Alors on distingue deux types de délignage :

➤ **Délignage angulaire**

Il est observé lorsque les axes des arbres sont dans le même plan mais pas parallèles.

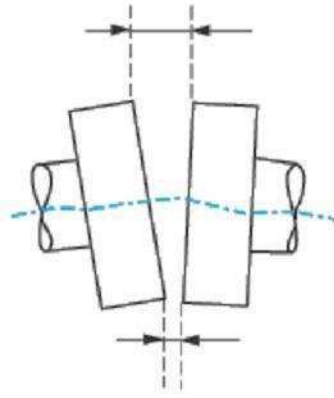


Figure 4: Délignage angulaire

➤ Délignage axial

Il se produit lorsque les axes des arbres sont parallèles mais ne coïncident pas.

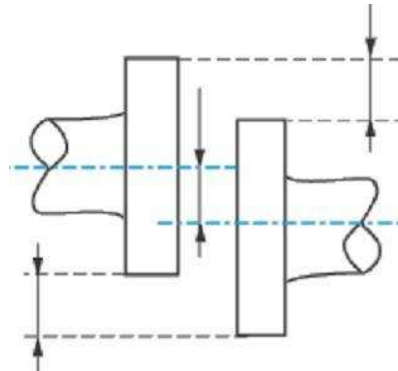


Figure 5 : Délignage axial

Généralement, on est en présence des deux types de délignage à la fois. Le délignage peut être dû à un alignement incorrect à l'origine. Mais il peut également augmenter en fonctionnement à cause de certaines contraintes de type thermique ou élastique. Il peut être due également aux diverses distorsions des fondations de la machine.

➤ Manifestation

Ce défaut se manifeste au cours de :

- L'augmentation du niveau global choisi en moyennes fréquences V_{eff} [0-2000]
- L'augmentation des proches harmoniques de F_r . Le plus souvent l'harmonique **de rang 2** tend à s'élever au-delà de la fréquence fondamentale. Parfois le phénomène se transmet au 3^{ème} et 4^{ème} harmonique.

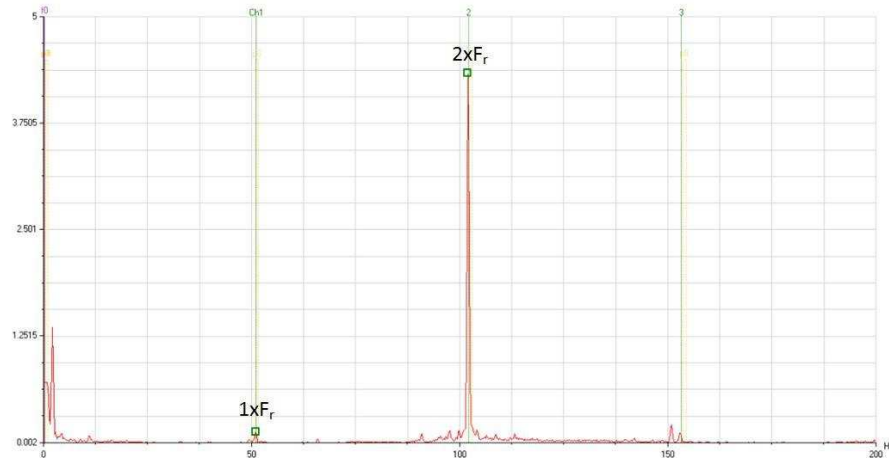


Figure 6 : Spectre d'un délignage(réf :hubertfaigner)

3) Défaut d'engrenages

Si nous considérons un engrenage composé de deux roues dentées 1 et 2 et présentant **Z1** et **Z2** dents et tournant aux fréquences **f1** et **f2** respectivement. A chaque fois qu'une dent de la roue menante s'engage dans la roue menée, il se produit une prise de charge périodique au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents. Soit :

$$f_{eng} = Z_1 \times f_1 = Z_2 \times f_2$$

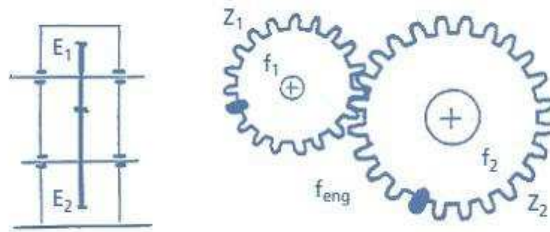


Figure 7: Fréquence d'engrènement

Si la denture est correcte et si aucun phénomène parasite ne vient perturber l'engrènement, le spectre vibratoire est constitué **de raies dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement f_{eng} et à ses harmoniques.**

➤ Signatures vibratoires des défauts d'engrènement

Si l'une des roues présente une dent détériorée, il se produit un choc dur, à chaque tour du pignon. Le spectre correspondant montre **un peigne de raies dont le pas est égales à la fréquence de rotation du pignon détérioré s'étalant jusqu'aux hautes fréquences.**

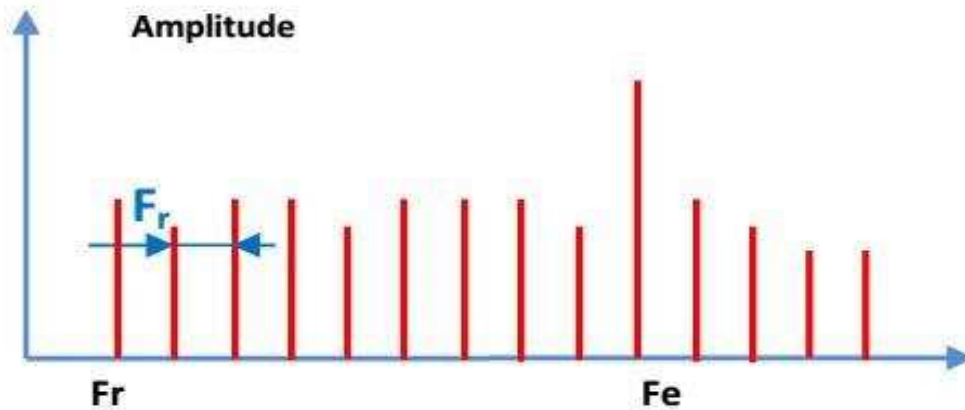


Figure 8 : Défaut de détérioration d'une dent (réf hubertfagner)

4) Les défauts de roulements

Les roulements sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre. Mais ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Les vibrations générées au sein d'un roulement sont de faible amplitude, ressemblant à un bruit aléatoire. Lors de l'apparition d'une avarie, une impulsion se produit chaque fois que le défaut participe à un contact (chocs périodiques).

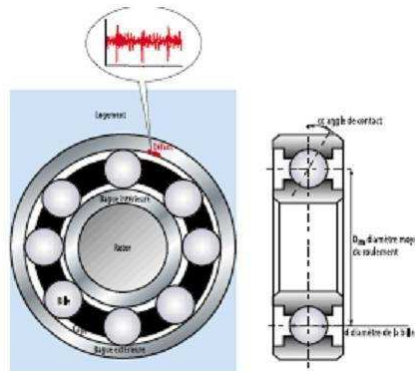


Figure 9 : Représentation de défaut sur la bague extérieure d'un roulement

Les fréquences caractéristiques des défauts de roulement sont spécifiques suivant la partie du roulement qui est endommagée (Tableau 4) :

Pour éviter les arrêts de production coûteux, dus à la défaillance imprévue des roulements, il faut en permanence les surveiller, et "traquer" l'apparition du moindre défaut. Pour cela, plusieurs techniques peuvent être adaptées. Des méthodes classiques d'analyse vibratoire.

Type de défaut	Fréquence d'apparition
Défaut sur la piste externe	$F_{ext} (Hz) = \frac{n}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)$
Défaut sur la piste interne	$F_{int} (Hz) = \frac{n}{2} F_r \left(1 + \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)$
Défaut sur la bille	$F_{bille} (Hz) = \frac{D_m}{d} F_r \left(1 - \left(\frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)^2 \right)$
Défaut sur la cage	$F_{ext} (Hz) = \frac{1}{2} F_r \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha \right)$

Tableau 4: fréquence de défauts d'un roulement

α : angle de contact

d : diamètre de la bille

D_m : diamètre du rouleau

n : nombre de bille ou de rouleaux

F_r : fréquence relative entre les pistes internes et les pistes externes

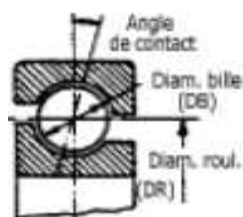


Figure10: caractéristique des fréquences de défauts de roulements

➤ Signatures vibratoires des principaux défauts

Les principales avaries touchant les roulements sont présentées ci-dessous :

▪ Défaut de type écaillage affectant la bague externe

Un défaut de type écaillage affectant la bague externe d'un roulement a pour image vibratoire un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence du défaut. À chaque composante de ce peigne, est associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation, en cas de charge dynamique importante.

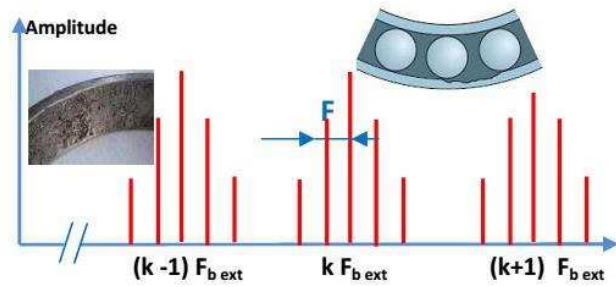


Figure 11 : Défaut de roulement de type écaillage sur la bague extérieure (réf : hubertfaigner)

▪ **Défaut de type écaillage affectant la bague interne**

Un défaut de type écaillage affectant la bague interne de roulement a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation

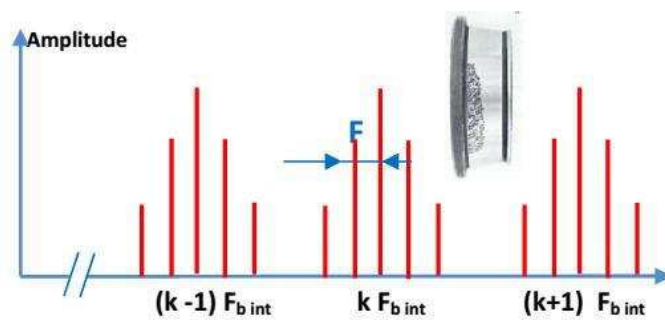


Figure 12: Défaut de roulement de type écaillage sur la bague intérieure (réf : hubertfaigner)

➤ **Défaut de type écaillage sur un élément roulant**

Un défaut de type écaillage sur un élément roulant (bille, rouleau ou aiguille) a pour image vibratoire un peigne de raies. A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage.

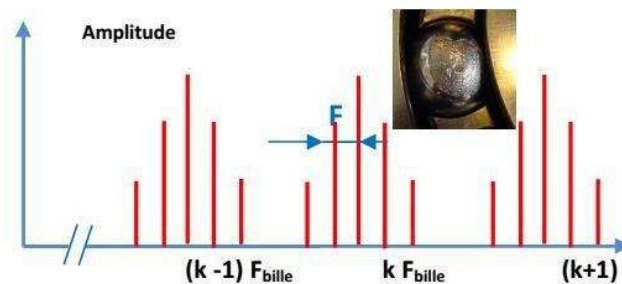


Figure 13: Défaut de roulement de type écaillage de l'élément roulant (réf : hubertfaigner)

■ **Défauts de type déversement de bague**

Le défaut de type déversement de bague extérieure (figure14) s'exprime par une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée, et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude très faible.

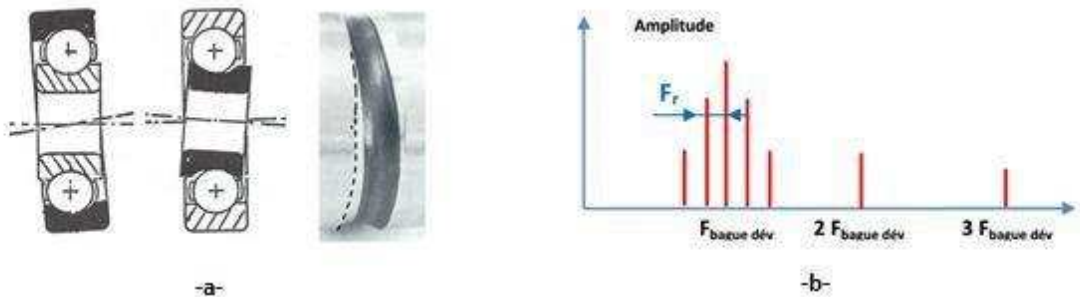


Figure 14 : -a- Défaut de déversement des bagues d'un roulement.

-b- Image vibratoire théorique d'un défaut de type déversement de bague (réf : hubertfaigner)

Remarque

■ Par rapport à une mesure effectuée **en mode vitesse**, la mesure en mode déplacement aura pour effet d'atténuer toutes les composantes moyennes et hautes fréquences et d'amplifier la composante basse fréquence.

■ En revanche, la mesure **en mode accélération** aura pour effet d'atténuer les composantes basses fréquences et d'amplifier la composante haute fréquence.

Le tableau ci- dessous présente les niveaux de surveillance et leurs domaines

Niveau global	Domaine de surveillance
Déplacement (um c/c)	Phénomènes lents basses fréquences (balourd, lignage, instabilité de paliers ...)
Vitesse (mm/s eff)	Moyennes fréquences (balourd, lignage, instabilités de paliers Tous types de machines (cavitation..) cas des pompes
Accélération (g eff)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences (engrenages , roulements ,passages d'ailettes,cavitation,pompage)

Tableau 5:Domaine de surveillance

- **Seuil d'intervention**

La détermination des seuils d'intervention est certainement l'une des opérations les plus importantes puisque, tant que la valeur des indicateurs choisis pour la surveillance n'excède pas une valeur prédéfinie, l'installation est considérée en bon état et aucune procédure d'investigation complémentaire ou d'intervention corrective n'est engagée.

Selon la norme ISO 10816 les seuils d'intervention sont présentés dans le tableau suivant :

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
Machine			Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
	in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71		good		
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		satisfactory		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		unsatisfactory		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		unacceptable		
	1.10	45.0				

Tableau 7: seuils d'intervention selon la norme ISO 10816

N.B: les seuils donnés par la norme ne sont qu'une proposition basée sur une statistique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de LAFARGE d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être revus à la baisse ou à la hausse.

Annexe. A2 : Description du matériel utilisé

I. Introduction

LAFARGE-Meknès dispose d'un système de maintenance conditionnelle « **ONEPROD** » composé d'un ensemble de logiciels d'analyse vibratoire et d'un collecteur de donnée ONEPROD FALCON avec un capteur triaxial sans fil. Nous présentons ci-dessous le matériel utilisé :

1. Description du logiciel NEST

Le logiciel *NEST* fait partie du système de maintenance conditionnelle **ONEPROD** et comprend les modules suivants :

- **Supervision** explore l'état des machines.
- **Supervision Instrument** explore l'état des instruments de surveillance online MVX.
- **Setup Machine** gère l'organisation des machines dans les bases de données. Il intègre un outil puissant qui permet de créer facilement une nouvelle machine, simplement à partir de sa description mécanique.
- **Setup Collection** gère les collections des machines qui peuvent être utilisées comme rondes pour le chargement du collecteur de données .
- **Collecte** charge et décharge les rondes à l'aide du collecteur de donnée.

2. Description du logiciel ONEPROD XPR

Le logiciel **ONEPROD XPR** est un système d'information de maintenance conditionnelle multi-ethniques permettant l'acquisition de mesures vibratoires, procès, huiles ou thermographiques afin d'identifier ou de prévoir l'apparition de problèmes sur les machines surveillées.

Il dispose d'un module d'autodiagnostic basé sur l'élaboration d'alarmes (OK, ALARME, DANGER) suite à l'élaboration de plusieurs paramètres (vitesse efficace, facteur de défaut de roulement, Kurtosis, ...). Chaque paramètre informant sur l'état de santé de l'équipement, un diagnostic global de l'équipement est ainsi obtenu lors de chaque contrôle et assiste l'exploitant lors de son diagnostic final.

Ce logiciel comprend également un outil graphique d'analyse vibratoire « **VIBGRAPH** » dotée de puissants post-traitements et de nombreux modes de représentation, pour élaborer des diagnostics précis et rapides (figure 15).

Nous présentons ci-dessous quelques post-traitements disponibles sur cet outil :

- **Filtrage** (passe haut, passe bas, passe bande, coupe bande...)
- Tracé d'orbites
- **Spectres** obtenus à partir de signaux temporel
- **Spectre d'enveloppe.**
- **Cepstre** obtenus à partir de spectres
- Diagramme de Bode et Bode Ellipse
- Diagramme de Nyquist
- Spectre Ellipse et Spectre cascade Emax
- Tracés de position et Profil de vitesse.
- **Shock Finder** : C'est un outil d'analyse permettons d'appliquer un filtre en post traitement afin de mettre en évidence les chocs anormaux noyés dans le signal temporel de machines de faible à très faible vitesse de rotation.

VIBGRAPH offre également des outils et indicateurs facilitant le travail d'analyse. Parmi ces outils on trouve :

- Curseurs harmoniques
- Curseurs de bandes latérales
- Affichage des fréquences critiques (gabarits vibratoires ou électriques)
- Affichage en **Accélération**, **Vitesse** ou **Déplacement** à partir du même signal
- Tracé de spectres concaténés, permettant d'obtenir un spectre ayant la meilleure résolution possible sur toute la gamme de fréquence mesurée en concaténant différents spectres d'une même date de mesure
 - Superposition de plusieurs tendances, spectres, ou temporels dans la même zone graphique pour faciliter la comparaison.

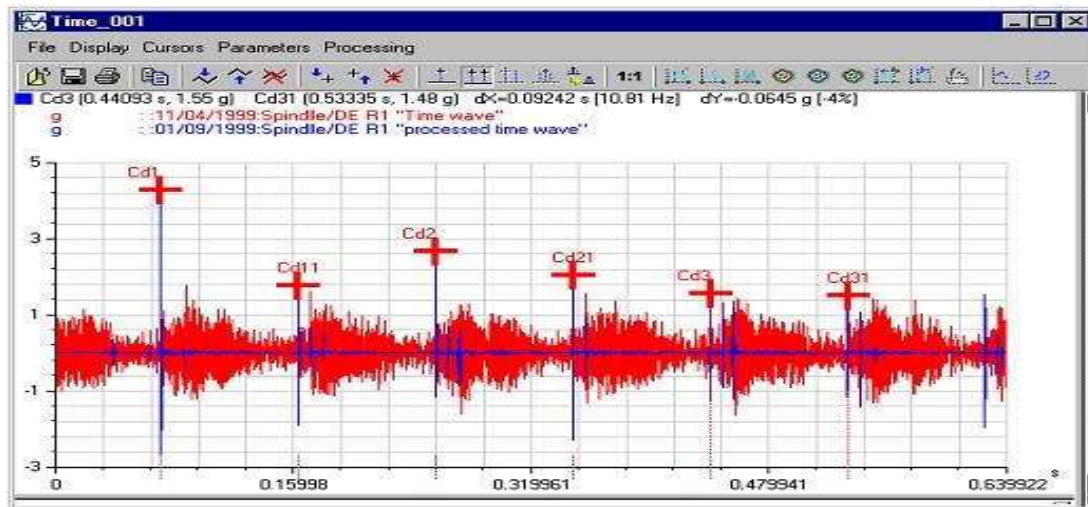


Figure 15 : Analyse du signal temporel sur VibGraph

3. Le collecteur de données FALCON

ONEPROD FALCON est un collecteur de données portable de nouvelle génération dédiée à la maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire et l'équilibrage (Figure 16). Nous citons ci-dessous quelque caractéristique du collecteur :

- **Capteur triaxial** sans fil, sur embase à positionnement automatique.
- Accessoires intégrés (**stroboscope**, **pyromètre**, appareil photo, lecteur QR Code, enregistreur commentaires audio ...).
- Configuration & diagnostic automatiques.
- Mesures synchrones sur 4 voies + top tour.
- Acquisition multivoies signaux temporels jusqu'à 80s à 51.2kHz (4 Méga échantillons).
- Conception robuste, grip en caoutchouc pour une meilleure tenue en main et une résistance antichocs.
- Ecran couleur tactile, utilisable avec des gants.
- Communication USB, Wifi, Ethernet/Internet.



Figure 16 : Photographie du matériel d'analyse vibratoire

II. Initialisation des données sur les logiciels d'analyse vibratoire

1. Création des emplacements du parc machine

La création des emplacements des machines surveillées est réalisée sous le logiciel NEST suivant une structure hiérarchique similaire à l'organisation de ces machines au sein du processus de fabrication de l'usine. (Voir les figures 17,18 et 19)

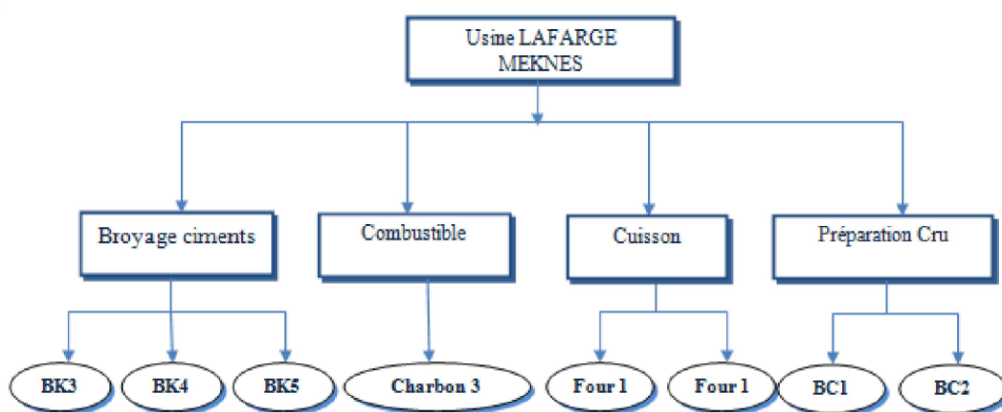


Figure 17 : emplacement des machines stratégiques

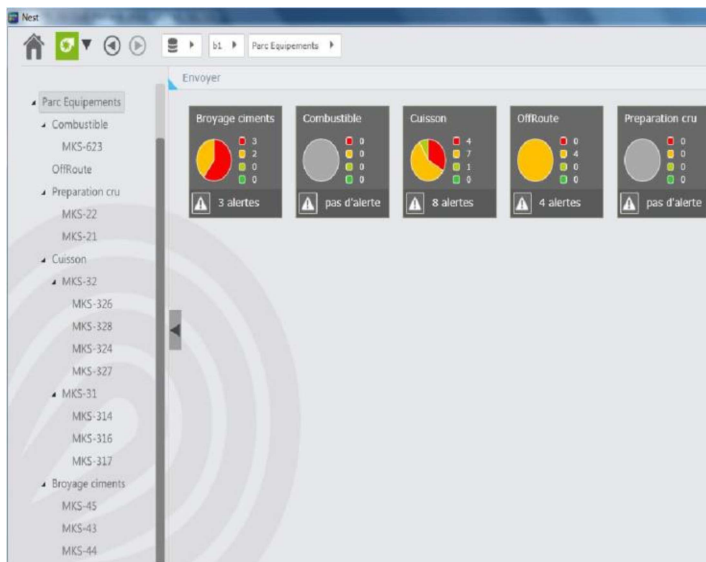


Figure 18 : Organisation du parc machine sur le logiciel NEST

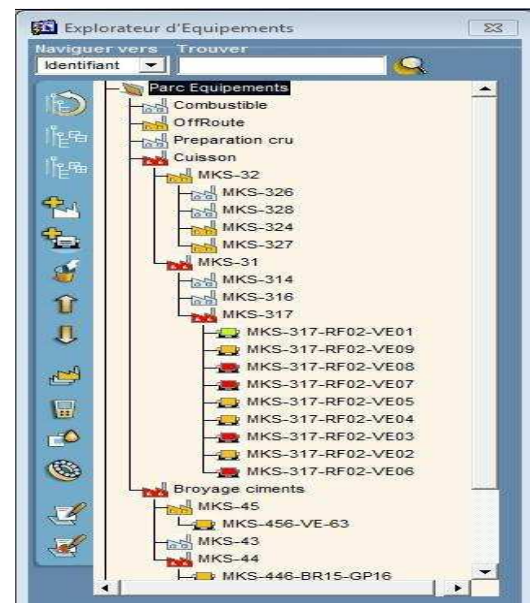


Figure 19: Organisation du parc machine sur le logiciel XPR-300

Remarque :

NEST est entièrement compatible avec le logiciel XPR car ils travaillent avec la même base de données et avec les mêmes données. Par conséquent une création ou une modification faite sur l'un de ces logiciels modifie automatiquement le contenu de l'autre.

2. Création des machines

Cette étape consiste à enregistrer les machines surveillées sur l'ordinateur. Elle est faite suivant deux opérations :

- Création des machines sous le logiciel NEST vue son utilisation simple et rapide (figure 20 à gauche).

- La configuration des indicateurs et signaux de surveillance pour chaque équipement. Cette opération est réalisée sous le logiciel XPR-300 (figure 20 à droite).

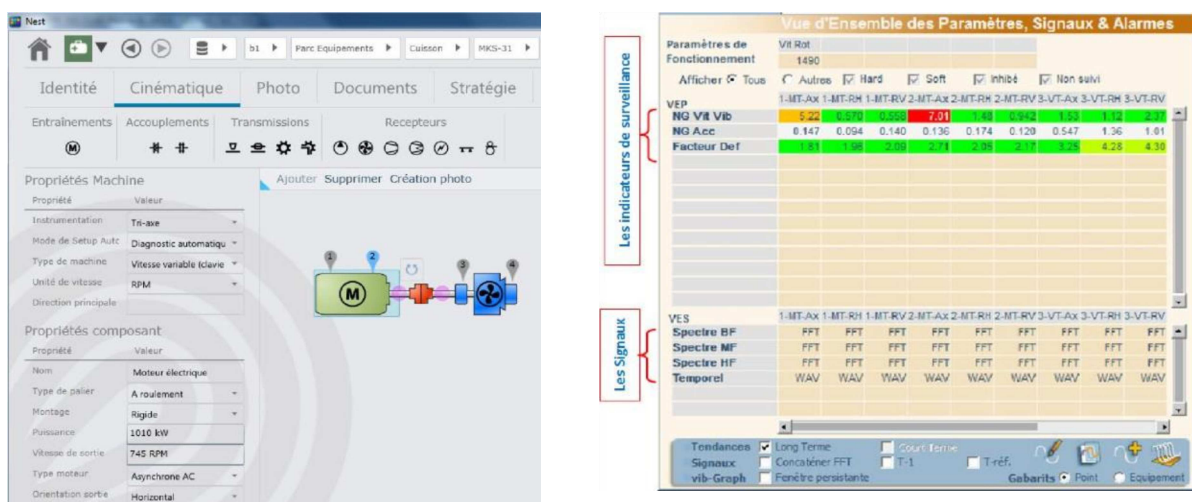


Figure 20 : création d'un ventilateur du refroidisseur four 1 sur le logiciel NEST et Vue d'ensemble des indicateurs, signaux et Alarmes sur le logiciel XPR-300

III. Repérage des points de mesures sur site

La plupart des vibrations de machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance des machines sont les paliers et qu'il serait déraisonnable de prendre des mesures sur des carters non massifs ou posés.

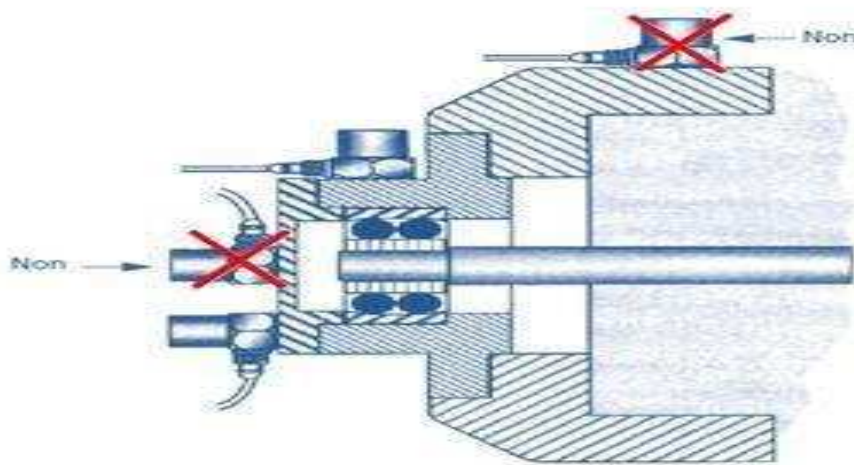


Figure 21: Erreurs de positionnement à éviter

- Pour la prise de la mesure sur des appareils électriques (par exemple, sur des moteurs), le capteur devra être isolé par l'interposition entre sa surface de contact et la machine d'un matériau isolant.

- Ces considérations prises en compte, nous avons, alors, défini des points uniques assurant la reproductibilité. L'emplacement choisi pour effectuer les mesures devra être propre, et les surfaces de contact avec les capteurs lisses.

- Par ailleurs, pour que ces mesures soient assez significatives, les points de relevés doivent être les plus proches possible du composant vibrant (les paliers accessibles pour les roulements)

Il fallait, aussi, identifier les paliers inaccessibles ou difficilement accessibles en fonctionnement et les zones pour lesquels la prise de mesure pose des difficultés sur le plan de *la sécurité*. Le but de cette opération est de trouver des solutions rendant ces paliers accessibles : couvrir certaines parties tournantes, concevoir des passerelles,...

Nous avons repéré par la suite, sur site, d'une manière claire, à l'aide d'un **marqueur industriel**, l'emplacement de chaque point de mesure de chaque machine afin de limiter au maximum les risques d'erreurs de collectes (voir la figure ci-dessous)



Figure 22: Repérage des points de mesure de ventilateur du refroidisseur V6

1. Prise des mesures

Après le repérage des points de mesure sur site, nous avons entamé les campagnes des mesures sur les machines stratégiques. Ces mesures sont effectuées selon la démarche ci-dessous :

- 1.** Rassemblement de l'équipe de surveillance pour le choix des machines à surveiller.
- 2.** Chargement des machines à surveiller sur le collecteur FALCON à partir du logiciel NEST (Figure 23).



Figure 23: Déchargement des machines à surveiller dans le collecteur FALCON

3. Avant de placer notre capteur sur le palier concerné, on sélectionne tout d'abord sur le collecteur FALCON le pictogramme indiquant la position du capteur triaxial sur le palier.

Cette opération n'est requise que lors de la première mesure, car la sélection est enregistrée dans la base de données du PC quand la ronde est déchargée. (Voir figure 24)



Figure 24: les Pictogrammes à sélectionner selon la position du capteur sur le palier pour un arbre horizontal

4. Après positionnement du capteur sur le palier, on lance la mesure et on attend le temps d'acquisition nécessaire du signal vibratoire, puis on répète la même opération pour les autres paliers de la machine.

5. Déchargement des résultats des collectes dans le logiciel NEST.

6. Investigation des valeurs des niveaux globaux et diagnostique des défauts.

Annexe.A3 : Etude AMDE des équipements

I. Introduction

Une AMDE est définie comme "un procédé systématique pour identifier et traiter les défaillances avant qu'elles ne surviennent, avec l'intention de les éliminer ou de minimiser les risques associés. Elle s'applique à un produit pour obtenir la confiance en la qualité du produit. Elle s'applique aussi à un processus pour obtenir la confiance en la qualité de l'entreprise.

Elément		Mode de défaillance		Causes	Effets
Moteur asynchrone		Roue		-Erosion /encrassement d'aube -Usure/rupture d'aube - Défaut d'alignement -Mauvais équilibrage de la roue	- Desserrage des paliers - Perturbation de l'écoulement d'air - Réduction de la durée de vie du ventilateur
		Rotor	Défauts tournants	- Barres rotoriques cassées ou fissurées. - Fissuration d'un anneau de court-circuit	- Fluctuation de la vitesse et du couple - Vibration
				- Excentricité dynamique provoquée par un désalignement, une déformation du rotor ou un jeu de paliers important	- Frottement du rotor sur le stator - Flexion de l'arbre moteur - Destruction de du moteur

	stator	Défauts statoriques	Variation d'entrefer	- Excentricité statique d'entrefer due à une déformation ou ovalisation du corps du stator ou jeu de paliers excessif	- Dégradations par frottement des enroulements statoriques - Fluctuation de la vitesse et du couple - Appel supplémentaire du courant
			Variation de courant	- Déséquilibre de phase - Spire en court-circuit - Défaut d'isolement	
Roulement moteur :	Ecaillage de la bague externe			- Charge excessive - Montage incorrect (mauvais alignement) - Entrée de débris étrangers - Entrée d'eau - Lubrification insuffisante	Vibration excessive. - Bruit excessif - Echauffement des paliers - Baisse de rendement
	Ecaillage de la bague interne			- Jeu de roulement inapproprié - Précision incorrecte de l'arbre ou du logement	
	Ecaillage de l'élément roulant			- Flexion importante de l'arbre - Apparition de rouille - Piqûres de corrosion	

	Déversement d'une bague	- Défaut d'alignement - Mauvais serrage du roulement	- Usure des pistes des roulements - Ecaillage par fatigue des roulements - Réduction de la durée de vie des roulements - Usure des joints et pénétration d'impuretés aux roulements ou fuite de lubrifiant
	Rupture de la cage	Efforts dynamiques axiaux trop importants : -Mauvais serrage du roulement -Mauvais alignement -Vitesse excessive - Usure provoqué par une mauvaise lubrification ou des particules abrasives -Déversement des bagues du roulement	- Regroupement des éléments roulants créant un fléchissement de l'arbre ou blocage du rotor
Arbre	- Desserrage de palier/Fissuration d'ancrage ou de bâti	- Balourd - Désalignement - Choc	Vibration excessive Bruit excessif
	-Défaut d'alignement ou de concentricité des paliers	- Mauvais calage des pattes de fixation du palier - Déformation du châssis du palier sous l'effet d'une contrainte thermique. - Les deux paliers ne sont pas concentriques	- Flexion ou cassure d'arbre - Augmentation de la température des roulements - Bruits inhabituels

		Jeu d'arbre	Jeu dans le roulement Défaut de montage	-Dégradation de la portée de roulement - Echauffement des paliers - Grippage
		Frottement	-Défaut de serrage d'une bague interne de roulement sur l'arbre (jeu d'arbre excessif)	- Dégradation de la portée de roulement - Vibration élevée - Echauffement
		Résonance	Excitation de fréquences propres de la structure avec une fréquence cinématique Amortissement faible	Destruction rapide de l'équipement
Réducteur	Engrenage	Détérioration d'une dent	- Phénomène de fatigue du métal - Laminage du métal - Défaut de traitement thermique (fabrication)	-Choc périodique -Variation du rapport de réduction -Haute vibration
		Ensemble de la denture détériorée	- Rupture du film de lubrifiant - Présence de matières abrasives dans l'huile - Jeu de montage	

	Entraxe insuffisant ou Jeu de fond de denture insuffisant	-défaut d'usinage -défaut de montage (desserrage d'un roulement)	- fluctuation de couple -usure des deux côtés de la denture
Accouplement PV & GV	Défaut d'accouplement	- Choc dus au rattrapage des jeux angulaires.	- Dégradation de l'accouplement Micro-variation de la vitesse
	Défaut d'alignement	- L'arbre moteur et l'arbre motrice du réducteur présentent un désalignement angulaire ou possèdent un défaut de concentricité - Défaut de montage	-Dégradation rapide de l'accouplement -Bruits inhabituels - Température élevée des paliers
Paliers lisses et coussinets	Défauts de lubrification- Instabilité	-mauvais lignage -interruption du graissage 1. -présence de particules dans l'huile	-vibrations élevées -Température élevée des paliers
	Défaut d'instabilité d'arbre (Phénomène de Tourbillonnement d'huile)	-Augmentation de la pression du film - variation de la force de pression du film	-réduction de la vitesse de rotation de l'arbre

Transmission poulies/courroies	Courroies	Détérioration localisée d'une courroie (partie arrachée, défaut de jointure...)	-Frottement contre le carter -Patinage -Désalignement des poulies -Usure des poulies -Objets étranges dans les poulies -Contact avec de l'huile ou de produits abrasifs -Courroies mal appariées ou de marques différentes	- Bruit (Crissement ou sifflement)
		Courroies détendues	-Tension insuffisante -Désalignement - Variation de l'entraxe -Ovalisation des poulies	Battement des courroies - Patinage -Brise prématuré des courroies
		Mauvais alignement des poulies	- Installation incorrecte des poulies	-Endommagement des flancs de la courroie - Usure accélérée des courroies
	Poulies	Poulie excentrée	- Axe non ajustable - Surtension de la courroie	- Diminution de la durée de vie des poulies - Vibrations excessives - Oscillation, cintrage ou le bris des arbres des poulies -Surchauffe des paliers - Variation de la tension des courroies. - Fissure au moyeu de la poulie

Annexe A.4 : fiche de défauts

Date de prise de mesure :

Atelier :

Nom du visiteur :

Code de l'équipement :

Nom de l'équipement :

Nom de l'appareil de mesure :

• Type de défauts

Défauts de Balourd	☐	Défauts d'origine électrique	☐
Défauts d'arbre	☐	Défauts de résonance	☐
Défauts de roulement	☐	Défauts d'engrènement	☐
--Cage	☐	Accouplement	☐
--Bague externe	☐	Poulies /courroies	☐
--Bague interne	☐	Jeu et défauts de serrage	☐
-- Elément roulant	☐	autres:	

• Description du défaut

.....
.....
.....

• Fréquence d'apparition du défaut

.....

• Descripteur

- Niveau de surveillance /grandeur de référence.....

.....

- Points de mesures.....

.....

• Conditions favorisant l'apparition du défaut

- Durée de fonctionnement.....

.....

- Maintenance ou intervention avant l'apparition du défaut:.....

.....
- Condition de fonctionnement

.....
- Autres causes :.....
.....

• **Le phénomène est-il :**

Stable ☐ réversible ☐ hystérésis ☐

Comment ?.....

• **Défauts liés : causes ou conséquences de ce défaut**

.....
.....

• **Action programmée**

.....
.....

Remarque :

.....

• **Les points ou les défauts ont été détectés**

Les points de mesure		Les valeurs mesurées
Repère 1	A	
	H	
	V	
Repère 2	A	
	H	
	V	
Repère 3	A	
	H	
	V	
Repère 4	A	
	H	
	V	

Annexe A.5 : fiches et guides techniques des défauts de composants

Annexe A.6 : fiches machines

Annexe A.7 : Calcul des fréquences

Les tableaux ci-dessous représente la méthode suivie pour calculer les fréquences de rotation et d'engrènement pour les commandes des broyeur clinker BK5 et BK4

Arbre	Vitesse		Fréquence de rotation	Fréquence d'engrènement
	Entrée N ₁ en mm/s	Sortie N ₂ en mm/s		
Arbre GV	1000		$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{1000}{60}$ $F_r = 16.66\text{Hz}$	$F_e = F_r * Z_{16}$ $F_e = 21 * 16.66$ $F_e = 350\text{Hz}$
Arbre MV₁	1000	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_{16}}{Z_{14}}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_{16}}{Z_{14}}$ $N_2 = 538,46$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{538.46}{60}$ $F_r = 8,97 \text{ Hz}$	$F_{e1} = F_r * Z_{14}$ $F_{e1} = 39 * 8,97$ $F_{e1} = 347,49\text{Hz}$
Arbre MV₂	538,46	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_{14}}{Z_{11}}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_{14}}{Z_{11}}$ $N_2 = 538,46$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{538.46}{60}$ $F_r = 8,97 \text{ Hz}$	$F_{e2} = F_r * Z_{11}$ $F_{e2} = 39 * 8,97$ $F_{e2} = 347,49\text{Hz}$
Arbre MV₃	538,46	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_{14}}{Z_{11}}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_{14}}{Z_{11}}$ $N_2 = 538,46$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{538.46}{60}$ $F_r = 8,97 \text{ Hz}$	$F_{e3} = F_r * Z_{10}$ $F_{e3} = 39 * 8,97$ $F_{e3} = 347,49\text{Hz}$ $F_{e3} = F_r * Z_8$ $F_{e3} = 17 * 8,97$ $F_{e3} = 152,49\text{Hz}$
Arbre PV	538,46	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_8}{Z_7}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_8}{Z_7}$ $N_2 = 134,61$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{134.61}{60}$ $F_r = 2,24\text{Hz}$	$F_e = F_r * Z_7$ $F_e = 68 * 8,97$ $F_e = 152,56\text{Hz}$

Tableau 8: Calcul des fréquences du BK4

Arbre	Vitesse		Fréquence de rotation	Fréquence d'engrènement
	Entrée N ₁ en mm/s	Sortie N ₂ en mm/s		
Arbre GV	994		$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{994}{60}$ $F_r = 16,56\text{Hz}$	$F_e = F_r * Z_1$ $F_e = 28 * 16,56$ $F_e = 463,68\text{Hz}$
Arbre MV ₁	994	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_1}{Z_2}$ $N_2 = 456,26$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{456,26}{60}$ $F_r = 7,60\text{ Hz}$	$F_{e1} = F_r * Z_2$ $F_{e1} = 19 * 7,60$ $F_{e1} = 144,42\text{Hz}$
Arbre PV	456,26	$\frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$ $N_2 = N_1 * \frac{Z_1}{Z_2}$ $N_2 = 123,84$	$F_r = \frac{N_2}{60} = \frac{123,84}{60}$ $F_r = 2,06\text{Hz}$	$F_e = F_r * Z_4$ $F_e = 31 * 2,06$ $F_e = 63,36\text{Hz}$

Tableau 9: Calcul fréquences BK5

Fiche technique des défauts d'arbres détectés par analyse vibratoire

Causes de vibration	Fréquence de manifestation	Direction de la force causante	Domaine d'observation	Action préventive
Balourd d'un rotor	Présence d'une composante d'amplitude prépondérante à la fréquence de rotation (F_{rot})	Radiale	Observation en basses fréquences	- Suivre l'évolution du défaut de balourd ou d'alignement. - En cas du dépassement du seuil d'alarme effectuer un diagnostic précis et programmer une opération d'équilibrage ou de lignage avant d'atteindre la date présumée à laquelle le seuil de danger risque d'être atteint - Recourir à des méthodes de lignage plus sophistiquées (contrôle d'alignement au laser)
Désalignement et torsion des axes	apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à $2*F_{rot}$	Radiale et axiale	Observation en basses fréquences	- Recourir à des méthodes de lignage plus sophistiquées (contrôle d'alignement au laser...). - Mise en œuvre d'un programme d'alignement bien étudié.
Desserrage de palier	Plusieurs harmoniques de la fréquence de rotation et parfois des sous-harmonique ($1.5 \times Fr$, $1.3 \times Fr$, ...)	radiale	Observation en basses Fréquences	- Améliorer la méthode de montage des roulements. - Envisager l'utilisation des roulements à alignement automatique. - Vérifier régulièrement le bon serrage des boulons de fixation
Frottement	$2* F_{rot}$ d'amplitude élevée accompagnée de composantes inter-harmonique ($0.5x$, $1.5x$).	Surtout radiale	Observation en basses fréquences	-Programmer une action de lubrification
Jeux mécaniques	- Apparition d'une série d'harmoniques de la fréquence de rotation, d'inter-harmoniques ($1.5 \times Fr$, $2.5 \times Fr$,...) - et de sous harmoniques ($1/2 \times Fr$, $1/3 \times Fr$, ...)	Radial	Observation en basses fréquences	-Réglage de jeux.

Fiche technique de défauts de roulements détectés par analyse vibratoire

Causes de vibration	Fréquence de manifestation	Direction de la force causante	Domaine d'observation	Action préventive
Ecaillage de la bague externe	L'image vibratoire est un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de la bague externe (F_{bext}) . En présence d'un déséquilibre, à chaque composante de ce peigne peut être associée une paire de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation de l'arbre (F_{rot}) .	Radiale et axiale	Observation en moyenne fréquences	- Suivre l'état du roulement en traçant la courbe de tendance du facteur défaut roulement (FD) - Recourir aux techniques de démodulation de l'amplitude du signal (Détection d'enveloppe) pour identifier les défauts de roulements à un stage beaucoup plus précoce. - Améliorer la méthode de montage
Ecaillage de la bague interne	Peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de la bague externe (F_{bext}). A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de rotation de l'arbre F_{rot} .	Radiale et axiale	Observation en moyenne fréquences	- Vérifier la précision de l'arbre et du logement - Vérifier le jeu interne du roulement à chaque arrêt programmé - Améliorer la méthode de montage
Ecaillage de l'élément roulant	-Peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de la bague externe (F_{bext}). -A chaque composante de ce peigne, sont associées plusieurs paires de bandes latérales espacées de la fréquence de la cage (F_{cage}).	radiale et axiale	Observation en moyennes Fréquences	- Améliorer le dispositif d'étanchéité, - Utiliser un lubrifiant de viscosité appropriée
Déversement d'une bague	Une composante fondamentale d'amplitude élevée dont la fréquence correspond à la fréquence du défaut de la bague déversée (F_{bext} ou F_{bint}), et par des composantes d'ordre supérieur d'amplitude faible ($2F_{bext}/int$, $3F_{bext}/int, \dots$)	radiale et axiale	Observation en basses fréquences	- Recourir à des méthodes de lignage plus sophistiquées (contrôle d'alignement au laser...). -Contrôler le serrage des roulements -Améliorer le montage des roulements
Rupture de la cage	- Peigne de raies de pas égal à $\frac{1}{2} F_{cage}$	Radiale et axiale	Observation en basses fréquences	- Mise en œuvre d'un programme d'alignement bien étudié.



Fiche technique des défauts d'engrènement détectés par analyse vibratoire

Causes de vibration	Fréquence de manifestation	Direction de la force causante	Domaine d'observation	Action préventive
Détérioration d'une dent	Le spectre correspondant est constitué d'un peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de rotation (F_{rot}) de l'élément altéré.	Radiale et axiale	Observation en moyenne fréquences	Suivre l'état d'engrenage par un indicateur de surveillance spécifique (Kurtosis K, Facteur de crête FC) Mettre en œuvre des techniques particulières de diagnostic : • l'analyse temporelle synchrone • l'analyse spectrale • Cepstre • Démodulation d'amplitude Et de fréquence des composantes d'engrènement • Analyse spectrale HFRT (filtrage autour de la résonance) • Faire un suivi pondéral des particules métalliques contenues dans le lubrifiant
Ensemble de denture détériorées	Le spectre est constitué d'un peigne de raies de faible étendue dont le pas correspond à la fréquence d'engrènement avec une amplitude beaucoup plus élevée..	Radiale et axiale	Observation en moyenne fréquences	
Entraxe insuffisant ou jeu de fond de denture insuffisant	L'analyse spectrale se traduit par l'apparition d'une raie d'amplitude prépondérante à deux fois la fréquence d'engrènement ($2*F_e$) .	Axiale et radiale	Observation en moyenne Fréquences	

Fiche technique des défauts poulie courroie détectés par analyse vibratoire

Causes de vibration	Fréquence de manifestation	Direction de la force causante	Domaine d'observation	Action préventive
Détérioration localisée d'une courroie	Peigne de raies dont le pas correspond à la fréquence de passage de courroies F_c avec prépondérance de la composante d'ordre 2 ($2 \times F_c$)	Radiale	Observation en moyenne fréquences	- Suivre la procédure de montage - Suivre les consignes du fabricant lors du montage - Eviter la chaleur ou les rayons solaires - Eliminer les fuites de lubrifiant
Courroie détendue	Des raies d'amplitude élevée à la fréquence égale à la somme et à la différence des fréquences de passage des différentes courroies, modulée par des raies espacées de leurs différences.	Radiale	Observation en moyenne fréquences	- Vérifier si l'entraxe change pendant le fonctionnement - Vérifier et rectifier l'alignement - Utiliser un tensiomètre pour régler les courroies à la bonne tension
Mauvais alignement des poulies	Composante d'amplitude prépondérante en direction axiale à la fréquence de rotation des arbres menant ou mené	Axiale	Observation en moyenne Fréquences	- Contrôler l'alignement des poulies - Vérifier et rectifier l'alignement - Suivre la procédure de montage - Nettoyer les poulies
Poulie excentrée	- Composante d'amplitude élevée à la fois sur les paliers des poulies menant et menée en direction radiale, dont la fréquence correspond à Frot de la poulie excentrée Mesure effectuée en direction définie par la droite joignant les centres des poulies	Surtout radiale	Observation en moyenne fréquences	- Vérifier si l'entraxe change pendant le fonctionnement - Utiliser un tensiomètre pour régler les courroies à la bonne tension.

Fiche machine du broyeur clinker BK4

Atelier :	Broyage Clincker BK4	Dates	
Equipement :	Commande Principale	Création	
Emplacement MAXIMO :	MKS-446-BR15-GP1	Mise à jour	

Références des équipements

Moteur	Marque	Type	N°de série	Puissance kw	N tr/min	Ø arbre	Poids kg	Nb d'aubes du ventilateur
	Jeumont Schneider	TNB 800 MC		1400	1000		7470	

Réducteur	Marque	Type	N°de série	Date fabrication	Rapport (i)	Puissance kw	N tr/min	Ø arbre	Lubrifiant	Poids kg
	CMD	H2 H245	7924981		7,36			G.V P.V 140	Quantité l 500	Qualité 14500

Transmission	Accouplement				Poulies et courroies					
	Repère	Marque	Type	Nb de dents/doigts	Courroie		Poulie motrice		Poulie réceptrice	
					Nb	Longueur	Désignation	Ø	Désignation	Ø
	C.C	CMD	FLEXACIER 28 T		*	*	*	*	*	*
	C.O.C	CMD	POSIFLEX ND 65 SP		*	*	*	*	*	*

Eléments cinématiques

Equipement	Paliers (Roulements/coussinets)			Engrenages				
	Repère	Désignation		Repère	Désignation	Nb de dents Z	Type de denture	Module m
Moteur				*	*	*	*	*
				*	*	*	*	*
Réducteur	19	23056CC/W33		16	Pignon GV	21		12
	17	23960CC/W33		14	Roue MV1	39		12
	18	23148CC/W33		11	Roue MV2	39		12
	9	22244CC/W33		10	Roue MV3	39		12
	3	22234CC/W33 C3		8	Pignon PV	17	*	13
	2	*		7	Roue PV	68	*	13
	*	*		*	*	*	*	*
	*	*		*	*	*	*	*
Harnais	*	*		Pignon		23		30
	*	*		couronne		172		30

Fréquences caractéristiques Hz

Réducteur		Moteur		16.66
GV	16.66	Transmission	Accouplement GV	16.66
MV1	8.97		Accouplement PV	
MV2	8.97		Poulie motrice	*
MV3	8.97		Poulie réceptrice	*
PV	2.24	Harnais	Pignon	2.24
			Couronne	0.297

Fréquence d'engrènement GV/MV1	350
Fréquence d'engrènement MV1/MV2	347.49
Fréquence d'engrènement MV2/MV3	347.49
Fréquence d'engrènement MV3/PV	347.49
Fréquence d'engrènement PV/Couronne	152.56

Fréquences des défauts

Références	Défauts	Fréquences
------------	---------	------------

Fiche machine du broyeur clinker BK4

<i>P.V</i>	<i>Roulement 3</i>	La cage	<i>1.0</i>
		La bague externe	<i>36.1</i>
		La bague interne	<i>30.5</i>
		Les éléments roulants	<i>25.9</i>
	<i>Roulement 4</i>	La cage	<i>1.0</i>
		La bague externe	<i>32.9</i>
		La bague interne	<i>27.1</i>
		Les éléments roulants	<i>22.4</i>
<i>G.V</i>	<i>Roulement 18</i>	La cage	<i>6.93</i>
		La bague externe	<i>151.3</i>
		La bague interne	<i>112.5</i>
		Les éléments roulants	<i>95.2</i>
<i>M.VI</i>	<i>Roulement 12</i>	La cage	<i>3.6</i>
		La bague externe	<i>78.5</i>
		La bague interne	<i>55</i>
		Les éléments roulants	<i>47.7</i>
	<i>Roulement 13</i>	La cage	<i>1.96</i>
		La bague externe	<i>37.3</i>
		La bague interne	<i>50.65</i>
		Les éléments roulants	<i>29.42</i>
<i>Moteur C.A</i>	<i>Roulement C.A1</i>	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
	<i>Roulement C.A2</i>	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
<i>Moteur C.O.A</i>	<i>Roulement C.O.A</i>	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	

NB : voir le plan de la chaîne cinématique pour les repères.

Fiche de maintenance prévisionnelle par analyse vibratoire

Atelier :	Broyage clincker BK 4	Dates	
Equipement :	Ventilateur de tirage séparateur	Création	30/04/06
Emplacement MAXIMO :	MKS-446-VE56	Mise à jour	

Références des équipements

Moteur	Marque	Type	N°de série	Puissance kw	N tr/min	Ø arbre	Poids kg	Nb aubes turbine ref.
				132	1500	80		

Ventilateur	Marque	Type	N°de série	Type d'Assise	Puissance kw	N tr/min	Débit aspiré	Pression aspiration	Ø Roue	Ø arbre	Nb aubes	Poids kg
					110	1525	12.5					

Transmission	Accouplement				Poulies et courroies				
	Repère	Marque	Type	Nb de dents/doigts	Section	Courroie		Ø Poulie motrice	Ø Poulie réceptrice
						Nb	Longueur		
						6	4500	315	300

Eléments cinématiques

Equipement	Paliers (Roulements/coussinets)	
	Repère	Désignation
Moteur	C.A	
	C.O.A	
Ventilateur	P.F	22213CCK
	P.L	22313CCK

Fréquences caractéristiques Hz

Moteur			Transmission		
Ventilateur	Arbre		Prise directe	Poulie/courroie	
	Aube			P. motrice	P. réceptrice
			*	*	*

Fréquences des défauts

Références		Défauts	Fréquences
Roulement C.C et Roulement C.O.C		La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
Moteur C.A	Roulement C.A1	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
	Roulement C.A2	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	

Fiche de maintenance prévisionnelle
par analyse vibratoire

<i>Moteur C.O.A</i>	<i>Roulement C.O.A</i>	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	

NB : voir le plan de la chaîne cinématique pour les repères.

Fiche machine Broyeur clinker BK5

Atelier :	Broyage clinker BK5	Dates	
Equipement :	Commande principale BK5	Création	
Emplacement MAXIMO :	MKS-456-BR20-GP2	Mise à jour	

Références des équipements

Moteur	Marque	Type	N°de série	Puissance kw	N tr/min	Ø arbre	Poids kg	Nb d'aubes du ventilateur
	ABB	TBNC 710 LD 6 B3	354131/2000	2700	994		16200	

Réducteur	Marque	Type	N°de série	Date fabrication	Rapport (i)	Puissance kw	N tr/min	Ø arbre	Lubrifiant	Poids kg
	FLENDER	COMBIFLEX			8,07					

Transmission	Accouplement				Poulies et courroies					
	Repère	Marque	Type	Nb de dents/doigts	Courroie		Poulie motrice		Poulie réceptrice	
					Nb	Longueur	Désignation	Ø	Désignation	Ø
					*	*	*	*	*	*

Eléments cinématiques

Equipement	Paliers (Roulements/coussinets)			Engrenages				
	Repère	Désignation		Repère	Désignation	Nb de dents Z	Type de denture	Module m
Moteur	C.A	6238 MC3+NU238 ECMA		*	*	*	*	*
	C.O.A	NU238 ECMA		*	*	*	*	*
Réducteur	151	236 QJ N2 MA/C3		1	Pignon GV	28		11
	152	22240CC/N1 W33 C3		2	Roue MV1	61		11
	250	23248 CC/W33		3	Pignon MV1	19		16
	350	2348 NU EC MA C3		5	Roue PV	70		16
	*	*		*	*	*	*	*
	*	*		*	*	*	*	*
	*	*		*	*	*	*	*
	*	*		*	*	*	*	*
Harnais	*	*		Pignon 4		31		22
	*	*		Couronne		236		22

Fréquences caractéristiques Hz

Réducteur		Moteur		16.56
GV	16.56	Transmission	Accouplement GV	16.56
MV1	7.60		Accouplement PV	2.06
MV2	*		Poulie motrice	*
MV3	*		Poulie réceptrice	*
PV	2.06	Harnais	Pignon	2.06
			Couronne	0.27

Fréquence d'engrènement GV/MV1	463.68
Fréquence d'engrènement MV1/MV2	*
Fréquence d'engrènement MV2/MV3	*
Fréquence d'engrènement MV3/PV	144.42
Fréquence d'engrènement PV/Couronne	63.95

Fiche machine Broyeur clinker BK5

Fréquences des défauts

Références		Défauts	Fréquences
G.V	Roulement 151	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
	Roulement 152	La cage	6.95
		La bague externe	125.37
		La bague interne	172.8
		Les éléments roulants	100.14
P.V	Roulement 250	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
M.VI	Roulement 350	La cage	
		La bague externe	
		La bague interne	
		Les éléments roulants	
Moteur C.A	Roulement C.A1	La cage	6.99
		La bague externe	76.92
		La bague interne	105.29
		Les éléments roulants	103.77
	Roulement C.A2	La cage	6.97
		La bague externe	132.76
		La bague interne	181.98
		Les éléments roulants	103.34
Moteur C.O.A	Roulement C.O.A	La cage	6.97
		La bague externe	132.76
		La bague interne	181.98
		Les éléments roulants	103.34

NB : voir le plan de la chaîne cinématique pour les repères.