



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE - ANNABA

Département Génie Industriel

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER
Domaine : Science et Technologie
Filière : Génie Industriel
Spécialité : Management Industriel

Présenté par

CHAIMA TOUMI
CHAIMA BOUFRIDI

ÉTUDE DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE D'UNE MACHINE TOURNANTE A P.F.D.

Encadré par

Dr. Tarek KEBABSA
ENSTI Annaba

Membres du jury :

Pr. Messaoud DJEGHABA	Président	ENSTI-ANNABA
Dr. Amar AYAD	Examineur	ENSTI-ANNABA
Dr. Nouredine KHELIFA	Examineur	ENSTI-ANNABA

Année 2024

Remerciements

Nous remercions chaleureusement le **Dr. KEBABSA Tarek** pour son accompagnement précieux tout au long de la rédaction de notre mémoire de Master. Leurs compétences et leur disponibilité ont été d'une grande valeur, nous permettant de faire des progrès dans nos recherches et d'approfondir notre compréhension des sujets traités. Leur dévouement envers notre progression scolaire a été une source d'inspiration inépuisable pour nous.

Nous exprimons également notre gratitude sincère envers les membres du jury pour leur temps consacré à évaluer notre travail et pour leurs critiques constructives. Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers les enseignants de l'école **ENSTI Annaba** pour leur engagement envers l'excellence académique, leur approche pédagogique novatrice et leur soutien constant qui ont joué un rôle crucial dans notre formation. Les employés des entreprises **ECDE EL Chlef, SONATRACH, FERTIAL** sont également reconnaissants, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont offert la possibilité de réaliser un stage au sein de ces organisations. Grâce à leur hospitalité, leurs précieux conseils et leur collaboration, nous avons pu bénéficier d'une expérience pratique enrichissante dans le domaine du génie industriel. Leur expertise, leur professionnalisme et leur patience ont joué un rôle essentiel dans notre apprentissage et notre progression au sein de ces entreprises. Nous exprimons notre gratitude envers tous les membres de ces équipes pour leur confiance et pour l'occasion qu'ils nous ont données de nous épanouir sur le plan professionnel. Nous avons conscience de la chance exceptionnelle que nous avons eue de profiter d'un environnement de travail aussi stimulant et d'acquérir des connaissances auprès de professionnels chevronnés. Notre objectif est de tirer parti de ces apprentissages pour notre future carrière en tant qu'ingénieurs en génie industriel.

Finalement, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers nos parents, nos frères, nos sœurs et nos proches pour leur amour, leur soutien inébranlable et leur confiance en nous. Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers tous ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur contribution à notre cheminement académique et personnel. Leur précieux soutien a joué un rôle essentiel dans notre réussite scolaire et notre développement professionnel.

Dédicace

Je dédie ces mot à :

À mes parents, ma chère mère Mme. Zehaira Achouri pour son amour infini, son soutien indéfectible et ses sacrifices incommensurables et prière tout au long de mon parcours académique, merci mon dieu de me donner la meilleure maman du monde.

À ma seule sœur Nour, pour leur soutien constant et leurs encouragements qui ont illuminé chaque étape de ce chemin Merci nour tu mérites le meilleur dans ta vie.

A mes proches, ma binome chaima et les autres copines oumaïma, yousra, Douaa, Malek...

À ma famille fidèle, mes tante surtout Hayet, djemaa, Farida, mes oncle Mohammed, Chafik, pour leur présence, mon frère paternelle Achouri abd Elmalek et sa femme, le mari de ma sœur Aymen et sa famille, mes cousins oussama, louai leur compréhension et leurs moments de détente précieux qui ont équilibré mes efforts d'étude.

À mes professeurs, pour leur expertise, leurs conseils éclairés et leur patience qui m'ont permis de croître académiquement et professionnellement.

À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur aide, de près ou de loin, merci pour votre précieuse contribution à la réussite de ce mémoire.

Enfin, à moi-même, pour ma persévérance, ma détermination, persévérance, répétition et ma volonté de toujours viser l'excellence.

Chaima. T

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

Au meilleur des pères et à ma très chère maman qu'ils ont toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études ils trouvant en moi la sources de leur fierté qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que le dieu les protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

A mes sœurs imane, aya, iness, ritaje et mes frères, mouhammed et seif eddine

A toutes la famille Boufridi et Babou et a toutes mes amies, et surtout hafssa et chaima.

A tous les gens qui me connaissent et que je connais particulier, nourdine, ancle brahim habar, soudani bardadi, sadam aissa ben ameur et tata leiyla et ses enfants.

A tous ceux qui sont chers, ma grand-mère Oum khayer, ma grand père zohra,

Et à tous ceux qui aiment le bon travail et ne reculent pas devant les obstacles de la vie.

Chaima. B,

ملخص

يندرج هذا التقرير في إطار عملية وقائية تهدف إلى ضمان موثوقية السلسلة الحركية، فيما يتعلق بالكشف عن العيوب خاصة تلك التي تؤثر على التروس. ولهذا نستخدم تحليل الاهتزازات بالإضافة إلى أدوات معالجة الإشارات المختلفة مثل تحليل التردد المعتمد على الطيف، وكلاهما يقاس بواسطة "الطيف الذاتي" ويحسب بواسطة تحويل فورييه للإشارة المقاسة. تركز دراسة الماستر هذه على تطبيق التحليلات لاكتشاف وتحليل العيوب الموجودة في سلسلة طاحونة ب ك أربعة التابعة لشركة مصنع الاسمنت جيغا. تعتبر هذه الوحدة ضرورية في منطقة الطحن في مصنع الأسمنت، مما يضمن إنتاج المساحيق الدقيقة والدقيقة جدًا. سيكون للنتائج التي تم الحصول عليها تأثير كبير على الصيانة وخط الإنتاج بالإضافة إلى الأداء التشغيلي للتركيب، مما يساعد على ضمان الإنتاج المستمر والجودة الثابتة والفعالة للمنتجات النهائية.

الكلمات الرئيسية: اكتشاف العيوب، الصيانة على أساس الحالة، أخطاء التروس، التلوث بالزيت، التحليل الطيفي، تحليل الغلاف الشبكي، الآلات الدوارة.

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'amélioration de la fiabilité d'une chaîne cinématique, en mettant l'accent sur la détection des défauts, notamment ceux affectant les engrenages. L'étude utilise des techniques d'analyse vibratoire et de traitement du signal, telles que l'analyse fréquentielle et l'analyse d'enveloppe. L'objectif est d'appliquer ces analyses pour détecter et analyser les défauts dans la chaîne du Broyeur BK4 de l'entreprise Cimenterie GICA. Les résultats auront un impact important sur la maintenance, la production et les performances opérationnelles de l'installation, contribuant ainsi à assurer une production continue et une qualité constante des produits finis.

Mots-clés : Détection des défauts, Maintenance conditionnelle, Défauts d'engrenage, contamination d'huile, Analyse spectrale, Analyse cepstrale d'enveloppe, Machines tournantes.

Abstract

This thesis focuses on improving the reliability of a powertrain, with a specific focus on defect detection, particularly those affecting gears. Vibrational analysis and signal processing tools such as frequency analysis based on spectrum, both measured by "Autospectrum" and calculated by Fourier transform of the measured signal, as well as the measured average cepstrum and envelope analysis based on Hilbert transform are used. This master's study concentrates on applying these analyses to detect and analyze defects in the BK4 Grinder chain of the Cimenterie GICA company. This unit is essential in the grinding area of the cement plant, ensuring the production of fine and very fine powders. The obtained results will significantly impact maintenance, production chain, and operational performance of the facility, thereby contributing to ensuring continuous production and consistent quality of finished products.

Keywords : Defect detection, Condition-based maintenance, Gear faults, oil contamination, Spectral analysis, Cepstral envelope analysis, Rotating machines

Liste des abréviations

ECDE : Entreprise Cimenterie D'El Chlef

CPJ : Ciment Portland Composé

CRS : Ciment résistant aux sulfates

BK : Broyeur de ciment

EP : ventilateur de tirage filtre à manche

RMS : Root Mean Square – valeur efficace ou valeur moyenne quadratique

RPM : Révolutions Per Minute

HFRT : High Frequency Resonance technique

Fr : Fréquence de rotation

Fp : Fréquence de pignon

N*Fr : Fréquence harmonique

Fp : Fréquence de passage

Zr₁ : nombre de dents dans la roue

Zr₂ : nombre de dents d'un pignon

DIN : Institut Allemands de normalisation

ISO : Organisation Internationale de normalisation

STFT : Transformé de fourrier à court terme

HV, MV, GV : Haute, Moyenne, Grande vitesse

H, A, V, PS : Horizontal, Axial, Verticale, Palier successivement

N₁, N₂ : Vitesse d'entrée et de sortie

I, P : Courant, Puissance

Liste des tableaux

TABLEAU 1. LES ZONES DE FABRICATION D'UN CIMENT.	5
TABLEAU 2. LES TYPES D'ENGRENAGES.	15
TABLEAU 3. LES SYMBOLES DE DETECTION.....	18
TABLEAU 4. UNE FICHE D'ANALYSE DE LA CHAÎNE CINÉMATIQUE D'UN BROYEUR.	19
TABLEAU 5. FREQUENCE CINÉMATIQUE D'ENGRENAGE D'UNE VITESSE DE [995TR/MIN].	24
TABLEAU 6. FREQUENCE CINÉMATIQUE DE ROULEMENTS D'UNE VITESSE DE [995 TR/MIN].	24
TABLEAU 7. TEMPERATURES ET VALEURS GLOBALES EN VITESSES DU DMG222.	26

Liste des figures

Fig 1. Carte géographique de l'usine.....	4
Fig 2. Le ciment.	4
Fig 3. Schema representatif des activites de l'analyse vibratoire.	13
Fig 4. Les outils de diagnostic par l'analyse vibratoire.....	14
Fig 5. Usure des dents.	15
Fig 6. Dommages des dents par piqures.	16
Fig 7. Defaillance de surface par ecaillage.	16
Fig 8. Frottement de dents par grippage.	16
Fig 9. Cassures et fissures.....	17
Fig 10. Le broyeur bk4.....	19
Fig 11. Schema cinématique du broyeur bk4 et points des mesures d'équipement.....	20
Fig 1. Les étapes principales de procédure de Schenck.....	20
Fig 13. Une abrasion importante au pied dent.	24
Fig 14. Formation de rouille sur pignon.	25
Fig 15. Huile contamaine et ciment accumule et solidifie au fond du bac du reducteur.	25
Fig 16. Emplacement typique des points de mesure sur un reducteur flender dmg222.....	25
Fig 17. Spectre en vitesse, arbre gv.....	27
Fig 18. Spectres en vitesse, arbre mv.	28
Fig 19. Spectres en vitesse, arbre pv.	28
Fig 20. Spectres en enveloppe, arbre gv.....	28
Fig 21. Spectres en enveloppe, arbre mv.....	29
Fig 22. Spectres en enveloppe, arbre pv.....	29
Fig 23. Spectres en acceleration, arbre gv.	30
Fig 24. Spectres en acceleration, arbre mv.	30
Fig 25. Spectres en acceleration, arbre pv.	31
Fig 26. Déplacement axial de l'arbre flottant (arbre mv).	31
Fig 27. FFT of intermediate shaft axial déplacement.....	32

Table des matières

ملخص

Abstract

Résumé	i
Liste des abréviations	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des figures	iv
Introduction générale	1
Chapitre I. Présentation de la cimenterie de Chlef ECDE (GROUP GICA)	3
I.1. Introduction	4
I.2. Situation géographique de la cimenterie	4
I.3. Les activités de L'E.C.D.E	4
I.4. Procédé générale de fabrication	4
I.4.1. Qu'est-ce que le ciment tout d'abord ?	4
I.4.2. Les étapes principales de fabrication.....	5
I.4.3. Zone ciment (broyage)	5
I.5. Problématique	6
I.6. Conclusion	6
Chapitre II. Etat de l'art et recherche bibliographique	7
II.1. Introduction	8
II.2. Synthèse bibliographique	8
II.3. Conclusion	10
Chapitre III. Diagnostic vibratoire d'un broyeur à ciment BK4	12
III.1. Introduction.....	13
III.2. L'Analyse vibratoire	13

III.2.1. Les activités de l'analyse vibratoire.....	13
III.2.2. Les outils de diagnostic par l'analyse vibratoire	13
III.3. Les Engrenages	14
III.3.1. Types d'engrenages	15
III.3.2.Types de défauts d'engrenages	15
III.3.2.1. Défauts répartis	15
III.3.2.2. Défauts localisés.....	16
III.4. Fréquences caractéristiques des défauts d'engrenage	17
III.5. Les étapes de contrôle vibratoire prévisionnel d'un Broyeur BK4	17
III.5.1.Principe des contrôles vibratoires et analyse des données.....	17
III.5.2.Objet de l'étude	18
III.5.3. Description de l'installation BK4	18
III.5.4. Inspection visuelle, opérations et constatations	20
III.6. Conclusion	20
Chapitre IV. Discussion des résultats d'un broyeur a ciment BK4	22
IV.1.Introduction	23
IV.2. Diagnostic vibratoire de la moto-broyeur.....	23
IV.2.1. Données des mesures réalisées	23
IV.2.2. Inspection visuelle	24
IV.3. Analyse du broyeur sur la base des niveaux globaux	25
IV.3.1. Analyse globale	25
IV.3.2. Analyses des spectres en vitesse	26
IV.3.3. Analyse spectrale en enveloppe	27
IV.3.4. Analyse des spectres en accélération.....	39
IV.3.5. Déplacement axial de l'arbre flottant	31
IV.4. Conclusion	31
Conclusion générale	32
Référence bibliographique	33

Introduction générale

Les machines en mouvement génèrent inévitablement des vibrations, résultant des forces dynamiques, indépendamment de la qualité de leur fabrication. Ainsi, toute modification du processus dynamique d'une machine entraîne des fluctuations dans ses vibrations. Ces vibrations restent stables lorsque la machine fonctionne normalement, et deviennent quantifiables et reproductibles dans un environnement constant. Elles sont caractéristiques de l'état de fonctionnement de l'équipement.

À mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau vibratoire augmente et se modifie radicalement avec l'apparition de défauts, premiers signes physiques d'anomalies pouvant provoquer une dégradation voire une panne. Les vibrations sont dues aux forces internes de la machine ou à son interaction avec l'environnement extérieur. Grâce aux technologies intégrant des méthodes avancées de traitement du signal, la maintenance conditionnelle s'est développée. Elle occupe une place essentielle dans le diagnostic des équipements mécaniques. Ainsi, la surveillance par analyse vibratoire est devenue un outil indispensable de la maintenance moderne, permettant de détecter précocement et de suivre la dégradation des éléments critiques, tout en localisant les organes défectueux sans nécessiter le démontage complet de la machine.

Notre étude commence par le premier chapitre qui se concentre particulièrement sur la zone de broyage, essentielle dans les installations de cimenterie. Elle détaille l'entreprise ECDE Chlef, membre du groupe GICA, spécialisée dans la fabrication des poudres de ciment, et présente les types de ciment, le procédé de fabrication ainsi que la problématique spécifique à la zone de broyage.

Le deuxième chapitre propose une synthèse des méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter les défauts des machines tournantes, en mettant l'accent sur l'analyse vibratoire (spectrales, cepstrale et d'enveloppe). Il couvre à la fois les méthodes traditionnelles basées sur le traitement du signal et les approches intelligentes exploitant l'extraction de caractéristiques pour identifier les défauts, notamment ceux des engrenages.

Le troisième chapitre explore les concepts fondamentaux de l'analyse vibratoire, en se concentrant sur les types d'engrenages et leurs défauts courants et les différentes fréquences de défaut caractéristique d'engrenage, ainsi que sur les méthodes de surveillance, en particulier l'analyse vibratoire. Nous nous concentrons sur la planification conditionnelle prévisionnelle pour

permettre une réponse vibratoire efficace des chaînes de broyeur BK4 qui contient le motoréducteur ainsi le broyeur.

Enfin, le dernier chapitre met en évidence l'efficacité d'une organisation bien définie à travers des exemples concrets d'application sur des signaux simulés, ainsi que sur l'analyse et le diagnostic des signaux mesurés sur les paliers des réducteurs du moto-broyeur dans l'entreprise GICA cimenterie.

En conclusion, ce travail souligne l'importance de notre contribution originale à la recherche en Algérie dans le domaine crucial de la surveillance et du diagnostic des transmissions des machines tournantes.

CHAPITRE I
PRÉSENTATION DE LA
CIMENTERIE DE CHLEF
ECDE (GROUP GICA)

I.1. Introduction

Au cours de ce chapitre, nous explorerons le monde de la cimenterie de Chlef, où nous effectuerons notre stage de fin d'études. Dans un premier temps, nous vous raconterons brièvement son description ainsi des détails de construction. Par la suite, nous étudierons attentivement le processus global de production du ciment, depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à l'obtention du produit final, en soulignant les diverses zones et les nombreuses unités de production et de stockage qui le composent. Par la suite, nous examinerons les spécificités des diverses zones de la cimenterie, sujet qui sera examiné en détail dans le prochain chapitre. Notre étude portera principalement et en profondeur sur l'équipement de production, où nous examinerons les technologies particulières appliquée dans l'entreprise telle que les méthodes de traitement, analyses, diagnostic. Nous sera expliqué de manière détaillée, ce qui nous permettra d'approfondir notre étude.

I.2. Situation géographique de la cimenterie

La cimenterie d'Oued Sly est située à environ 9 km au sud-ouest de CHLEF. Sa mise en chantier a débuté en 1975 par une firme japonaise "**Kawasaki**" en collaboration avec une société belge d'équipements électriques, Cette usine est destinée à produire du ciment spécial et ordinaire par voie sèche et dispose de deux lignes de production d'une capacité totale de fabrication de sulfates 4 millions de tonnes par ans.



Fig 2. Carte géographique de l'usine.

I.3. Les activités de L'E.C.D.E

Centrées sur la production et vente du clinker et de différents types de ciment qui sont :

- Le ciment CPJ 32.5. Idéal pour les travaux courants de maçonnerie.
- Le Ciment CPJ 42.5, Pour tous travaux de béton armé.
- Le ciment CRS, Ciment résistant aux sulfates.

I.4. Procédé générale de fabrication

I.4.1. Qu'est-ce que le ciment tout d'abord ?

Poudre minérale obtient par broyage d'une roche artificielle, 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.



Fig 3. Le ciment.

D'abord, le mélange du calcaire, de l'argile et des additifs tels que les minerais de fer est le sable ; ce mélange appelé "cru", est broyé et porté à haute température (~1450°C) dans un four

cylindrique. Les transformations physico-chimiques créent 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.

I.4.2. Les étapes principales de fabrication

Les Zones				
<u>Zone carrières :</u>	<u>Zone matière première</u>	<u>Zone cuisson</u>	<u>Zone ciment</u>	<u>Zone expédition</u>
1-L'extraction des matières : L'extraction du calcaire, d'argile, de sable silicium et de gypse. 2- Concassage 3-Transport de la Matière vers l'usine	1- Stockage - Le Mélange des matières (staker), - Pont récupérateur, - Dépoussiérage 2- Homogénéisation Extraction Fluidisation	1- Préchauffeur à suspension 2-décarbonatation (le four rotatif) $\text{CaCo}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ 3- Clinkérisation 4-Le Refroidissement	1- broyage à boulets du ciment 2- stockage de ciment	L'ensacheuse rotative : - Sacs camion - Vrac camion - Sacs wagon - Vrac wagon

Tableau 1. Les zones de fabrication d’un ciment.

Particulièrement Il y a la zone de broyage de ciment la plus critique et sensible vu que la charge imposés au sein des machines tournantes.

I.4.3. Zone ciment (broyage)

Le gypse venant de la carrière de BOUZGHAIA subit un concassage, en utilisant un concasseur de vitesse variable suivant la qualité du gypse. Chacun dose dans une bande qui transporte le mélange (clinker, ajout, gypse) pour alimenter le BKI et le BKII successivement.

Tandis que chaque trémie de la deuxième ligne est équipée en dessous par un seul doseur déverse sur la troisième bande qui alimente le BKIII par le mélange (clinker, ajout, gypse).Elle contient atelier broyage ciment : broyeur ciment BK1

- broyeur ciment BK2
- broyeur ciment BK4
- séparateur ciment BK1

- séparateur ciment BK2
- séparateur ciment BK3
- séparateur ciment BK4
- ventilateur de tirage filtre à manche EP1
- ventilateur de tirage filtre à manche EP2
- ventilateur de tirage filtre à manche EP3
- ventilateur de tirage filtre à manche EP4.1
- ventilateur de tirage filtre à manche EP4.2

I.5. Problématique

Le taux élevé de pannes des machines de production est l'une des principales perturbations de la cadence dans l'industrie. Ce problème a un effet néfaste sur le bénéfice de l'entreprise, car il provoque des pertes de production et des dépenses de maintenance accrues. La plupart des pannes résultent d'une panne d'un seul composant ou de dysfonctionnements entre plusieurs composants. Dans cette situation, il est essentiel de maintenir la compétitivité de l'entreprise en assurant l'entretien et la fiabilité des équipements. En particulier, le domaine de la cimenterie est très touché, principalement les broyeurs de ciment. Ces derniers connaissent une détérioration progressive, principalement touchant des éléments essentiels tels que les engrenages et les roulements. Ce qui doit donc être optimisée une stratégie de maintenance des broyeurs afin d'améliorer les performances de broyage et par conséquent les résultats globaux de la cimenterie.

I.6. Conclusion

Pour récapituler, nous avons étudié l'évolution de la cimenterie de chlef depuis sa fondation jusqu'à nos jours. Zone par zone, les principales caractéristiques de la cimenterie ont été exposées, chacune étant cruciale. En particulier, l'unité de broyage joue un rôle essentiel dans la fabrication du ciment.

De plus, nous avons examiné la répartition des produits de la cimenterie en fonction de leurs utilisations finales, mettant en évidence leur importance dans différents domaines industriels et de la construction. La production de ciment à chlef joue un rôle essentiel dans l'économie algérienne et internationale, étant la première en Algérie en termes de qualité et de production, avec deux zones produisant chacune 2 millions de tonnes par ans.

La réussite de cette performance découle d'une maintenance rigoureuse, qui permet d'éviter les pannes, de réduire les dépenses et d'assurer la disponibilité des équipements. Cela permet d'optimiser la production et a une influence directe sur l'économie nationale et continentale.

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Introduction

L'Analyse vibratoire joue un rôle essentiel dans la surveillance de la santé des machines en marche, incluant une approche stratégique de maintenance prévisionnelle conditionnelle dans le secteur de la production industrielle. En recueillant régulièrement des informations sur les vibrations produites par les machines en rotation, cette approche a pour objectif de repérer dès le départ tout signe de dysfonctionnement et de suivre son évolution par le biais d'activités de diagnostic et d'observation. Cela facilite la planification des interventions mécaniques requises.

Dans ce chapitre, une étude de la littérature se concentre sur les éléments essentiels, en mettant l'accent sur l'importance capitale de l'analyse vibratoire dans le domaine de la formation conditionnelle.

II.2. Synthèse bibliographique

Boudinar. A. H, Benouzza. N, Bendiabdellah. A [1] Dans cet article, une étude est présentée sur les défauts des roulements qui peuvent être repérés de manière précoce pour améliorer la durée de vie des moteurs et ainsi diminuer les dépenses. Deux approches sont proposées dans cet article afin d'améliorer l'analyse du courant statorique. Dans la première approche, ils ont utilisé un filtre analogique pour améliorer la qualité du signal traité. Pour la deuxième méthode est d'accroître la luminosité du spectre. Un algorithme de localisation de maximal est développé dans cette perspective pour ne faire apparaître que la signature du défaut détecté. Les résultats de l'expérience montrent que les améliorations proposées sont intéressantes et efficaces.

Delaunay. T, Courtin. S, Durr. B, et al [2] Ces auteurs utilisant des techniques d'analyse vibratoire spécifiquement de l'analyse spectrale. D'abord ils ont expliqué aux étudiants par un exemple amusant de l'enregistrement vibratoire d'un ventilateur et de défauts de type balourd, puis ils ont étudié plus en détail l'écoute de motoréducteur et de roulement à billes à partir de l'analyse temps/fréquence. Une fois cette synthèse résumée, les étudiants sont en mesure de distinguer les éléments transitoires et stationnaires, ce qui permet de distinguer les indicateurs de défaut soumis à une méthode comparative, puis de mettre en œuvre un contrôle spécifique.

Boukar. A, Hamzaoui. N [3] L'objectif de cette étude est d'évaluer différents critères d'analyse des signaux de vibrations dans le domaine temporel afin de déterminer leur capacité à détecter les défauts, évaluer la gravité des défauts de roulement, ainsi qu'à distinguer un engrenement sain d'un engrenage défectueux dans différentes configurations de défauts simulées sur un banc d'essai expérimental. Expérimentalement, ils ont pris en compte les paramètres de fonctionnement de la machine pour assurer la solidité de chaque critère à travers des essais en expérimentant divers paramètres tels que la vitesse et la charge, afin d'évaluer leur influence sur les critères étudiés. Il est très probable que l'identification d'un critère dans ces conditions soit appropriée.

Anupam. K. A, Anand. P. A, Pavan. K. K. A [4] L'utilisation des engrenages permet de transférer la puissance et le mouvement d'un arbre à un autre, en fonction de diverses vitesses et charges. Des engrenages en polymère ont été utilisés dans de nombreuses applications pour remplacer les engrenages métalliques, ce qui offre des bénéfices tels que l'autolubrification, un poids réduit et une émission sonore faible. Dans cette étude, on examine les propriétés statistiques des signaux de vibration, comme le facteur de crête, le RMS, l'indicateur d'impulsion et le kurtosis, ainsi que des engrenages en bon état et défectueux, afin de détecter les dommages. Les résultats démontrent que la méthode suggérée permet d'identifier de manière efficace les défauts.

Maranhão. L, Tahan. A, Agardi .B [5] En maintenance, il est essentiel d'utiliser des méthodes de prédiction afin de prévenir les pannes des systèmes et d'optimiser la gestion des opérations d'entretien. Cette démarche repose principalement sur l'évaluation de la durée de vie restante. Cette recherche examine les différentes méthodes de prédiction des pannes, classées en cinq catégories : les méthodes à base d'expérience pratique, les méthodes à base de principes physiques, les méthodes à base d'analyse des signaux des capteurs de surveillance, les méthodes à base d'apprentissage automatique et enfin les méthodes hybrides qui combinent plusieurs techniques. Elle examine minutieusement les bénéfices et les inconvénients de chaque méthode, et offre une synthèse afin de faciliter leur compréhension et leur mise en œuvre.

Felahi. S, Mohamedi. W [6] La technique d'analyse d'ordre joue un rôle crucial dans l'analyse des vibrations, spécialement développée pour repérer les origines des vibrations dans les machines en mouvement. Son utilité réside dans la mesure des fréquences auxquelles divers éléments à l'intérieur de la machine sont vibrés. Les tours par minute (RPM) sont un élément essentiel de l'analyse des vibrations des machines tournantes, permettant ainsi d'observer les variations d'amplitude de vibration en fonction de la vitesse de rotation. Ces données permettent aux analystes d'acquérir une compréhension précieuse des dynamiques des systèmes rotatifs, de détecter les défauts et de prendre des décisions en matière de maintenance et de réparations.

Boukar. A, Hamzaoui. N [7] Différents critères sont étudiés afin d'analyser les signaux de vibrations temporellement. Ils visent à évaluer leur aptitude à repérer divers types de défauts, à évaluer leur gravité et à distinguer un fonctionnement normal ou défectueux dans différents cas. Afin d'accomplir cela, ils ont employé un banc d'essai expérimental avec des engrenages et des roulements soumis à des défauts contrôlés et mise en chocs et création des défaillances. Pour évaluer la fiabilité de chaque critère, nous prenons en considération différents paramètres opérationnels des machines. Par exemple, nous ajustons la vitesse et la charge afin de simuler diverses conditions d'utilisation. En analysant l'impact de ces paramètres sur les critères étudiés, nous pouvons repérer ceux qui restent efficaces dans différentes situations. Cela nous donne la possibilité de déterminer quel critère est le plus adapté pour repérer un type particulier de défaut.

Benchaabane. C, Djebala. A, Ouelaa. N, Guenfoud. S [8] L'objectif de cette étude est d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des indicateurs scalaires dans la surveillance vibratoire des machines tournantes, en identifiant les défauts qui entraînent des forces impulsives, notamment ceux qui affectent les roulements et les engrenages. Les résultats de l'expérience, basés sur des signaux d'accélération mesurés sur des roulements endommagés, confirment les hypothèses théoriques précédentes. Il semble parfait de combiner une vitesse de rotation faible, une large bande de fréquence et un filtrage passe-bande à haute fréquence afin de maximiser le kurtosis et de permettre une détection aussi précoce que possible.

Taleb. M, Boudiar. B, Zaghdani. E [9] Au sein de cette étude, une approche d'analyse fréquentielle a été adoptée afin de prédire la maintenance, en utilisant des méthodes de suivi et de diagnostic des défauts des ventilateurs à travers l'analyse globale et l'analyse spectrale. Les machines produisent des forces, des turbulences, des chocs et des instabilités grâce à leur fonctionnement, ce qui entraîne souvent des défaillances ultérieures. Des vibrations sont produites par ces efforts, ce qui cause des dommages aux structures et aux parties des machines.

Abou El Anouar.B, Elamrani. M, Elkihel. B, Delaunois. F [10] En règle générale, les engrenages opèrent dans des conditions difficiles, ce qui entraîne une dégradation progressive de leur condition. Cette recherche examine les techniques d'analyse vibratoire, telles que l'analyse globale et l'analyse spectrale qui peuvent être utilisées pour évaluer les réducteurs à engrenages. Cette étude expérimentale a été réalisée sur un engrenage avec une dent usée. Elle permet de repérer le problème en utilisant des indicateurs statistiques. Par la suite, le passage au domaine fréquentiel a donné la possibilité de diagnostiquer le problème en mesurant la fréquence d'engrènement de l'engrenage corrompu. Les signaux émis à des fréquences de rotation variées ont confirmé la présence et la localisation du défaut. Il y a d'autres méthodes comme l'analyse temps-fréquence qui doivent être mises en œuvre pour compléter l'évaluation.

II.3. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons abordé la maintenance préventive conditionnelle appliquée aux machines tournantes, en soulignant les éléments les plus essentiels ainsi que leurs imperfections les plus fréquentes. Nous avons également étudié les techniques de surveillance en cours d'utilisation et celles en cours de développement. Ces techniques jouent un rôle crucial dans la détection précoce des problèmes et la prise des mesures avant que des dommages irréparables ne se produisent. Nous avons remarqué que l'analyse vibratoire, basée sur les vibrations, les chocs et les bruits dans les structures industrielles, joue un rôle essentiel tant à l'intérieur qu'à l'extérieur dans différents domaines. Il est donc primordial de les prendre en compte à chaque étape du processus : à partir du stade théorique, pendant la création de la structure, et tout au long de sa mise en service jusqu'à sa mise hors marche.

**CHAPITRE III :
DIAGNOSTIC VIBRATOIRE
D'UN BROYEUR A CIMENT BK4**

III.1. Introduction

Les machines tournantes fonctionnelles doivent être entretenues afin d'éviter les accidents et d'optimiser leur disponibilité opérationnelle. On utilise différentes méthodes de maintenance conditionnelle, comme l'analyse vibratoire, l'analyse des lubrifiants et la thermographie infrarouge, pour les machines rotatives comme les moteurs, les ventilateurs, les turbines et les compresseurs. Ces approches donnent des renseignements essentiels sur leur état de marche. Le début de la maintenance préventive conditionnelle est provoqué par des événements préétablis, comme des autodiagnostic, des signaux de capteurs ou des mesures d'usure, qui mettent en évidence l'état de déclin de la machine. L'analyse vibratoire revêt une importance primordiale en ce sens qu'elle permet de repérer tous les défauts au niveau de la structure, assurant ainsi une disponibilité optimale du processus d'entretien.

III.2. L'Analyse vibratoire

C'est une technique utilisée pour le suivi des machines tournantes en fonctionnement. Les variations efforts générés par la rotation des éléments sont souvent la cause des vibrations qui peuvent endommager les composants des machines. La mesure de ces vibrations va permettre d'identifier ces efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils aient causé de dommage irréversible. Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée.

III.2.1. Les activités de l'analyse vibratoire

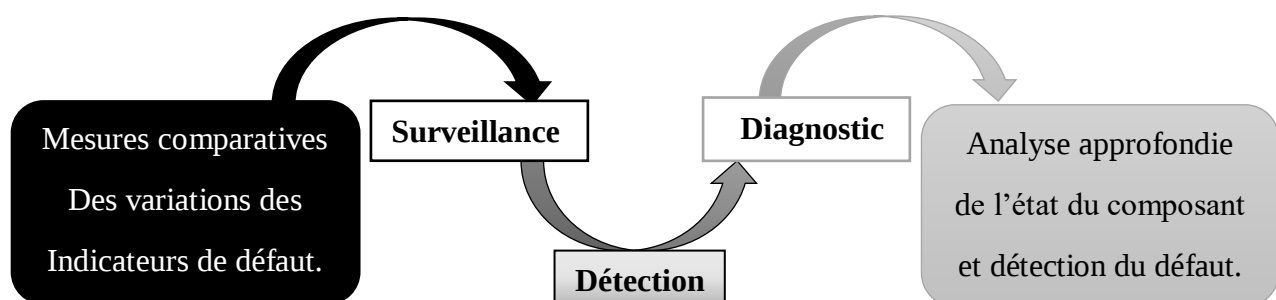


Fig 4. Schéma représentatif des activités de l'analyse vibratoire.

III.2.2. Les outils de diagnostic par l'analyse vibratoire

Les principaux différents outils de traitement précisément de diagnostic du signal adéquats à la détection des défauts de roulements par l'analyse vibratoire sont :

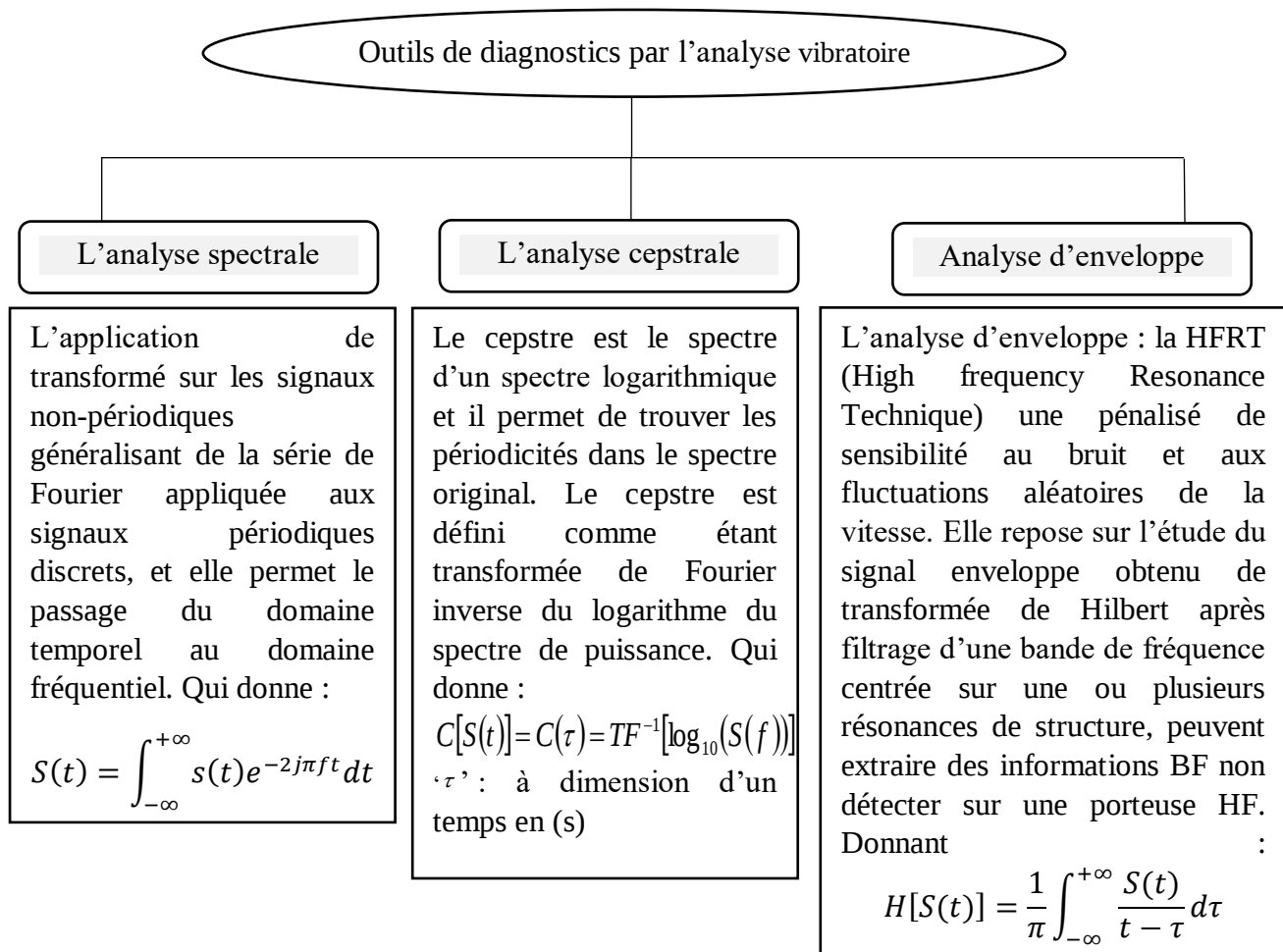


Fig 5. Les outils de diagnostic par l'analyse vibratoire.

III.3. Les Engrenages

Les engrenages sont des éléments mécaniques composés de deux roues dentées en contact, spécialement élaborées pour transférer le mouvement et la puissance d'un arbre à un autre. Ils sont basés sur l'interaction précise de leurs dents, assurant ainsi une transmission efficace et fiable. Il est possible d'utiliser ces éléments polyvalents de diverses façons : pour augmenter ou diminuer la vitesse de rotation, changer la direction du mouvement, transférer de la puissance sur de longues distances, ou encore modifier le couple de sortie.

III.3.1. Types d'engrenages (partie ajoutée à l'annexe)

Tableau 2. Les types d'engrenages.

Le type	Avantage	Inconvénient	figure
cylindriques à denture droite	-Simple et économique -Pas d'efforts axiaux	-Vitesses de rotation limitées, Bruyant -Entraxes prenant des valeurs finies	
cylindriques à denture hélicoïdale	-Transmission plus souple et moins bruyante -Transmission d'efforts et de vitesses plus importants -Possibilités d'entraxes infinis	-Effort axial supplémentaire -Solution moins économique -Rendement moins bon	
coniques	-Arbres non parallèles voir non concourants -Possibilité de choisir le sens de rotation de la roue menée	-Solution moins économique -Nécessité d'un réglage des roues au montage	
à roue et vis sans fin	-Arbres quelconques (Très souvent orthogonaux) -Rapport de réduction élevée	-Rendement faible -Parfois non réversible (peut être un avantage)	

III.3.2. Types de défauts d'engrenages

Les défauts des engrenages sont classés dans les catégories suivantes :

III.3.2.1. Défauts répartis

✓ Usure :

L'usure se manifeste par une diminution graduelle de l'épaisseur des dents, avec des altérations plus ou moins marquées de la surface par glissement. Elle varie en fonction de la charge mécanique à transmettre, de la vitesse de glissement et de la présence d'abrasifs dans le lubrifiant.



Fig 6. Usure des dents.

✓ Putting (piques)

Ces trous, plus ou moins profonds, touchent l'ensemble des dents, surtout dans la zone du cercle primitif. La majorité de ces dommages se produisent sur des engrenages en acier de construction relativement solide, ce qui les rend plus sensibles aux effets cumulatifs des surtensions.



Fig 7. Dommages des dents par piqûres.

III.3.2.2. Défauts localisés

✓ Ecaillage

L'absence de film d'huile entre les surfaces entraîne l'écaillage. Il s'agit de l'échauffement provoqué par les vitesses de frottement et de glissement entre les profils dentaires. Le contact engendre une alternance d'usure et de rupture, ce qui entraîne une détérioration rapide de la surface. Cela peut être causé par une mauvaise qualité de surface des dents ou par un mauvais choix de lubrifiant.

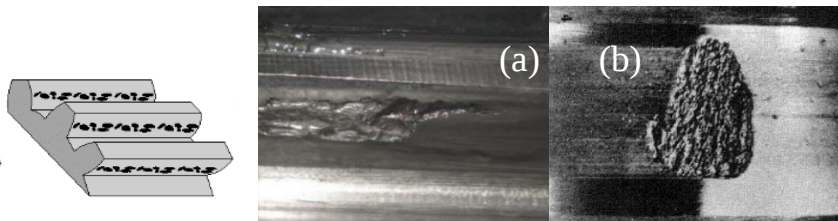


Fig 8. Défaillance de surface par écaillage.

✓ Grippage

Son origine est directement liée à la destruction brutale du film d'huile par la température produite par un frottement sous charge. Les vitesses élevées, les gros modules et le faible nombre de dents en contact favorisent principalement le grippage. Les conditions de mise en service et l'état physico-chimique du lubrifiant ont un impact sur la probabilité de grippage.

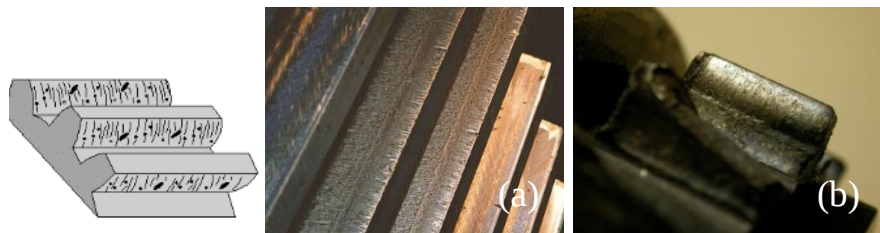


Fig 9. Frottement de dents par grippage.

✓ Fissuration

Elle évolue à chaque prise et se trouve au pied de la dent. On la trouve sur des aciers fins et durcis, qui sont soumis à des concentrations de contraintes. Ces fissures résultent d'une contrainte au pied de la dent qui dépasse la limite de fatigue du matériau d'origine. Ils se manifestent en raison de l'atteinte de la limite élastique en contrainte au pied de la dent du côté en tension.



Fig 10. Cassures et fissures.

III.4. Fréquences caractéristiques des défauts d'engrenage

- Fréquence de rotation (Fr) : c'est la vitesse de rotation de l'engrenage et est exprimée en tours par minute (tr/min) ou en hertz (Hz).
- Fréquence de pignon (FP) : $Fr_1 * Z_1$, telle que Z_1 le nombre de dents du pignon.
- **Fréquence d'engrènement (Fe)** : C'est la fréquence à laquelle les dents des deux engrenages s'engrènent. Elle est calculée de $(Fr_1 * Z_2) / Z_r$, telle que Z_r le nombre de dents de la roue.
- **Fréquence harmonique ($N*Fr$)** : $N*Fr$, sont souvent associées à des défauts tels que l'usure, les fissures, etc.
- **Fréquence de passage de dent (Fz)** : $Fr_1 * Z_e$, telle que Z_e le nombre de dents d'engrenage.

III.5. Les étapes de contrôle vibratoire prévisionnel d'un Broyeur BK4

III.5.1.Principe des contrôles vibratoires et analyse des données

Les analyses vibratoires effectuées de notre part sont fondées sur les données vibratoires mises à disposition. Le matériel utilisé et les procédés de repérage font état d'une documentation des normes **Flender F6110** et **F0485** et peuvent être mis à disposition en cas de nécessité.

Les procédés de mesure et des analyses répondent aux normes actuelles de la technique. Toutefois toute garantie sur les diagnostics et prévisions faites dans ce rapport sont exclus. Toute responsabilité sur des séquences, comme perte de production/bénéfice sont exclues. Les valeurs globales en vitesse sont mises en valeur sur une gamme de 10 (Hz) à 1000 (Hz) selon la norme **DIN ISO-10816-3**. Les analyses des spectres en vitesse servent de mettre en évidence l'état de la denture ainsi qu'à la détermination de défauts sur les arbres, accouplements ou roulements. Les analyses des spectres en enveloppe permettent de reconnaître suffisamment tôt les plus petites dégradations sur les roulements ou sur les engrenages et à l'aide des analyses des accélérations on pourrait mettre en évidence d'éventuels problèmes avancés sur les roulements. Dans ce cas une évolution de la résonnance sur une gamme de haute fréquence entre 3 et 8 (kHz) a lieu.

• Recommandations

Les mesures à prendre sont comme suit :

- Afin d'éviter des dégâts consécutifs, il n'est absolument pas recommandable de garder L'installation en marche.
- Effectuer une vidange et un rinçage du carter du réducteur, des conduites de l'huile et du bac de la pompe à l'huile.
- Déléguer un mécanicien Flender pour superviser le renversement des pignons et remplacer les roulements du réducteur.
- Effectuer régulièrement des analyses d'huile pour assurer une bonne lubrification.
- Assurer une bonne étanchéité et une bonne maintenance de l'installation.
- Procéder le plus vite possible à une commande des pièces de rechange.

III.5.2. Objet de l'étude

Il s'agit des prélèvements de mesures vibratoires et de l'inspection visuelle effectuées sur l'équipement stratégique de l'atelier broyage ciment de la cimenterie ECDE à l'usine de Chlef Algérie. L'objet de cette étude est donc de caractériser le comportement vibratoire et mettre en évidence l'état de la denture de la machine de la cimenterie citée ci-dessus et de préconiser les actions éventuelles de maintenance qui s'imposent. Pour l'évaluation de l'état vibratoire du réducteur on utilisera la légende suivante :

Tableau 3. Les symboles de détection.

Symbole	Signification
	Rien à signaler
	Détection d'irrégularité. Installation à surveiller
	Dommages évolutifs. Il faut prendre des mesures de sécurité

III.5.3. Description de l'installation BK4

Le broyeur a pour but de transformer le mélange en poudre fines et très fines. Le produit est pulvérisé entre dans le premier compartiment de gros bolets (80 à 60mm) et subit un premier broyage, passe au travers de la grille relevée dans le deuxième compartiment de moyens et petits boulets (25 à 50mm). Ce dernier est considérablement amélioré par un ventilateur principal de circulation EP (de 2300kw) qui entraîne plus vite les particules fines, en passant d'un air glissière vers l'élévateur à godets qui déverse dans le séparateur.

Particulièrement le broyeur BK4 c'est un cylindre fermé tournant autour d'un axe horizontal. Elle comporte un moteur, un accouplement, un réducteur, un arbre des paliers à roulement, et autres accessoires près Fig.7, Elle caractérise par :

- Capacité de 100 t/h pour BK1, 105th pour BKII et 150th pour BKIII.

- Tournant sur deux tournants creux permettant le passage de la matière.
- Porté par deux paliers à rotule.
- Entraîné avec un moteur à courant continu de (4000 kw pour BKI et BKII) et de (5500kw pour BKIII) de vitesse 991 tr/min.
- Un réducteur à pignons (vitesse d'entrée : 990 tr/min, vitesse de sortie : 141,08 tr/min)



Fig 11. Le broyeur BK4

Tableau 4. Une fiche d'analyse de la chaîne cinématique d'un broyeur.

Atelier	Broyage ciment	
Service	Analyses vibratoires et inspection visuelle	
Application	Le réducteur d'un Broyeur à ciment BK4	
Réducteur / Fabr. / Type/-N°	Flender DMG2 22, N° 4238 667-0040-1 n1/n2 = 990/141,08 Tr/min, I=7,017, P2=3750 kW	
Roulements	P3 : SKF NU2248 P4 : SKF NU2248 P5 : SKF EXPLO 24144 P6 : SKF EXPLO 24144 P7 : TIMKEN 24060 P8 : TIMKEN 24060 P9 : TIMKEN 24060 P10 : TIMKEN 24060	
Accouplement	Type. : RUPEX RWN 710	
Moteur	marque EMZ Les mesures sont réalisées avec les conditions de fonctionnement : - Mesures avec un Débit de : 130 T/h, P : 4000 KW, I : 506 A et vitesse : 991 tr/min - Réf. roulement : COA : NU244 MC3 ; CA : 6048MC3+NU244MCN	
Appareils de mesure	- Collecteur données et analyseur : Scout Vibrotest SCHENCK RoTec GmbH - Capteur accélérométrique et câble associé : ASH201, sensibilité 0.1mV/g.	-Logiciel d'analyse vibratoire associé : System 04 SCHENCK associe à l'ordinateur portable

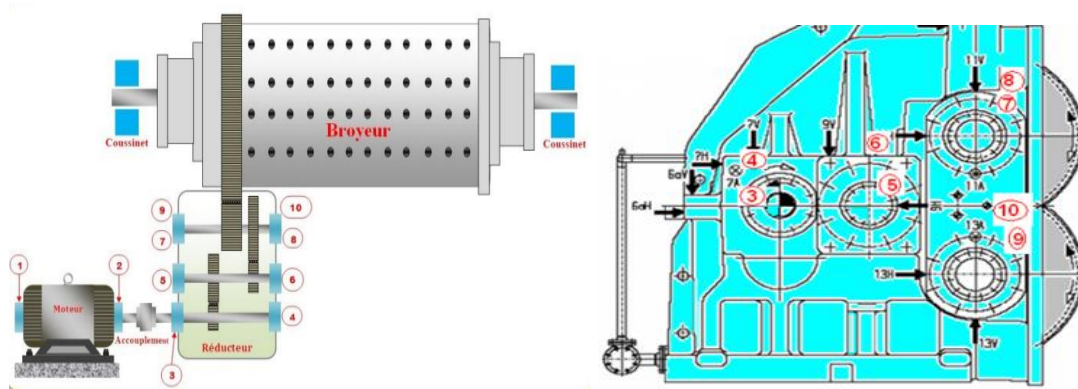


Fig 12. Schéma cinématique du broyeur BK4 et points des mesures d'équipement.

III.5.4. Inspection visuelle, opérations et constatations

Les constatations faites pour estimer l'apparence et les conditions d'entraînement du réducteur :

- Produit : Clinker
- Production : 140 t/h
- Consommation du moteur : 3650 kW
- Température ambiante : 30°C
- Huile utilisée : FODDA, VG 320
- Date dernière analyse d'huile : Mars 2024
- Date dernière vidange : Mars 2024

III.5.4. La préparation de collecteur des données et analyseur : SCHENCK RoTec GmbH

Les capteurs inertiels Schenck sont un type de capteur utilisé dans les systèmes de surveillance des vibrations. Ces capteurs sont chargeable avec une batterie, un file magnétique, une carte démontable pour qu'on puisse de l'entrée sur un ordinateur et un logiciel. Dans le but de mesurer l'accélération, souvent selon trois axes (X, Y et Z), et peuvent également mesurer la vitesse angulaire. Afin de détecter les vibrations et les mouvements dans les machines, ce qui peut indiquer des défauts potentiels en présence d'un spécialiste (Processus OFFline).



Fig 13. Les étapes principales de procédure de Schenck.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini l'analyse vibratoire et exploré les techniques telles que l'analyse spectrale, cepstrale et d'enveloppe, en montrant comment elles se complètent mutuellement. En parallèle, une étude des aspects critiques des engrenages industriels a été menée. Nous avons commencé par définir les engrenages et expliquer leurs types courants ainsi que les défauts couramment observés lors de la transmission de charge ou mouvement. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur la chaîne cinématique d'un broyeur BK4 équipé d'un motoréducteur. On a fait la mise en place des plans nécessaires de prévention pour détecter les défauts des engrenages et évaluer leur gravité. Enfin, ces mesures ont été mises en œuvre avec soin, incluant le remplacement des engrenages défectueux, une lubrification inadéquate qui résulte la contamination par les ciments, ainsi que l'équilibrage des composants et l'évaluation des vibrations mentionnée dans le chapitre suivant ce que nous conclure l'importance de l'analyse vibratoire.

CHAPITRE IV
DISCUSSION DES RESULTATS
D'UN BROYEUR A CIMENT BK4

IV.1. Introduction

Au fil des années, de nombreuses techniques ont été développées afin d'assurer un diagnostic fiable de l'état de fonctionnement des machines. Parmi ces méthodes, l'analyse spectrale est l'une des plus anciennes et des plus couramment employées. Afin de pallier ses limites, de nouvelles approches, souvent adaptées à certains défauts, ont été développées, comme l'analyse cepstrale et l'analyse d'enveloppe. L'utilisation des méthodes temps-fréquence dans le domaine du diagnostic vibratoire des machines a été une avancée significative, permettant le développement de techniques solides telles que la transformée de Fourier à court terme (STFT).

Afin d'éviter les erreurs de diagnostic, un modèle en ligne a été mis en place. Les techniques de surveillance utilisées dans ce modèle permettent de surveiller en temps réel les équipements, en prenant en considération les nouveaux et les anciens paramètres tels que la vitesse de vibration à un moment précis. En même temps, le rôle de l'être humain qu'il est essentiel lors des inspections offline pour des mesures sur machines ou des essais visuels.

Dans ce chapitre, nous suggérons d'utiliser l'analyse spectrale pour diagnostiquer et prendre des décisions avant qu'une panne ne se produise, en utilisant une chaîne cinématique de broyage. Ce modèle d'évaluation globale des niveaux de vibrations permet d'évaluer l'état de la machine, dans le but d'améliorer la durée de vie de l'équipement et de diminuer les dépenses liées à la maintenance.

IV.2. Diagnostic vibratoire de moto-broyeur

IV.2.1. Données des mesures réalisées

Le principe du diagnostic des vibrations repose sur la comparaison des propriétés vibratoires mesurées avec les fréquences théoriques indicatrices de dégradation. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un collecteur de données portable d'une nouvelle génération : SCHENCK04

Les procédés de mesure employés sont : Vitesse des vibrations, Enveloppe de modulation et Accélération. Les données relevées sont assistées par ordinateur. Le tableau cinématique contenant les fréquences théoriques du réducteur et des engrenages.

Etage du réducteur	Motor shaft	1	2	3	4
Nombre de dents/pignon		21	19	31	
Nombre de dents/roue			40	70	282
Vitesse pignon (tr/min)	995	995	522,38	141,79	15,59
Fréquence de rotation pignon(Hz)		16,58	8,71	2,36	0,260
Fréquence de Nutation(Hz)		33,17	17,41	4,73	0,52
Fréquence d'engrènement 1(Hz)		348,25			
Fréquence d'engrènement 2 (Hz)			165,42		
Fréquence d'engrènement 3 (Hz)				73,26	

Tableau 5. Fréquence cinématique d'engrenage d'une vitesse de [995tr/min].

Fréquence des roulements						
Arbre GV	Note	Nombre éléments roulants	cage	Eléments roulants	Bague ext.	Bague int.
1*pos.151	SKF/FAG	18	7,30	107,13	130,68	167,82
2*pos.152	SKF	19	7,13	114,92	135,65	179,43
Arbre MV						
2*pos.350	SKF	16	3,66	52,24	85,33	80,97
Arbre PV						
4*pos.250	SKF	19	1,02	16,05	19,31	25,59

Tableau 6. Fréquence cinématique de roulements d'une vitesse de [995 tr/min].

IV.2.2. Inspection visuelle

- Le manomètre en face du réducteur est défectueux et devrait être remplacé.
- La majorité de la denture montre une abrasion importante au pied dent, comme étant générée par la contamination de l'huile du réducteur par le ciment, Fig 12.
- Formation de rouille sur le pignon MV, Fig 13.
- Huile du réducteur fortement contaminé par le ciment, Fig 14.
- Les températures relevées sur le carter du réducteur au niveau du train GV sont légèrement Élevées. Les autres températures sont bonnes, Tableau 7.
- Les valeurs globales en vitesse relevées sur le carter du réducteur sont trop élevées, Tableau 7.

**Fig 14.** Une abrasion importante au pied dent.



Fig 15. Formation de rouille sur pignon.



Fig 16. Huile contaminé et ciment accumulé et solidifié au fond du bac du réducteur.

IV.3. Analyse du broyeur sur la base des niveaux globaux

IV.3.1. Analyse globale

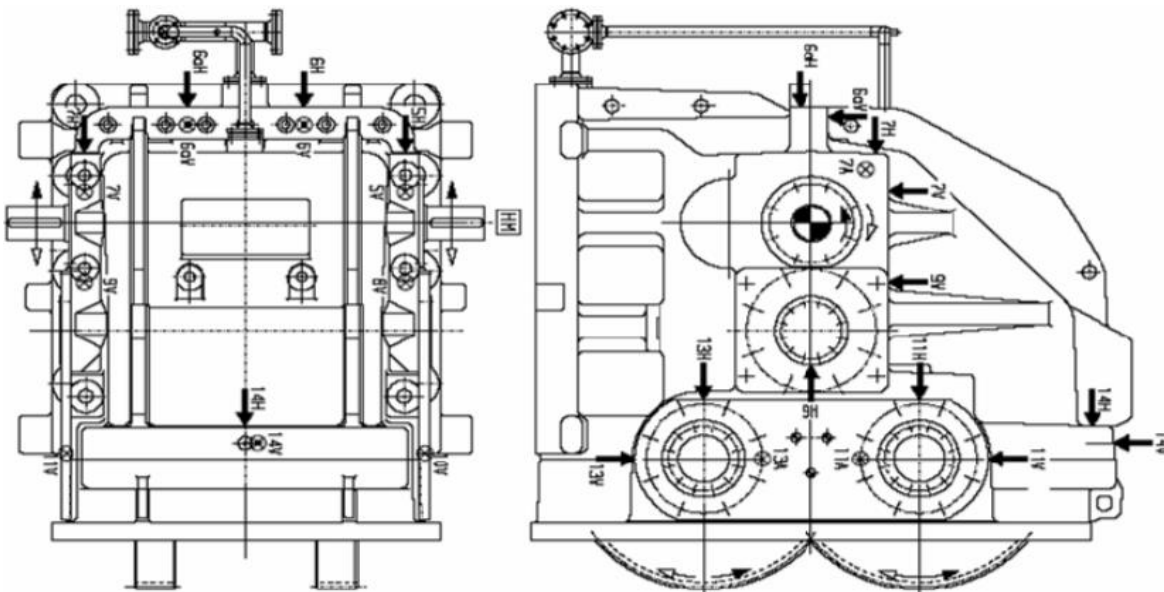


Fig 17. Emplacement typique des points de mesure sur un réducteur Flender DMG222.

Sur la base des mesures de déplacements dans la bande [0 - 40000Hz] et de vitesse dans la bande [0 - 1500Hz] et d'accélération dans la bande [0 - 6000Hz], au niveau des 6 paliers du réducteur, dans les trois directions (Horizontale, Verticale, Axiale).

Tableau 7. Températures et valeurs globales en vitesses du DMG222.

Point de mesure	V _{eff} [mm/s]	Températures [°C]	Point de mesure	V _{eff} [mm/s]	Températures [°C]
1H	1,9	46	9V	5,2	61
2H	1,2	35	10H	6,3	56
5H	10	66	10V	8,8	
5V	15,1		11H	4,4	58
6H	12,3	65	11A	6,6	
6V	14,7		12H	6,1	60
7H	7		12V	6,1	
7V	15,3	64	13H	6,5	58
7A	8		13V	3,9	
8V	11,4	60	14H	15,2	52
9H	4,3	61	14V	11,2	

IV.3.2. Analyses des spectres en vitesse

Pour l'estimation de l'état vibratoire du réducteur, des analyses des spectres en vitesse, accélération et déplacement à haute, moyenne, basse fréquence qu'ont été réalisées. La lecture des spectres en vitesse relevés sur les différents points de mesure du réducteur montre la présence de pics prédominants à la fréquence d'engrenage du couple d'attaque à 348 Hz et ces multiples. Les amplitudes mesurées, de l'ordre de 15 mm/s pour un maximum toléré de 7,1 mm/s selon le standard ISO 10816-3, sont trop élevées, notamment au niveau de l'arbre GV et au-dessus des trains de sortie (points 14H et 14V), voir Fig. 16. Ces hautes vibrations sont générées par une nette dégradation du comportement de l'engrènement du train d'attaque qui est causée par une contamination importante de l'huile du réducteur par le ciment présent en très grande quantité dans le bac du réducteur, et ce depuis une longue période. Les fréquences d'engrenage des autres trains sont de faibles amplitudes.

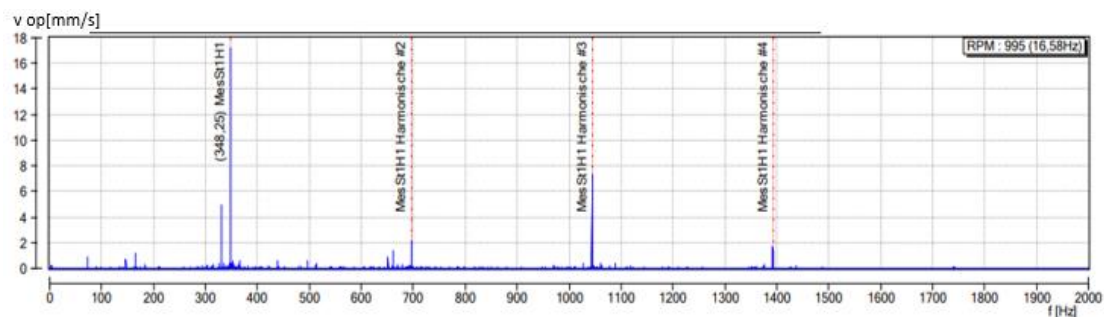


Fig 18. Spectre en vitesse, arbre GV.

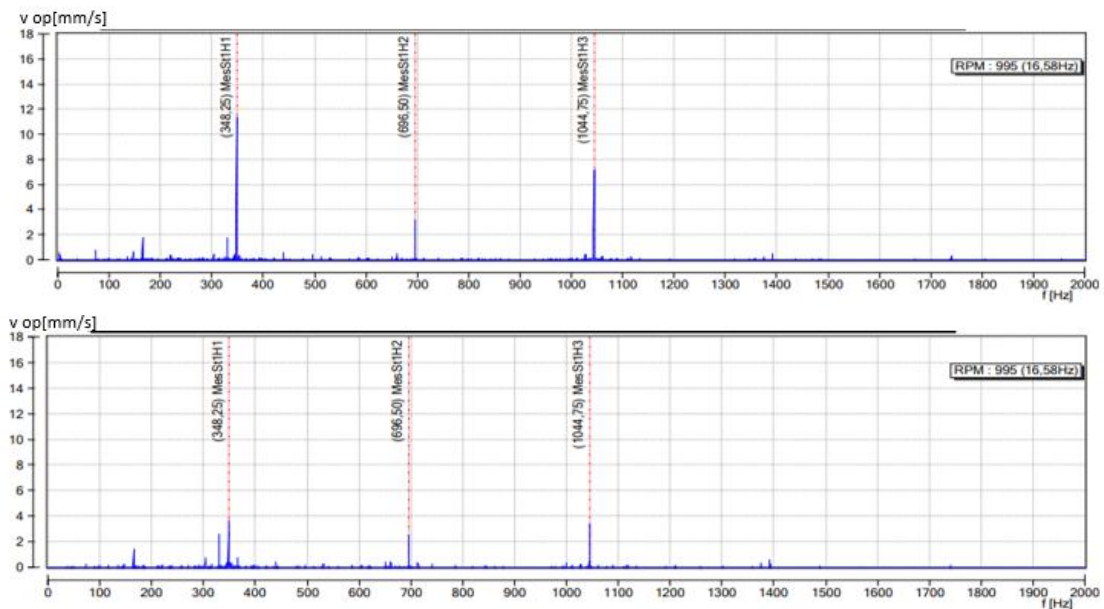


Fig 19. Spectres en vitesse, arbre MV.

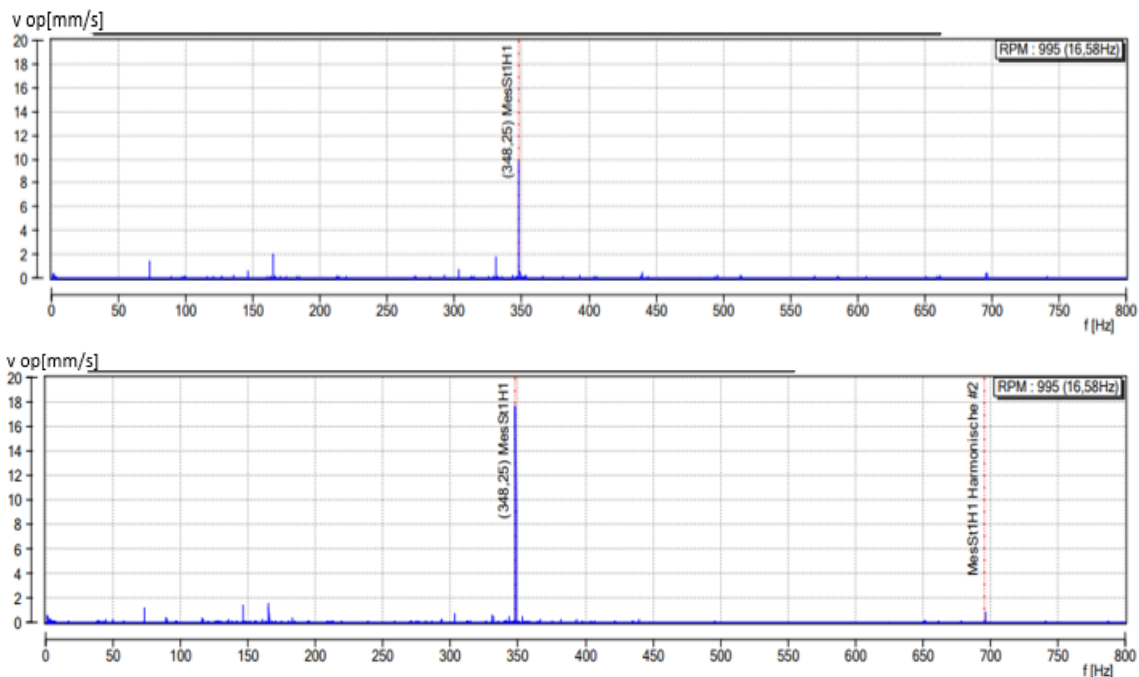


Fig 20. Spectres en vitesse, arbre PV.

IV.3.3. Analyse spectrale en enveloppe

L'estimation de l'état vibratoire du réducteur par des analyses des spectres en vitesse à bandes étroites ont été réalisées. La lecture des spectres en vitesse relevés sur les différents points de mesure du réducteur montre la présence de pics prédominants à la fréquence d'engrenage du couple d'attaque à 348 Hz et ces multiples. Les amplitudes mesurées, de l'ordre de 15 mm/s sont trop élevées, notamment au niveau de l'arbre GV. Ces hautes vibrations sont générées par une nette dégradation du comportement de l'engrènement du train d'attaque qui est causée par une contamination importante de l'huile du réducteur par le ciment présent en très grande quantité dans le bac du réducteur, et ce depuis une longue période. Les fréquences d'engrenage des autres trains sont de faibles amplitudes.

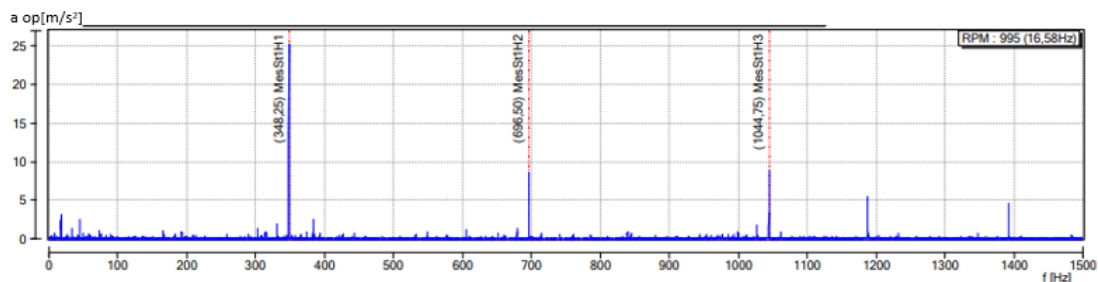


Fig 21. Spectres en enveloppe, arbre GV.

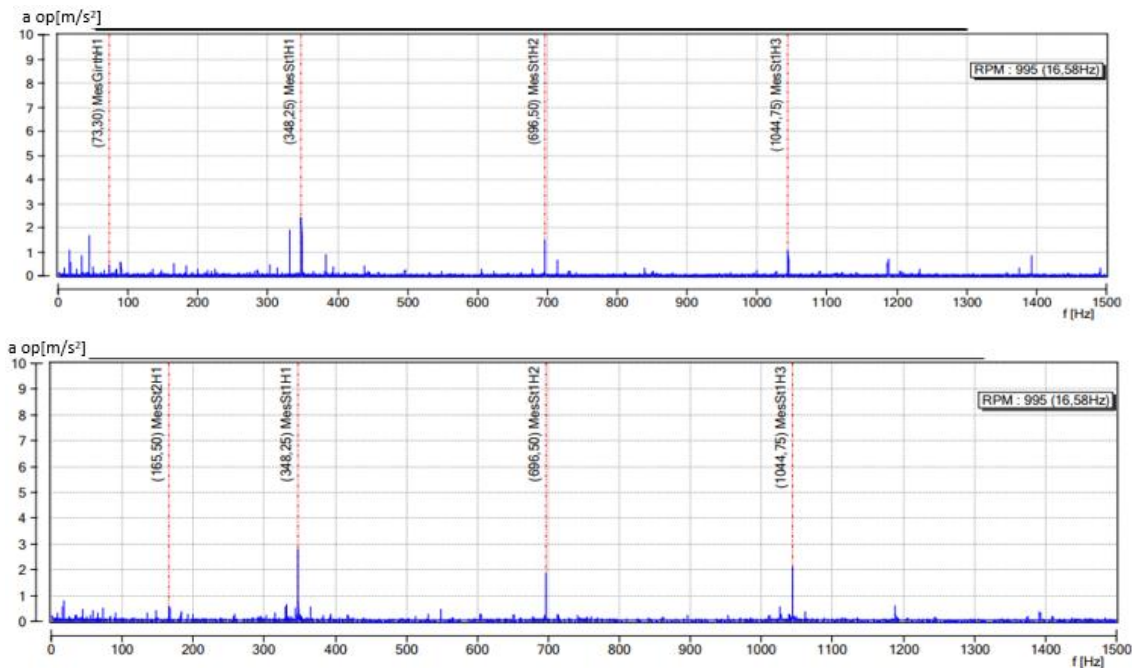


Fig 22. Spectres en enveloppe, arbre MV.

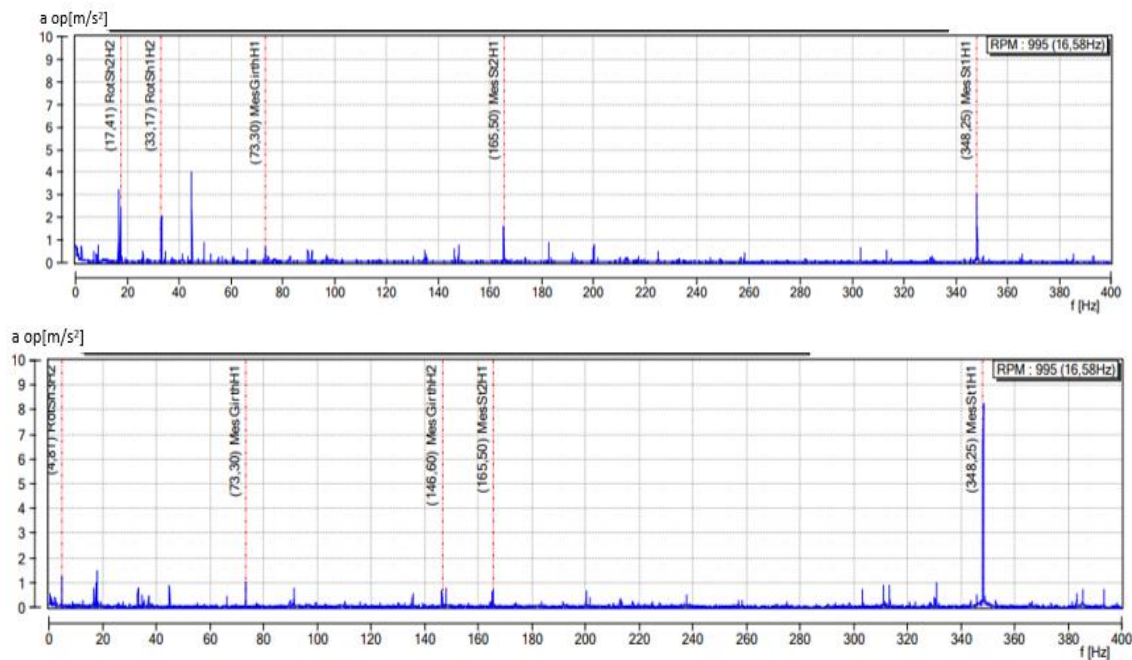


Fig 23. Spectres en enveloppe, arbre PV.

IV.3.4. Analyse des spectres en accélération

Fig. 22 à Fig. 24 représentent les spectres en accélération relevées sur les différents points de mesure du réducteur. La lecture des spectres en accélération montre une prédominance absolue de pics à 348 Hz, la fréquence d'engrenage du couple d'attaque et ses multiples. Les amplitudes

mesurées de l'ordre de plus de 100 m/s^2 sont trop élevées et dépassent largement les valeurs habituelles pour des réducteurs de cette taille.

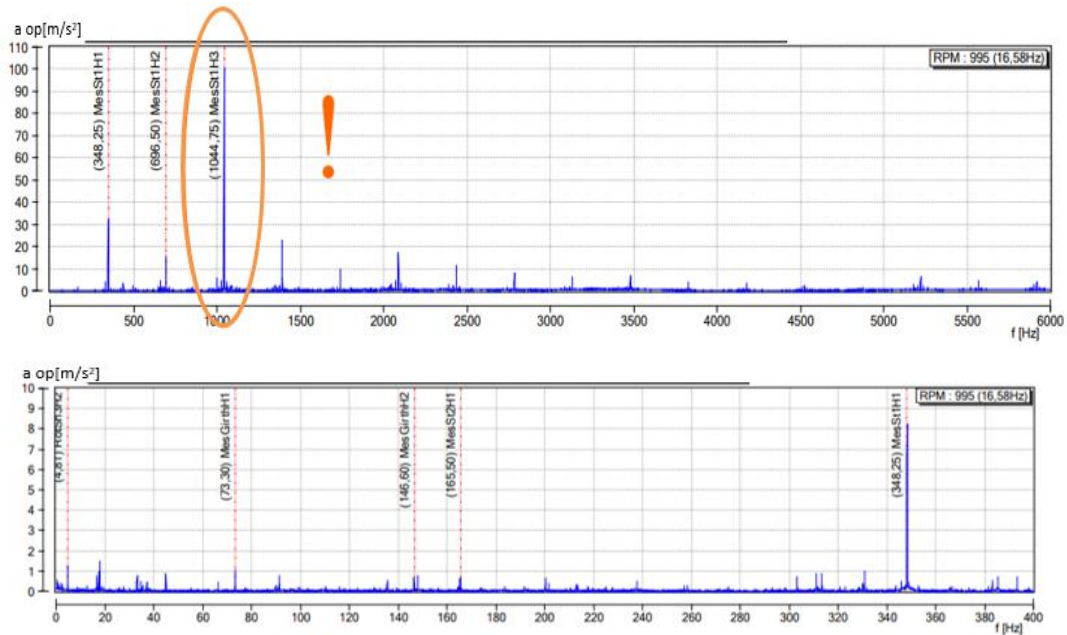


Fig 24. Spectres en accélération, arbre GV.

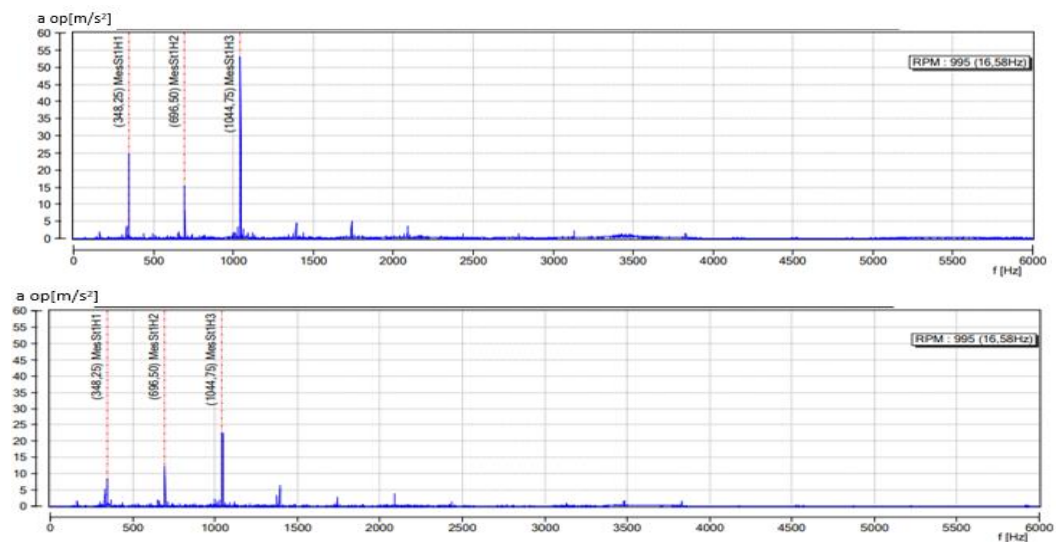


Fig 25. Spectres en accélération, arbre MV.

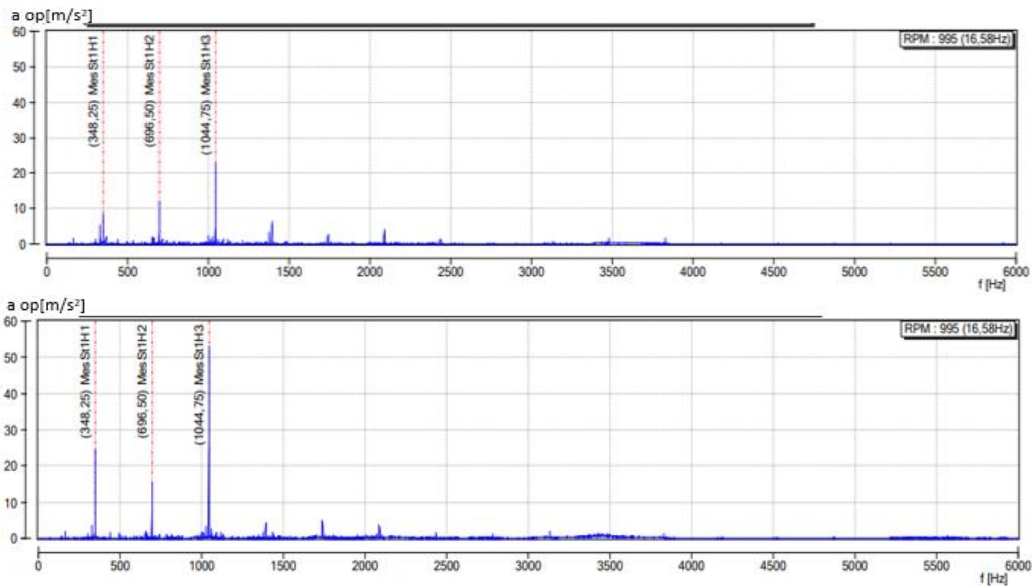


Fig 26. Spectres en accélération, arbre PV.

IV.3.5. Déplacement axial de l'arbre flottant

Fig.12 et Fig.13 représentent le signal et spectre déplacement respectivement axial de l'arbre flottant en fonction du temps et son spectre en FFT qui peuvent renseigner sur l'excentricité de la couronne dentée du broyeur. Le déplacement axial de l'arbre flottant (MV) est au maximum de 0,872 mm, valeur qui est bonne.

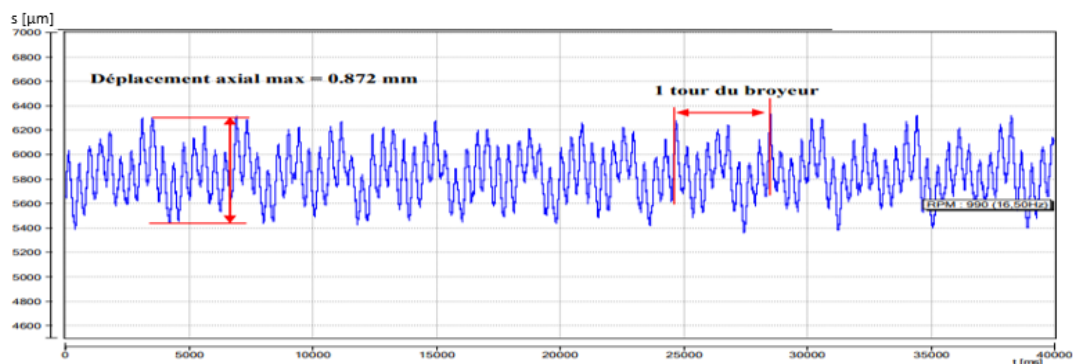


Fig 27. Déplacement axial de l'arbre flottant (arbre MV).

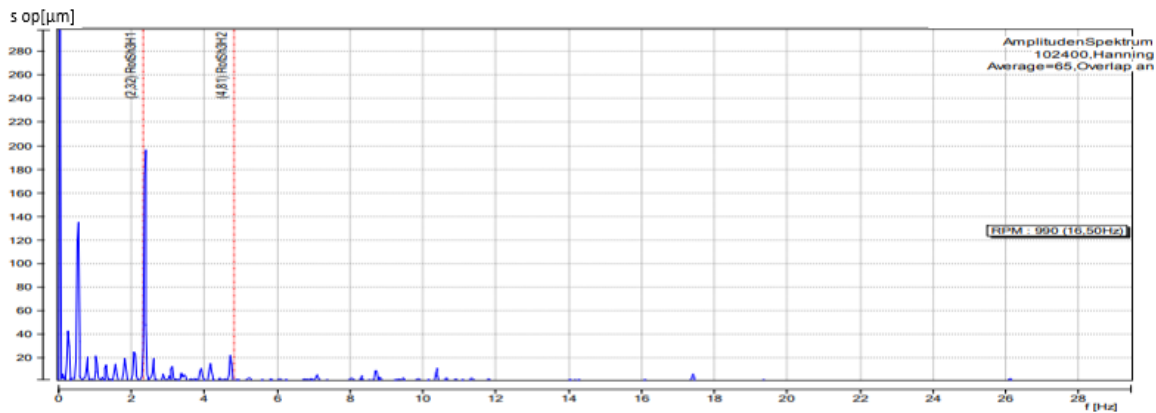


Fig 28. FFT of intermediate shaft axial déplacement.

IV.4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré qu'un diagnostic rugueux et correcte son augmente la durée de vie du matériel et démunie le coût d'intervention ou la panne. On propose alors l'utilisation de l'analyse d'enveloppe qui permet de découvrir l'état de la machine avant de prendre une décision d'intervention. Ce résultat découle de l'exploitation de données comme référence pratique, vu qu'avant l'intervention et après le changement inévitable, Les analyses vibratoires montrent une prédominance absolue de pics à 348 (Hz), la fréquence d'engrenage du couple d'attaque et ses multiples. Les amplitudes mesurées sont trop élevées et dépassent largement les valeurs habituelles pour des réducteurs de cette taille. L'installation est dans ce cas inapproprié pour un service continu. Ces hautes vibrations sont générées par une nette dégradation du comportement de l'engrènement du train d'attaque qui est causée par une contamination importante de l'huile du réducteur par le ciment présent en très grande quantité dans le bac du réducteur. Les fréquences d'engrenage des autres trains sont de faibles amplitudes. Après des analyses approfondies, des fréquences de défauts des engrenages n'ont pas pu être décelé, mais en vertu de la présence en quantité importante de ciment dans l'huile du réducteur une dégradation des engrenages est inévitable.

Deux avantages importants dans l'utilisation de cette analyse : d'une part, nous obtenons le calibre de l'état du réducteur en termes de vibration et, d'autre part, elle permet une réduction des pannes et évite les interventions inutiles en conséquence

Conclusion générale

Ce mémoire de master offre une analyse concise des techniques de surveillance et d'analyse des vibrations appliquées à la chaîne de broyage dans l'industrie des cimenteries, en mettant particulièrement l'accent sur les défauts d'engrenage. Les recherches menées à la cimenterie de Chlef (ECDE, groupe GICA) ont permis d'acquérir des informations précieuses sur les défis et les solutions liés à l'analyse des vibrations dans ce contexte spécifique.

Tout au long de cette étude, l'importance cruciale de la surveillance et de l'analyse des vibrations dans les installations de cimenterie a été mise en avant. Les motoréducteurs, largement utilisés pour le mouvement mécanique des broyeurs dans les cimenteries, sont soumis à des forces dynamiques et à des vibrations pouvant affecter négativement leurs performances et leur fiabilité. Il est donc essentiel de surveiller et d'analyser les vibrations des motoréducteurs pour détecter et résoudre les problèmes potentiels, en particulier les défauts d'engrenage qui sont une cause fréquente de défaillance des réducteurs.

L'étude a approfondi la compréhension des engrenages, incluant leur définition, leur fonctionnement et leur rôle dans les transmissions de vitesse des réducteurs. Les caractéristiques de fréquence des engrenages ainsi que les types courants de défauts rencontrés dans les environnements industriels ont été examinés. En outre, le diagnostic du motoréducteur de broyeur BK4, spécifiquement utilisé dans la cimenterie, a été réalisé grâce à l'application de techniques avancées d'analyse des vibrations telles que l'étude cinématique, l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale et l'analyse spectrale enveloppe.

Les conclusions de cette analyse ont permis de mettre en place des mesures correctives pour résoudre les problèmes identifiés et améliorer les vibrations des réducteurs ainsi que la gestion des huiles. Les résultats obtenus grâce à ces recherches apportent une compréhension approfondie de la surveillance et de l'analyse des vibrations des motoréducteurs dans les cimenteries, avec un accent particulier sur les défauts d'engrenage.

Les recommandations formulées dans cette étude sont essentielles pour renforcer la fiabilité et les performances des réducteurs dans ce contexte industriel spécifique. Il est vivement recommandé aux cimenteries et autres installations similaires de l'industrie cimentière d'instaurer des plans de prévention et des programmes réguliers de surveillance et d'analyse des vibrations pour leurs moteurs, broyeurs et réducteurs. Une surveillance continue des vibrations et une réactivité rapide face à tout problème potentiel peuvent considérablement améliorer l'efficacité opérationnelle de ces équipements critiques, contribuant ainsi à une production stable et à des économies de coûts significatives.

Références Bibliographiques

- [1] Boudinar. A.H, benouzza N, bendiabdellah. A, diagnostic des défauts de roulements d'un moteur asynchrone, 2015, Oran, Algeria.
- [2] Delaunay. T, Courtin. S, Durr. B, Le Clézio. E, Despaux. G, Analyse vibratoire : De l'identification d'un balourd à la classification des formes vibratoires de roulements et de moteurs, 2023, Montpellier, France.
- [3] Boukar. A, Hamzaoui. N, Evaluation des indicateurs de surveillance par analyse vibratoire : Application aux engrenages et roulements, International Journal of Innovation and Applied Studies, 2019, Lyon, France.
- [4] Anupam. K. A, Anand. P. A, Pavan K. K. A, Vibration based fault detection of polymer gear, Discipline of Mechanical Engineering, 2021, Indore, India.
- [5] Moreno haro. L. M, Tahan. A, Agardi .B, Aperçu des méthodes de prédiction de pannes, 2023, Montréal, Canada.
- [6] Felahi. S, Mohamedi. W, Order Analysis of a Vibration Signal of a Rotating Machine, Journal of Biosensors and Bioelectronics Research, 2024, Sousse, Tunisia.
- [7] Boukar. A, Hamzaoui. N. Evaluation Des Indicateurs de Surveillance Par Analyse Vibratoire : Application Aux Engrenages et Roulements International Journal of Innovation and Applied Studies, 2019.
- [8] Benchaabane. C, Djebala. A, Ouelaa. N, Guenfoud.S. Diagnostic Vibratoire des Défauts d'Engrenages Basé sur les Indicateurs Scalaires : Groupe Comportement Dynamique des Structures et Maintenance Industrielle, Université de Guelma, 2016.
- [9] Taleb. M, Boudiar. B, Zaghdani. E. Analyse des défauts du ventilateur Dk1 525 par l'application de la méthode de maintenance conditionnelle (cas de la mine de Djebel Onk), Meknès, MAROC, 2017.
- [10] Abou el anouar.B, Elamrani. M, Elkihel. B, Delaunois. F. Surveillance et détection des défauts d'engrenage par l'analyse vibratoire, 3ème colloque international sur le monitoring des systemes industriels, Fés maroc, 2016.
- [11] Ladaimia. B, Diagnostic des défauts d'engrenages par l'analyse vibratoire et calcul De la fiabilité d'un réducteur (SN-METAL.HB01) à FERROVIAL ANNABA, 2014.
<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/06/LADAIMIA-BILLEL.pdf>
- [12] BTS MI, Analyse vibratoire des machines tournantes, stratégie de maintenance, chapitre 24. file:///D:/Vibration/Analyse%20des%20Vibration.pdf
- [13] Godoy. E, Rosec. O, Chonavel. T, Estimation d'enveloppes spectrales contraintes temporellement pour la conversion de voix. JEP 2010 : XXVIIIe journées d'étude sur la parole, May 2010, Mons, France. fahal-00488711f.