

Faculté des Sciences Appliquées



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

Dahmane **BAGHDALI**

Et

Aymene **OUAKLI**

Thème

**Analyse vibratoire du système broyeur de clinker
en vue de diagnostiquer les défaut**

Devant le Jury composé de :

Mr: A. BOUHEDDA

M.A.A

Univ. Bouira

Présidente

Mme : N. YASSA

M.C.A

Univ. Bouira

Examineur

Mr : A. BOUZIDA

Prof.

Univ. Bouira

Encadrant

Année Universitaire

2025-2026

Remerciement

En premier lieu, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent au président du jury, **M. Ali BOUHEDDA**, ainsi qu'à l'examinatrice, **Mme Nacera YASSA**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre promoteur, **M. Lehcene BOUZIDA**, pour son encadrement, ses précieux conseils, sa disponibilité et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à **M. NABI YOUNES**, spécialiste en maintenance conditionnelle, pour son aide précieuse, ses conseils techniques et son accompagnement durant la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre vive reconnaissance à l'ensemble du personnel de la cimenterie pour son accueil, sa collaboration et son soutien.

Un grand merci à nos parents pour leurs sacrifices, leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de notre parcours.

Enfin, nos remerciements les plus sincères vont à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Introduction général:.....	1
CHAPITRE I : Procédé de production du ciment	
I-1 Introduction	2
I-2. Procédé de production du ciment	2
I-2.1. Production de la matière première	2
I-2.2 transport et dosage des matières premières.....	3
I-2.3. Broyage du mélange cru en circuit fermé avec séparateur dynamique.....	3
I-2.4. Transport de la farine crue vers les silos d'homogénéisation.....	4
I-2.5. Extraction de la farine crue et alimentation du four.....	5
I-2.6. Tour de préchauffage et cuisson dans le four (Clinkérisation)	6
I-2.7. Zone de la tuyère et combustion dans le four rotatif	7
I-2.8. Système de traitement et dépoussiérage des gaz du four	8
I-2.9. Transport et stockage du clinker après refroidissement	9
I-2.10. Dosage des constituants ciment et alimentation du broyeur refroidissement	10
I-2.11. Broyage ciment et séparation granulométrique	11
I-2.12. Transport et stockage du ciment fini dans les silos	12
I-3. Conclusion	13
CHAPITRE II : Procédé de production	
II-1 Introduction	14
II-2. Description du système d'entraînement (Chaîne cinématique)	14
II-2.1. Démarreur progressif à résistance liquide (Série AK-EP)	14
II-2.2. Moteur électrique à induction à bagues (Ligne M - WEG)	17
II-2.3. Réducteur de vitesse central (Type SYMETRO - FLS)	22
II-2.4. Broyeur à boulets (Type UNIDAN - FLS)	26
II-3. Principes de l'analyse vibratoire	26
II-3.1. Concepts de base (Amplitude, Fréquence, Phase)	27
II-3.2. Analyse spectrale (FFT) et enveloppe	27
II-4. Fréquences caractéristiques des défauts.....	28
II-4.1. Fréquence de désalignement et de balourd	28
II-4.2. Fréquence d'engrènement (Gear Mesh Frequency - GMF)	30

II-4.3. Fréquence de défaut d'engrènement (GMF)	31
II-4.4. Harmoniques et bandes latérales (Sidebands).....	33
II-4.5. Fréquences des défauts des roulements	33
II-4.6. Fréquences des défauts électromagnétiques	34
II-5. Conclusion	35
CHAPITRE III : Simulation, modélisation et analyse des résultats	
III-1. Introduction	36
III-2. Modélisation numérique sous KISSsoft	36
III-2.1. Définition de logiciel KISSsoft	36
III-2.2. Définition des paramètres géométriques	37
III-2.3. Simulation des fréquences d'engrènement.....	44
III-3. Conclusion	47
CHAPITRE IV : Expérimentations et collecte des données sur site	
IV-1. Introduction	48
IV-2. Instrumentation et chaîne de mesure	48
IV-2.1. Présentation du Collecteur-analyseur.....	48
IV-2.2. Capteur de Vibration – Accéléromètre 100 mV/g	49
IV-2.3. Logiciel d'analyse : System 1 (Bently Nevada)	51
IV-3. Protocole de mesure sur le réducteur SYMETRO	53
IV-3.1. Identification des points de mesure (Paliers GV et MV)	53
IV-3.2. Directions de mesure (Radiale, Axiale)	55
IV-4. Analyse des Données de la Machine.....	56
IV-5. Conclusion	73
Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application	
V-1. Introduction	74
V-2. Procédure de Traitement des Données.....	74
V-3. Synthèse Globale des Résultats.....	74
V-4. Conclusion.....	84
Conclusion Générale	85

Bibliographie	86
---------------------	----

Liste des Figures

Figure I.1 — Extraction, concassage et stockage des matières premières	p.2
Figure I.2 — Reprise, transport et dosage des matières premières	p.3
Figure I.3 — Broyage du mélange cru en circuit fermé avec séparateur dynamique	p.4
Figure I.4 — Transport de la farine crue vers les silos d'homogénéisation	p.5
Figure I.5 — Extraction de la farine crue et alimentation du four	p.6
Figure I.6 — Tour de préchauffage et cuisson dans le four (Clinkérisation)	p.7
Figure I.7 — Zone de la tuyère et combustion dans le four rotatif	p.8
Figure I.8 — Système de traitement et dépoussiérage des gaz du four	p.9
Figure I.9 — Transport et stockage du clinker après refroidissement	p.10
Figure I.10 — Dosage des constituants ciments et alimentation du broyeur	p.11
Figure I.11 — Broyage ciment et séparation granulométrique	p.12
Figure I.12 — Transport et stockage du ciment fini dans les silos	p.13
Figure II.1 — Vue d'ensemble du démarreur liquide à électrodes AK-EP	p.15
Figure II.2 — Composantes électroniques et électromagnétiques.....	p.16
Figure II.3 — Paramétrage technique du démarreur liquide (données du site)	p.17
Figure II.4 — Principe de fonctionnement du démarreur liquide AK-EP	p.18
Figure II.5 — Moteur à induction triphasé à rotor bobiné WEG (Ligne M)	p.22
Figure II.6 — Nomenclature des composantes.....	p.24
Figure II.7 — Arbre de torsion (Torsion Shaft) du réducteur SYMETRO	p.24
Figure II.8 — Pignon haute vitesse (HS) du réducteur SYMETRO	p.24
Figure II.9 — Système d'équilibrage et division de puissance du réducteur SYMETRO	p.25
Figure II.10 — Arbres intermédiaires du réducteur SYMETRO	p.25
Figure II.11 — Vireur (Auxiliary Drive) du réducteur SYMETRO	p.26
Figure II.12 — Unité de refroidissement huile/eau du réducteur SYMETRO	p.26
Figure II.13 — Instrumentation du réducteur SYMETRO (sondes de température Pt100)	p.26
Figure II.14 — Broyeur à boulets UNIDAN FLS – vue d'ensemble et constitution	p.26
Figure II.15 — Désalignement parallèle entre deux arbres couplés	p.30

Figure II.16 — Désalignement angulaire entre deux arbres couplés	p.30
Figure II.17 — Désalignement angulaire et parallèle combiné	p.30
Figure II.18 — Balourd statique sur un rotor	p.31
Figure II.19 — Balourd de couple sur un rotor	p.31
Figure II.20 — Balourd dynamique sur un rotor	p.31
Figure II.21 — Signature spectrale caractéristique d'un balourd (pic à 1x RPM)	p.32
Figure II.22 — Schéma d'un train d'engrenages et rapport des vitesses	p.32
Figure II.23 — Spectre vibratoire d'une usure généralisée de denture (peigne harmonique).....	p.33
Figure II.24 — Spectre vibratoire d'une dent détériorée sur un pignon	p. 33
Figure II.25 — Fréquences caractéristiques des défauts de roulements (BPFO, BPFI, BSF, FTF)	p.35
Figure II.26 — Signature spectrale d'un défaut électromagnétique du moteur	p. 35
Figure III.1 — Interface du logiciel KISSsoft pour la simulation des engrenages	p. 36
Figure III.2 — Paramètres géométriques des engrenages hélicoïdaux du réducteur SYMETRO	p. 37
Figure III.3 — Simulation de l'étage petite vitesse (PV) sous KISSsoft	p. 39
Figure III.4 — Fréquences caractéristiques du roulement PAL 3 (23248 C) – Arbre rapide	p.42
Figure III.5 — Fréquences caractéristiques des roulements PAL 5 et 7 (23160 CA)	p.43
Figure III.6 — Résultats KISSsoft des fréquences des roulements PAL 5 et 7 (vue complémentaire)...p.43	
Figure III.7 — Fréquences caractéristiques des roulements PAL 6 et 8 (23168 CA)	p.44
Figure III.8 — Simulation KISSsoft : fréquence d'engrènement de l'étage GV (363 Hz).....	p.45
Figure III.9 — Résultats KISSsoft de l'étage grande vitesse (GV) – vue détaillée.....	p.45
Figure III.10 — Simulation KISSsoft : fréquence d'engrènement de l'étage PV (49,14 Hz)	p.46
Figure III.11 — Résultats KISSsoft de l'étage petite vitesse (PV) – vue détaillée	p.47
Figure IV.1 — Collecteur-analyseur portable de vibrations VB8 (Commtest)	p.48
Figure IV.2 — Chaîne de mesure vibratoire avec le VB8 et l'accéléromètre	p.50
Figure IV.3 — Accéléromètre piézoélectrique 100 mV/g – caractéristiques et montage	p.51
Figure IV.4 — Interface du logiciel de surveillance System 1 (Bently Nevada)	p.51
Figure IV.5 — Schéma cinématique de la chaîne d'entraînement et points de mesure (01 à 07)	p.53
Figure IV.6 — Points de mesure sur la chaîne cinématique (Paliers GV, MV et BV)	p.54
Figure IV.7 — Signal temporel du palier P2-A (Moteur – direction axiale)	p.60
Figure IV.8 — Spectre FFT du palier P2-A révélant le défaut électrique à 100 Hz (2×Fline)	p.61

Figure IV.9 — Signal temporel du palier P3-H (Réducteur SYMETRO – arbre rapide)	p.62
Figure IV.10 — Spectre FFT du palier P3 avec fréquence d’engrènement GV (GMF = 363,75 Hz) ...	p.63
Figure IV.11 — Signal temporel du palier P4 (Arbre intermédiaire – 70 RPM)	p.64
Figure IV.12 — Spectre FFT du palier P4 avec harmoniques GMF et bandes latérales	p.65
Figure IV.13 — Signal temporel du palier P5-H avec impacts cycliques identifiés	p.67
Figure IV.14 — Spectre FFT du palier P5 avec zone de chocs et bandes latérales (sidebands)	p.68
Figure IV.15 — Photo du volant d’équilibrage (côté moteur) – dents fissurées.....	p.72
Figure IV.16 — Photo du volant d’équilibrage (côté broyeur) – dents endommagées	p.72
Figure V.1 — Interface de l’application IA – Analyse vibratoire du palier P1 (Moteur).....	p.74
Figure V.2 — Résultats du diagnostic intelligent pour le palier P1 (Moteur)	p.75
Figure V.3 — Interface de l’application IA – Analyse vibratoire des paliers du réducteur	p.77
Figure V.4 — Résultats du diagnostic intelligent pour le palier P4 (Réducteur)	p.78
Figure V.5 — Résultats du diagnostic intelligent pour les paliers P5 à P7 (Réducteur).....	p.78

Liste des Tableaux

Tableau II.1 — Caractéristiques générales du moteur WEG (Ligne M, 3520 kW)	p.20
Tableau II.2 — Conditions de fonctionnement du moteur WEG	p.21
Tableau II.3 — Paramètres de démarrage et charge du moteur WEG	p.21
Tableau II.4 — Performances du moteur WEG (rendement et facteur de puissance)	p.21
Tableau II.5 — Couple, courant et vitesse du moteur WEG (données complètes)	p.22
Tableau II.6— Synthèse des outils d’analyse vibratoire	p.29
Tableau II.7 — Tableau récapitulatif des fréquences caractéristiques pour le diagnostic vibratoire.....	p.34
Tableau II.8 — Tableau récapitulatif des fréquences caractéristiques pour le diagnostic vibratoire.....	p.36
Tableau III.1 — Fréquences caractéristiques de l’étage grande vitesse (GV)	p.37
Tableau III.2 — Limites des fréquences latérales de l’étage grande vitesse (GV)	p. 38
Tableau III.3 — Harmoniques de la fréquence d’engrènement de l’étage grande vitesse (GV)	p. 38
Tableau III.4 — Dimensions caractéristiques des engrenages de l’étage grande vitesse (GV).....	p.39
Tableau III.5 — Fréquences caractéristiques de l’étage petite vitesse (PV)	p.40
Tableau III.6 — Fréquences d’engrènement aux harmoniques de l’étage petite vitesse (PV)	p.40

Tableau III.7 — Dimensions caractéristiques des engrenages de l'étage petite vitesse (PV)	p.41
Tableau III.8 — Synthèse des fréquences d'engrènement par étage du réducteur SYMETRO	p.47
Tableau IV.1 — Tableau récapitulatif des mesures de vibration globale (mm/s RMS et g RMS).....	p.56
Tableau IV.2 — Synthèse et diagnostic final par composant (Moteur / Réducteur SYMETRO).....	p.58
Tableau IV.3 — Comparaison des spectres vibratoires du palier N°5 (état sain vs état défaillant)	p.71

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie cimentière figure parmi les secteurs industriels les plus exigeants en raison de la continuité de la production et des conditions sévères de fonctionnement. Dans ce contexte, le broyeur à boulets UNIDAN et le réducteur central SYMETRO constituent des équipements stratégiques dont la fiabilité est essentielle pour assurer la disponibilité de l'installation. Afin de prévenir les défaillances et d'optimiser la maintenance, l'analyse vibratoire représente un outil efficace pour la détection précoce des anomalies mécaniques.

- L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de diagnostiquer l'état vibratoire du réducteur central SYMETRO en s'appuyant sur la modélisation numérique, la simulation et l'analyse des mesures réelles. Pour atteindre cet objectif, le mémoire est structuré en cinq chapitres :
- Le chapitre 1 présente le processus de fabrication du ciment et les principales étapes de production.
- Le chapitre 2 expose les notions fondamentales de l'analyse vibratoire ainsi qu'une description de la chaîne cinématique étudiée et des fréquences caractéristiques des défauts.
- Le chapitre 3 est consacré à la modélisation et à la simulation du réducteur sous KISSsoft afin de déterminer les fréquences théoriques d'engrènement.
- Le chapitre 4 traite de la partie expérimentale, incluant l'instrumentation, les mesures vibratoires et l'analyse des données acquises sur System 1.
- Le chapitre 5 présente l'application développée pour le calcul automatique des fréquences caractéristiques des roulements et des engrenages, ainsi que la validation de ses résultats.
- Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus et propose des recommandations pour l'amélioration de la maintenance prédictive au sein de l'usine.

1. Introduction.

L'industrie du ciment occupe une place stratégique et fondamentale dans l'économie mondiale moderne. Considéré comme le « pain de la construction », le ciment est le composant essentiel du béton, le matériau le plus utilisé au monde après l'eau. Cette industrie ne se contente pas de produire un liant hydraulique ; elle représente le socle sur lequel reposent les infrastructures vitales de nos sociétés : des logements aux barrages, en passant par les ponts, les ports et les routes. À travers un processus de transformation complexe impliquant la décarbonatation du calcaire à haute température, la production de ciment est devenue un indicateur clé de la croissance économique et du dynamisme industriel d'un pays.

2. Procédé de production du ciment

2.1 Production de la matière première



Figure I.1 : Extraction, concassage des matières premières

Extraction, concassage et stockage des matières premières

Le calcaire et l'argile sont extraits de la carrière par forage et tirs de mines avec explosifs. Les matériaux abattus sont chargés par pelles mécaniques ou chargeuses, puis transportés par camions vers une trémie d'alimentation qui régule le débit vers le concasseur.

Le concassage primaire, effectué par un concasseur (à mâchoires ou à marteaux), réduit la taille des blocs rocheux afin de faciliter leur manutention et leur traitement ultérieur. Un alimentateur (tablier ou vibrant) assure un débit régulier vers le concasseur.

Après concassage, les matériaux sont acheminés par convoyeurs à bande vers les étapes suivantes. Des aimants et détecteurs de métaux sont parfois installés pour protéger les équipements contre les corps étrangers métalliques. Durant le transport, des filtres à manches captent les poussières pour réduire les émissions et limiter les pertes de matière.

Les matériaux concassés sont ensuite stockés séparément (calcaire et argile) en tas distincts. Un empileur (stacker) les dispose en couches successives afin d'assurer une pré-homogénéisation. Ce stockage permet d'assurer une alimentation continue de l'usine, d'améliorer l'homogénéité chimique du mélange destiné à la fabrication du clinker, et de compenser les variations naturelles de composition du gisement [1].

2.2 Transport des matières premières



Figure I.2 : Reprise, transport et dosage des matières premières

Reprise, transport et dosage des matières premières

Après la phase de stockage, les matières premières (calcaire, argile, sable et minerais de fer) sont reprises à l'aide d'un pont grappeur se déplaçant longitudinalement sur les tas. Il assure une extraction continue tout en améliorant l'homogénéisation par mélange des couches déposées lors du stockage.

Chapitre I : Procédé de production

Sous ces trémies, des extracteurs-doseurs assurent une alimentation régulière et contrôlée vers le broyeur cru. Le débit de chaque matière est ajusté avec précision afin de respecter les proportions chimiques nécessaires à la composition du mélange cru.

Ce système de reprise, transport et dosage garantit une alimentation continue et stable du procédé, assure une bonne homogénéité du mélange cru et permet un contrôle précis des quantités de chaque constituant introduit dans le broyeur [1].

2.3 Broyage du mélange cru dans le broyeur après extraction des trémies

Description du procédé :

Après le dosage des matières premières (calcaire, argile, sable et minerai de fer), le mélange est envoyé vers le broyeur cru (Broyeur R1) pour être transformé en farine crue. Les doseurs situés sous les trémies assurent une alimentation précise et conforme à la composition chimique requise.

Le mélange est broyé dans un broyeur horizontal à boulets contenant des corps broyants en acier. La rotation du broyeur provoque des chocs et de l'attrition qui réduisent progressivement la taille des particules jusqu'à obtenir une poudre fine.

Des gaz chauds issus du four ou d'un générateur traversent le broyeur en parallèle du broyage. Ils assurent le séchage des matières humides (notamment l'argile), tout en améliorant l'efficacité du broyage et le transport pneumatique des particules. À la sortie, le mélange air-matière est dirigé vers un séparateur dynamique qui réalise une classification granulométrique. Les particules fines constituent la farine crue et sont envoyées vers les silos de stockage, tandis que les particules grossières sont renvoyées au broyeur pour un nouveau cycle. Ce fonctionnement en circuit fermé garantit une finesse constante du produit [1].

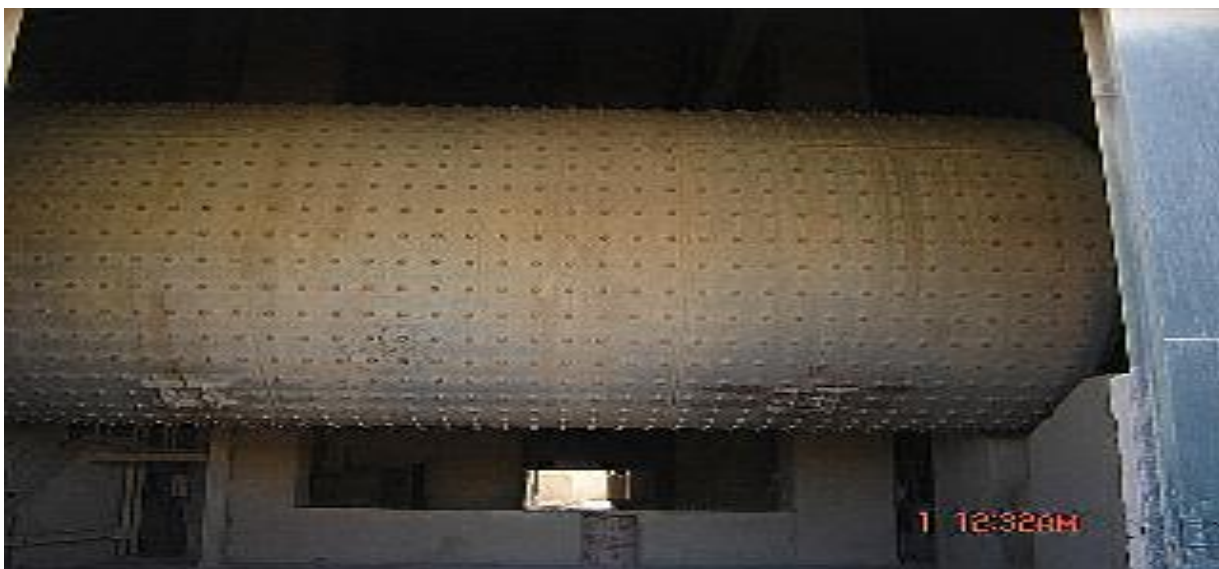


Figure I.3 : Broyage du mélange cru en circuit fermé avec séparateur dynamique

Chapitre I : Procédé de production

Le processus dépend de plusieurs paramètres de contrôle : débit d'alimentation, température des gaz de séchage, pression dans le broyeur, vitesse du séparateur et finesse de sortie. L'objectif du broyage cru est d'obtenir une farine homogène et suffisamment fine afin d'assurer une cuisson efficace et une qualité constante du clinker dans le four [1].

2.4 Transport de la farine crue vers les silos d'homogénéisation



Figure I.4 : Transport de la farine crue vers les silos d'homogénéisation

Description du procédé :

Après le broyage, la farine crue est acheminée vers les silos d'homogénéisation (H1) afin d'assurer une composition chimique uniforme avant son alimentation du four. À la sortie du broyeur et du séparateur, la farine entraînée par un flux d'air est récupérée par des cyclones ou des filtres, puis dirigée vers les systèmes de transport [1].

Le transfert s'effectue généralement par aéroglisteurs, élévateurs ou transport pneumatique, utilisant l'air de fluidisation pour déplacer la poudre de manière continue et régulière vers les zones de stockage.

Des clapets et systèmes de distribution orientent ensuite la farine vers les silos d'homogénéisation (ex. H1-01 ou H1-02) selon les besoins d'exploitation, assurant un remplissage équilibré et une continuité de production. La farine est introduite par le haut des silos et son niveau est surveillé en permanence pour contrôler les stocks.

À l'intérieur des silos, un système de fluidisation injecte de l'air à la base de la farine, provoquant un brassage interne qui mélange les couches et réduit les variations de composition chimique. Cette homogénéisation permet d'obtenir une farine crue de qualité constante.

Chapitre I : Procédé de production

Cette étape est essentielle pour garantir une homogénéité chimique optimale, stabiliser l'alimentation du four et éviter les perturbations de cuisson pouvant affecter la qualité du clinker [1].

2.5 Extraction de la farine crue et alimentation du four



. **Figure I.5** : Extraction de la farine crue et alimentation du four

Description du procédé :

Après l'homogénéisation dans les silos (H1), la farine crue est extraite de manière contrôlée depuis les silos H1H01 et H1H02 afin d'être acheminée vers le four rotatif pour la cuisson et la formation du clinker.

L'extraction est réalisée à l'aide de systèmes de fluidisation (aérogliissières) et de dispositifs de vidange multiples, permettant de préserver l'homogénéité de la farine tout en assurant un flux continu.

Une fois extraite, la matière est transportée vers la tour d'alimentation à travers des aérogliissières et un élévateur (U17). Ce transport est maintenu de manière régulière afin d'éviter toute variation de débit susceptible de perturber le fonctionnement du four [1].

Chapitre I : Procédé de production

Avant l'entrée dans le four, la farine crue passe par une trémie de pesage de type Schenck. Cette installation permet de mesurer précisément le débit massique (t/h) et d'assurer un dosage contrôlé de la matière alimentant le four.

Un système de régulation automatique ajuste en permanence la vitesse d'extraction ainsi que le débit d'alimentation en fonction des consignes de production. Cette régulation garantit une alimentation stable et continue du four rotatif [1].

2.6 Tour de préchauffage et cuisson dans le four (Clinkérisation)

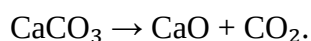


Figure I.6 : Tour de préchauffage et cuisson dans le four

Description du procédé :

Après l'alimentation du cru, la farine crue est introduite dans la tour de préchauffage puis dans le four rotatif, où elle subit des transformations thermiques qui la convertissent en clinker.

Dans la tour de préchauffage, composée de plusieurs cyclones, la farine descend par gravité tandis que les gaz chauds du four remontent en contre-courant, assurant un échange thermique très efficace. La matière y est séchée, préchauffée jusqu'à environ 800°C et commence sa décarbonatation selon la réaction :



Cette réaction est déjà largement avancée avant l'entrée dans le four, avec un taux de calcination pouvant atteindre 90 à 95 %.

La matière partiellement décarbonatée entre ensuite dans le four rotatif incliné, où la température monte progressivement jusqu'à environ 1450°C. Le four comporte plusieurs zones : séchage,

Chapitre I : Procédé de production

calcination et cuisson. Dans la zone de flamme se forment les phases principales du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Sous l'effet de la forte température, la matière entre partiellement en fusion et forme des nodules de clinker.

À la sortie du four, le clinker, encore très chaud (environ 1200°C), est dirigé vers un refroidisseur où il est rapidement refroidi afin de stabiliser sa structure et de récupérer une partie de l'énergie thermique.

Le clinker refroidi est ensuite concassé pour réduire la taille des nodules, facilitant son transport, son stockage et son broyage ultérieur. Il est ensuite acheminé par convoyeurs et élévateurs vers des silos ou des halls de stockage [1].

2.7 Zone de la tuyère (brûleur) et combustion dans le four.

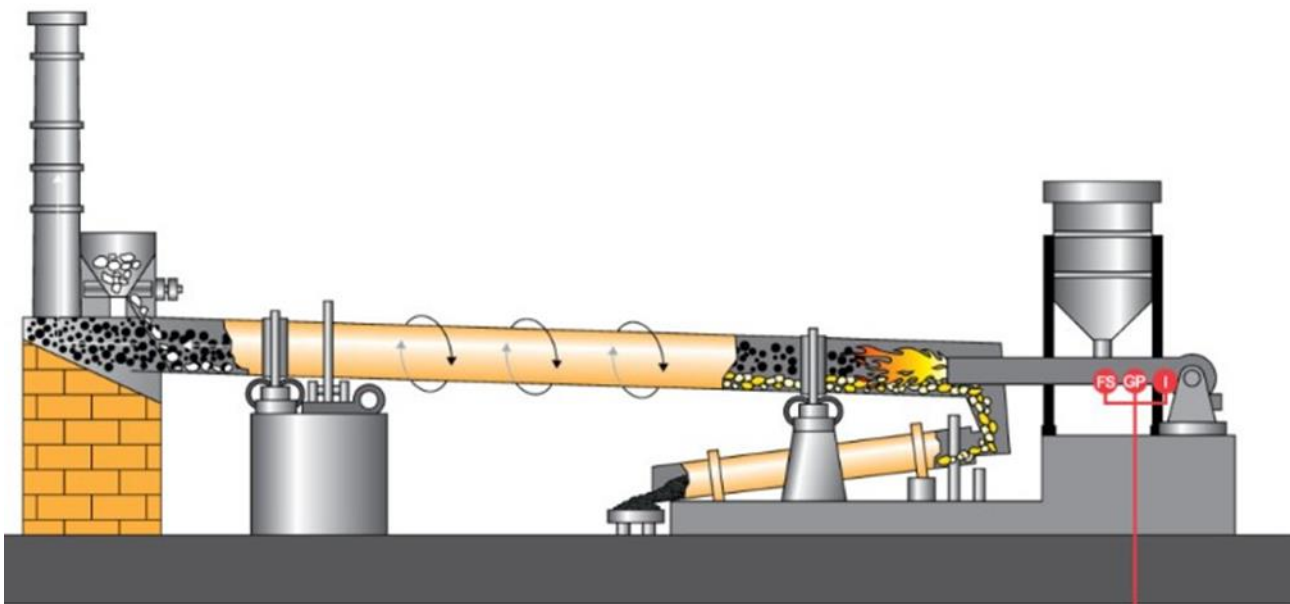


Figure I.7 : Zone de la tuyère et combustion dans le four rotatif

Description du procédé :

Cette étape correspond à la zone de la tuyère du four rotatif, où a lieu la combustion du combustible gazeux produisant la flamme nécessaire à la cuisson du clinker.

Le gaz combustible est fourni par la station principale de gaz. Son débit et sa pression sont régulés avec précision à l'aide de vannes de contrôle et de dispositifs de sécurité afin d'assurer une combustion stable et sûre.

La combustion nécessite un apport en air assuré par deux sources : l'air primaire, injecté au niveau du brûleur via le ventilateur principal, et l'air secondaire, provenant du refroidisseur de clinker. Ces deux flux permettent une combustion complète et efficace du gaz.

Chapitre I : Procédé de production

Le mélange gaz-air est injecté dans la tuyère où il s'enflamme, formant une flamme pouvant atteindre environ 2000°C. À l'intérieur du four, la température de la matière atteint environ 1450°C, conditions nécessaires aux réactions de clinkérisation.

Cette zone est la plus critique du four, car elle permet la fusion partielle de la matière et la formation des principaux minéraux du clinker (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF).

La tuyère est protégée contre les températures élevées par un système de refroidissement utilisant de l'air et parfois de l'eau selon la conception de l'installation [1].

2.8 Traitement et transport des poussières (dépoussiérage des gaz du four)



Figure I.8 : Système de traitement et dépoussiérage des gaz du four

Description du procédé :

Cette étape concerne la collecte, la filtration et le recyclage des poussières contenues dans les gaz chauds provenant du four rotatif et de la tour de préchauffage. Elle est essentielle pour la protection de l'environnement, la récupération de matière et la stabilité du procédé.

Les gaz issus du four et des cyclones, chargés en poussières fines de cru ainsi qu'en gaz (CO_2 , O_2), sont dirigés vers des filtres à manches pour traitement.

Dans ces filtres, les particules solides sont retenues à la surface des manches filtrantes, tandis que l'air épuré est évacué vers la cheminée. Les manches se chargent progressivement en poussières puis sont nettoyées par des impulsions d'air comprimé (pulse jet), qui décrochent les particules accumulées et les font tomber dans les trémies de collecte.

Les poussières récupérées peuvent être réintroduites dans le circuit de cru ou envoyées vers un stockage spécifique selon leur composition, ce qui permet de limiter les pertes de matière et d'améliorer le rendement global du procédé [1].

Chapitre I : Procédé de production

Le transport des poussières est assuré par des vis sans fin, aéroglissières ou convoyeurs, avec un acheminement vers l'élévateur (U17) ou vers les silos de retour.

Après filtration, les gaz propres sont rejetés par la cheminée en respectant les normes environnementales, notamment les limites de concentration en poussières.

Le fonctionnement du système est suivi par plusieurs paramètres : pression différentielle du filtre (ΔP), température et débit des gaz, efficacité des cycles de nettoyage et taux de poussières en sortie.

L'objectif principal est de réduire les émissions, récupérer la matière valorisable, protéger les équipements et garantir un tirage stable du four rotatif [1].

2.9 Transport et stockage du clinker



Figure I.9 : Transport et stockage du clinker après refroidissement

Description du procédé :

Cette étape concerne la reprise du clinker depuis les silos de stockage (U1L01, U1L02 et U1L03) et son acheminement vers les installations de broyage ciment [1].

L'extraction du clinker est réalisée à partir des silos à l'aide d'extracteurs situés sous les silos et de vannes de régulation. Ce système permet une reprise contrôlée et assure une alimentation continue des lignes de production.

Les flux de clinker provenant des différents silos sont ensuite regroupés sur des convoyeurs communs, ce qui offre une grande flexibilité d'exploitation et permet une meilleure gestion des niveaux de stock. Le transport du clinker est assuré par des convoyeurs à bande ainsi que des élévateurs à godets pour les transferts verticaux. Ces équipements sont conçus pour résister à l'abrasion du clinker et supporter des débits importants de matière.

Chapitre I : Procédé de production

Le clinker est ensuite dirigé vers les trémies d'alimentation des broyeurs ciment, avec la possibilité de répartir le flux vers plusieurs lignes de broyage selon les besoins de production.

Avant le broyage, le clinker est mélangé avec d'autres constituants tels que le gypse, qui régule le temps de prise du ciment, ainsi que différents ajouts comme le calcaire ou la pouzzolane selon le type de ciment produit.

L'objectif principal est d'assurer une alimentation régulière et stable des broyeurs ciment, d'optimiser la gestion des stocks de clinker, de garantir la continuité de production et d'éviter les blocages ou surcharges dans le système de transport [1].

2.10 Dosage des constituants ciment (Clinker, gypse et ajouts) – Alimentation du broyeur ciment

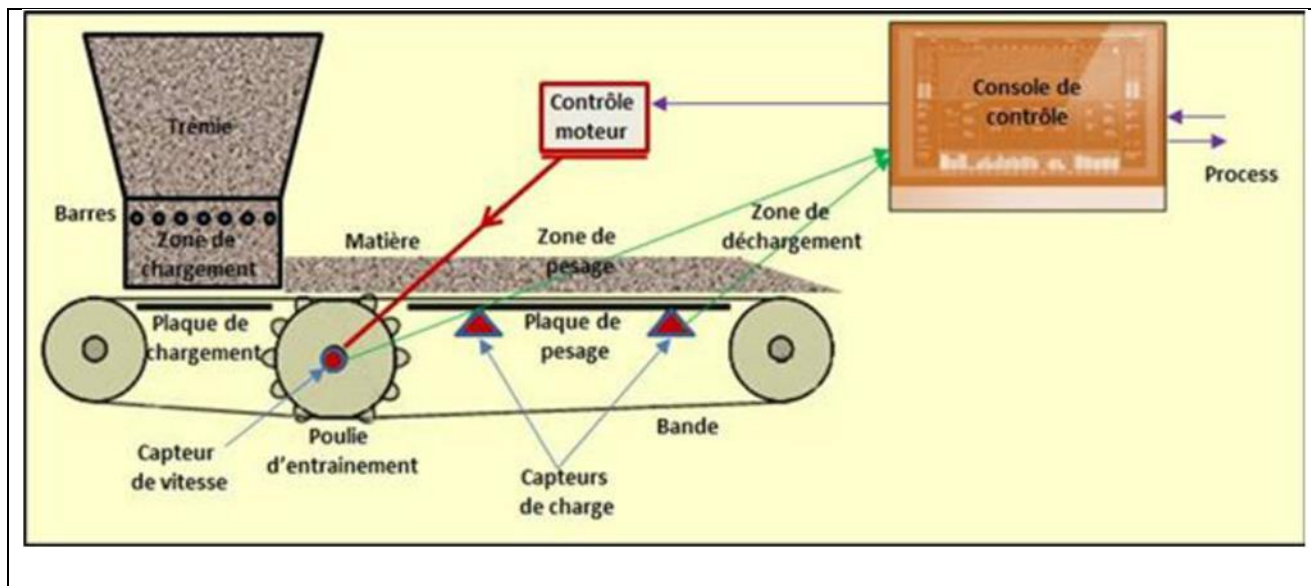


Figure I.10 : Dosage du constituant ciment et alimentation du broyeur

Description du procédé :

Cette étape correspond au dosage précis des différents constituants avant leur introduction dans le broyeur ciment. Le mélange est composé principalement de clinker, de gypse et d'ajouts tels que le calcaire ou la pouzzolane. L'objectif est d'obtenir la composition chimique et les propriétés finales souhaitées pour le ciment.

Les matières premières sont stockées dans différents silos : Z1L01 et Z1L02 pour le clinker, Z1L03 pour le gypse et Z1L04 pour les additifs. Chaque silo est équipé de systèmes d'extraction et de doseurs (bandes peseuses ou doseurs pondéraux) permettant un contrôle précis du débit de chaque matériau.

Le dosage est réalisé selon une recette prédéfinie, où chaque constituant possède une proportion spécifique. À titre indicatif, le clinker représente environ 70 à 80 %, le gypse 3 à 5 %, tandis que les

Chapitre I : Procédé de production

ajouts varient selon le type de ciment produit. Le système ajuste automatiquement les débits afin de respecter ces consignes. Une boucle de régulation assure le contrôle du procédé en comparant la consigne (SP) et la valeur réelle (PV). Elle permet de maintenir un débit total stable ainsi que les bonnes proportions entre les différents constituants, avec un débit global pouvant atteindre environ 1150 t/h selon la production [1].

Une fois dosés, les matériaux sont regroupés sur un convoyeur commun et acheminés vers le broyeur ciment. Ce dosage est une étape essentielle car il influence directement les propriétés finales du ciment, notamment sa résistance mécanique, son temps de prise et sa qualité globale.

2.11 Broyage ciment et séparation



Figure I.11 : Broyage ciment et séparation granulométrique

Description du procédé :

Après le dosage des matières (clinker, gypse et ajouts), le mélange est acheminé vers le broyeur ciment (Z1) afin d'être transformé en ciment fini présentant une finesse contrôlée.

L'alimentation du broyeur se fait via un convoyeur, avec un débit soigneusement régulé en tonnes par heure selon les besoins de production. Le mélange entre dans un broyeur à boulets contenant des corps broyants en acier, où il subit des effets combinés d'impact et d'attrition, permettant sa transformation progressive en poudre fine.

Un système de ventilation avec injection d'air est utilisé pour assurer le transport de la matière à l'intérieur du circuit, stabiliser la température et éviter les phénomènes de surchauffe ou de fausse prise du ciment.

Chapitre I : Procédé de production

Le produit broyé est ensuite dirigé vers un séparateur dynamique. Celui-ci réalise une classification granulométrique : les particules fines constituent le ciment fini, tandis que les particules grossières sont renvoyées vers le broyeur pour un nouveau cycle de broyage. La vitesse du séparateur est un paramètre clé influençant directement la finesse du produit.

Le ciment obtenu est récupéré via des filtres à manches afin d'éviter les pertes de matière et de limiter les émissions de poussières. Il est ensuite transporté vers les silos de stockage ciment à l'aide d'aéroglossières et d'élévateurs.

Ce système fonctionne en circuit fermé, avec recirculation des particules grossières vers le broyeur, ce qui permet d'atteindre la finesse exigée [1].

2.12 Transport vers les silos Z1 – Z2 (Stockage du ciment)

La dernière étape du procédé de fabrication du ciment concerne le transport, le stockage et la préparation du produit fini pour l'expédition.

Le ciment est acheminé depuis le broyeur vers les silos de stockage à l'aide de pompes à vis, des lignes de transport Z1 et Z2, ainsi que de compresseurs d'air assurant une pression contrôlée. Ce système de transport pneumatique permet de transférer le ciment sans pertes ni ségrégation, tout en maintenant la qualité du produit.



Figure I.12 : Transport et stockage du ciment fini

Description du procédé :

Chapitre I : Procédé de production

Une fois transporté, le ciment est réparti vers différents silos de stockage tels que PIP61, PIP66 ou PIP71. La distribution peut être automatique ou manuelle selon l'exploitation, et elle est gérée en fonction du niveau de remplissage de chaque silo afin d'assurer un équilibre optimal. Cette organisation permet également de stocker différents types de ciment séparément.

Chaque silo est équipé de filtres à manches et de systèmes de décolmatage afin de limiter les émissions de poussières et de récupérer les particules fines. Ces dispositifs contribuent à améliorer le rendement global du procédé tout en respectant les normes environnementales.

À l'intérieur des silos, le ciment est stocké en masse et légèrement homogénéisé grâce à l'injection d'air. Le niveau de remplissage est surveillé en continu pour garantir une gestion optimale des stocks et éviter tout risque de surcharge ou de formation de voûtes.

Enfin, le ciment est préparé pour l'expédition soit en sacs (big bags ou sacs classiques), soit en vrac via camions ou citernes [1].

3. Conclusion

L'importance du ciment est indéniable pour répondre aux besoins croissants d'urbanisation et d'aménagement du territoire, particulièrement dans les pays en développement. Bien que cette industrie soit confrontée aujourd'hui à des défis environnementaux majeurs, notamment en matière d'émissions de CO₂, elle reste irremplaçable pour la sécurité et la pérennité des ouvrages de génie civil. L'avenir de ce secteur réside désormais dans l'innovation vers un « ciment vert », plus écologique et durable, affirmant ainsi sa capacité à évoluer tout en restant le moteur indispensable du progrès architectural et infrastructurel mondial

1. Introduction:

Le présent chapitre a pour objectif de décrire et d'analyser le système d'entraînement du broyeur de clinker de la ligne M de la S.C.S.E.G. de Sour El Ghoulane. Cette chaîne cinématique, composée d'un démarreur liquide, d'un moteur électrique triphasé à rotor bobiné, d'un réducteur de vitesse SYMETRO et d'un broyeur à boulets UNIDAN, constitue le cœur du procédé de broyage. Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques techniques de chacun de ces composants, les principes fondamentaux de l'analyse vibratoire, ainsi que les fréquences caractéristiques associées aux principaux défauts mécaniques pouvant affecter les engrenages, les roulements et les organes de transmission. Ces éléments constituent le cadre théorique indispensable au diagnostic vibratoire développé dans les chapitres suivants.

2. Description du système d'entraînement (Chaîne cinématique) :

Le système étudié dans ce travail correspond à la chaîne de transmission mécanique utilisée pour l'entraînement d'un broyeur dans une cimenterie. Cette chaîne est composée principalement de trois éléments essentiels : le démarreur électrolytique le moteur électrique, le réducteur de vitesse et le broyeur. L'ensemble de ces composants assure la transmission de la puissance nécessaire pour le broyage du clinker

2.1 Description du système de démarrage (Démarreur Liquide AK-EP)



Figure II.1 : Vue d'ensemble du démarreur liquide à électrodes AK-EP

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Dans le cadre de cette mémoire, le système d'entraînement du broyeur à ciment utilise un démarreur liquide à électrodes (série AK-EP d'AKA). Ce dispositif est essentiel pour les moteurs à bagues de forte puissance (comme le moteur de 3520 kW mentionné dans vos documents) afin de garantir un démarrage progressif et de limiter les appels de courant sur le réseau électrique [1].

A. Spécifications techniques du site (Exemple du Broyeur Ciment)

D'après les données techniques du rapport de test les spécifications techniques sont les suivantes:

- **Puissance du moteur (P) :** 3520 kW.
- **Tension :** 1750 V.
- **Vitesse nominale :** 495 tr/min.
- **Temps de démarrage (td) :** Environ 20 à 30 secondes pour atteindre la vitesse nominale sans à-coups mécaniques [1].



Figure II.2 : Composantes électroniques et électromagnétiques

Cuve

Notre gamme se décline en quatre cuves fabriquées en acier peint ou en Inox 304 (option). Les cuves peuvent être définies spécifiquement pour certaines applications.
Epaisseur: 3mm
Volume : 1000L, 1500L, 2500L, 4500L
Protection : IP42

Armoire

Trois types d'armoires qui s'adaptent au contacteur: 1, 2 et 3 portes. Protection: IP56

Electrodes

Deux matériaux sont disponibles pour les électrodes :

- 🔥 Inox pour les applications standards
 - 🔥 Fonte pour les applications lourdes
- Ratio: 150 (option)



Le mécanisme d'entraînement de la vis

C'est le cœur même du démarreur liquide. Il est composé d'un motoréducteur, vis mère, noix, ensemble d'électrodes mobiles.

Ce mécanisme d'entraînement est un bloc indépendant de la cuve qui peut être retiré en quelques minutes pour maintenance.



Figure II.3 : Paramétrage technique du démarreur liquide

B. Principe de fonctionnement

Le démarreur liquide repose sur la variation d'une résistance électrolytique insérée dans le circuit rotorique du moteur.

- **Phase initiale** : Les électrodes sont en position haute, la résistance est maximale, ce qui permet un couple de démarrage élevé avec un courant réduit.
- **Phase de progression** : Un servomoteur déplace progressivement les électrodes vers le bas dans l'électrolyte (solution d'eau et de carbonate de soude), diminuant ainsi la résistance de manière continue.
- **Phase finale** : Une fois les électrodes en contact total (résistance minimale), un contacteur de court-circuit (bypass) intervient pour éliminer la résistance et passer en régime nominal [1].

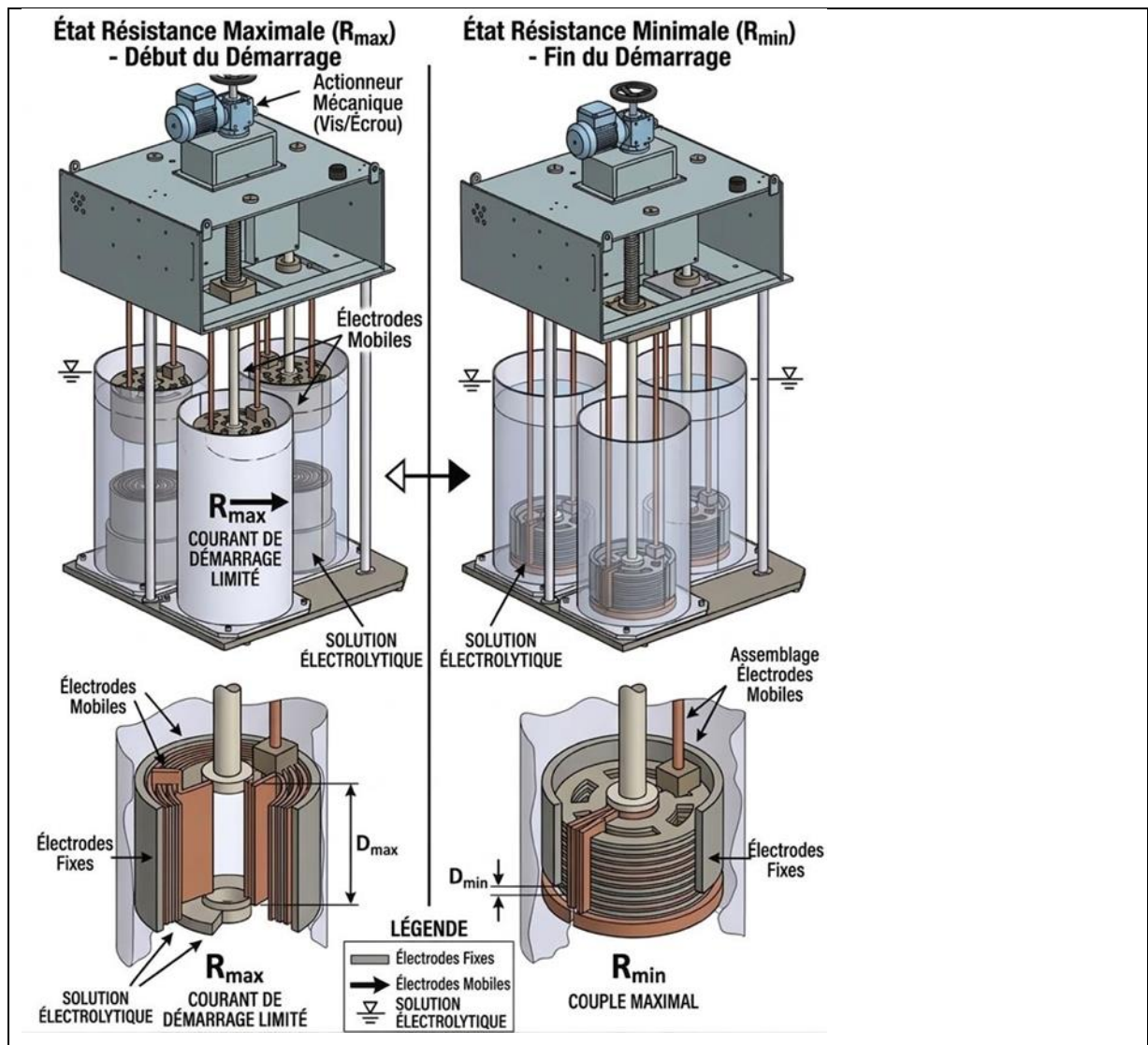


Figure II.4 : Principe de fonctionnement du démarreur liquide AK-EP

2.2 Description du moteur électrique (Moteur à induction à bagues)

Le moteur utilisé pour l'entraînement du broyeur de ciment est un moteur à induction triphasé à haute tension, à rotor bobiné (Moteur à bagues), de la Ligne M (WEG). Ce type de moteur est privilégié pour les applications de forte puissance nécessitant un couple de démarrage élevé [1].

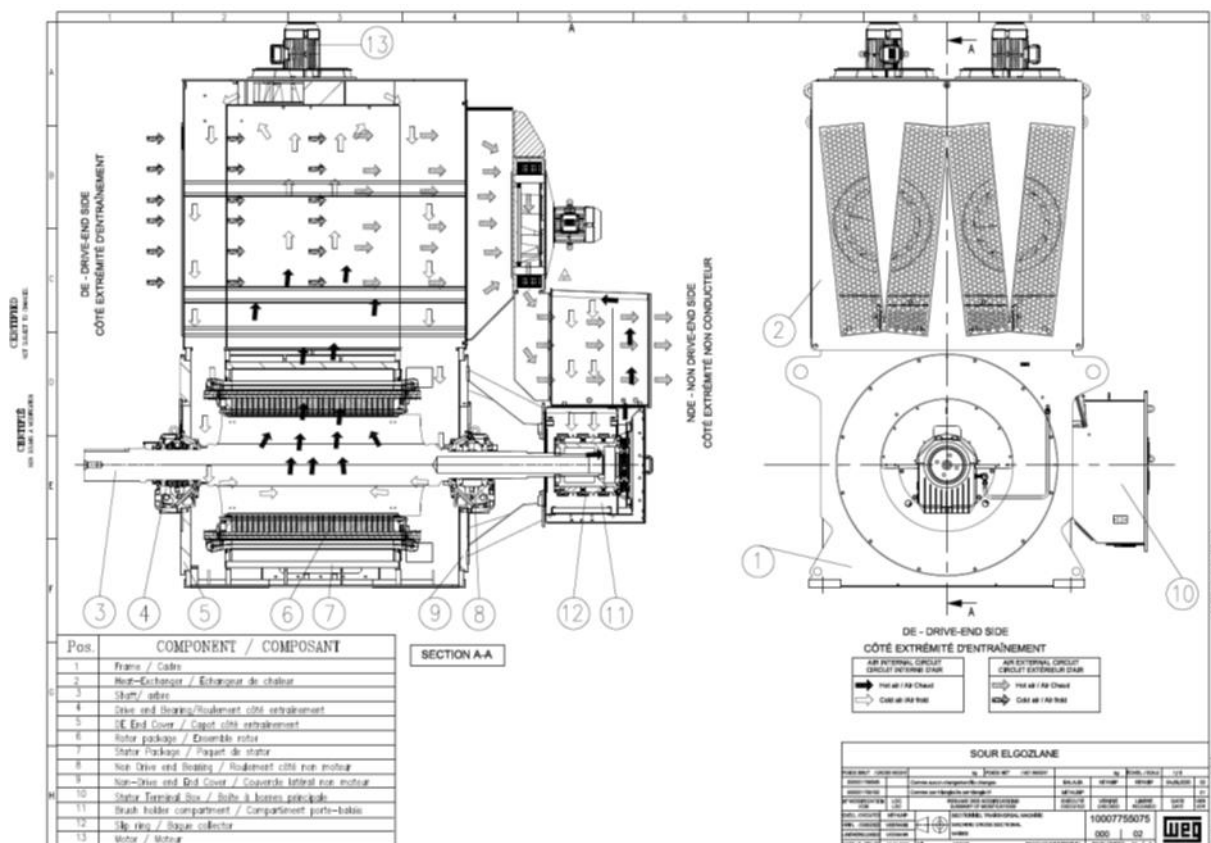


Figure II.5 : Moteur à induction triphasé à rotor bobiné WEG

A. Constitution du moteur

D'après la documentation technique de la Ligne M, le moteur se compose de deux parties principales :

1. Le Stator : Constitué d'une carcasse en fonte ou en acier soudé, logeant un enroulement triphasé inséré dans des tôles magnétiques. Il est alimenté par une tension de 5500 V.
2. Le Rotor à bagues (Rotor bobiné) : Contrairement au rotor à cage d'écureuil, celui-ci possède un enroulement triphasé dont les extrémités sont reliées à trois bagues collectrices montées sur l'arbre [1].

B. Système de balais et bagues

Le contact électrique entre la partie tournante (rotor) et le circuit externe (démarrateur liquide) est assuré par des **balais en graphite**. Ce système permet d'insérer des résistances externes dans le circuit rotorique pour contrôler :

- Le courant de démarrage (I start).
- Le couple de démarrage (C start) [1].

Caractéristiques générales

Paramètre	Valeur
-----------	--------

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Type moteur	Moteur à induction triphasé – Rotor à bagues
Carcasse	800
Puissance	3520 kW
Nombre de pôles	12
Fréquence	50 Hz
Tension nominale	5500 V (Couplage Y)
Courant de démarrage	456.3 A
Tension secondaire	1740 V (Couplage Y)
Courant secondaire	1203 A
Courant à vide	182.5 A
Vitesse nominale	495 rpm
Glissement	1 %
Couple nominal	67911 Nm
Couple de charge	67232 Nm
Couple max	240 %
Couple de démarrage	Non applicable

Tableau II.1 : Caractéristiques générales du moteur

Conditions de fonctionnement

Paramètre	Valeur
Service	S1
Température ambiante	-10 °C à 50 °C
Altitude	1000 m
Degré de protection	IP55
Refroidissement	IC666
Forme	B3R
Sens de rotation	Bidirection

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

	nel
Niveau sonore	87 dB(A)
Vibration	2.3 mm/s rms

Tableau II.2 : Conditions de fonctionnement du moteur

Démarrage et charge

Paramètre	Valeur
Méthode de démarrage	Direct
Accouplement	Direct
Type de charge	Broyeur à boulets
Inertie de charge	$3 \times J$ moteur

Tableau II.3 : Paramètres de démarrage et charge du moteur

Performances

Charge	Rendement (%)	Facteur de puissance
50 %	95.90	0.70
75 %	96.40	0.79
100 %	96.40	0.84

Tableau II.4 : Performances du moteur WEG

Remarques

- Tolérance tension rotorique : ± 10 %
- Inertie charge estimée = $3 \times$ inertie moteur
- Pertes supplémentaires : 0.5 % de la puissance absorbée
- Courbes disponibles :

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

- Couple / courant / vitesse : CM-11649/2020
- Limite thermique : CM-11650/2020
- Performances : CM-11651/2020

D. Couple et courant et vitesse

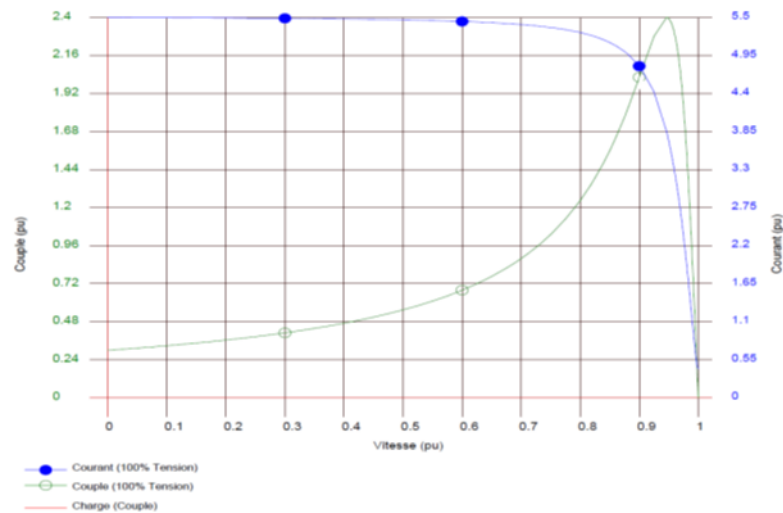


Figure II.6 : Courbes de performance du moteur WEG

Paramètre	Valeur
Performance	3520 kW 5500 V 50 Hz 12P 800
Courant de démarrage	456.3 A
Intensité de démarrage	Non applicable
Couple à pleine charge	67911 Nm
Couple de démarrage	Non applicable
Couple max	240 %
Vitesse à pleine charge	495 rpm
Moment d'inertie	1224 kg·m ²
Service	S1
Classe d'isolation	F
Facteur de service	1.00
Échauffement	Classe B
Temps de blocage du rotor	Non applicable (chaud)

Tableau II.5 : Couple, courant et vitesse du moteur (WEG-moteurs-a-induction-triphasés-a-basse-et-haute-tension-ligne-m-rotor-a-cage-horizontal-11576446-manuel)

E. Importance pour l'analyse vibratoire

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

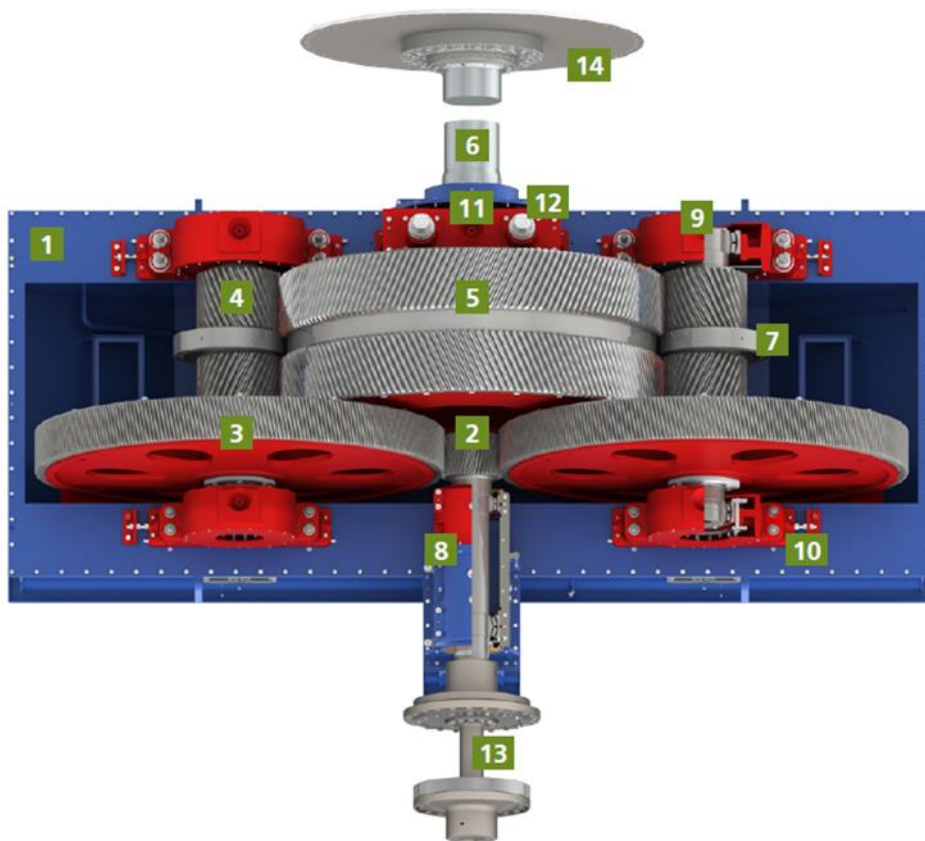
Dans le cadre d'un diagnostic vibratoire, le moteur est la source de mouvement initiale. Les fréquences à surveiller sont :

- **La fréquence de rotation (f_{rot})** : 8.25 Hz (pour 495 tr/min).
- **Les fréquences de passage des barres rotoriques/encoches** : qui peuvent indiquer des défauts d'excentricité ou des problèmes électriques se répercutant mécaniquement

2.3 Description du réducteur :

Le système de transmission de puissance du broyeur est assuré par un réducteur de type SYMETRO (série TSFP-1800 BC) conçu par F.L.Smith. Ce réducteur est spécifiquement développé pour les entraînements de forte puissance à basse vitesse, offrant une répartition symétrique des charges sur les engrenages [1].

A. Architecture et Conception (Concept Symetro)



- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Coffret, cadre inférieur | 9. Logement de roulements intermédiaires avec roulements à bille sphériques |
| 2. Pignon haute vitesse (HS) | |

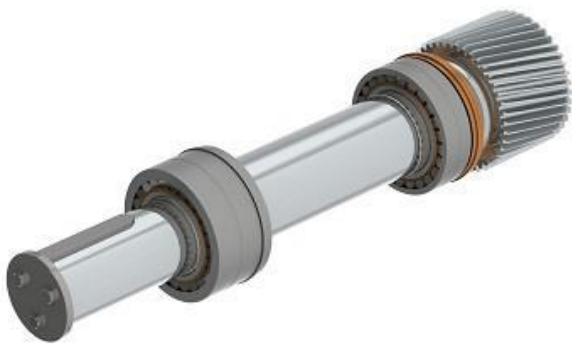
Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

3. Roues intermédiaires 4. Pignons intermédiaires 5. Volant d'équilibrage / Basse vitesse (LS) avec accouplement à membranes 6. Arbre de sortie / Arbre de torsion 7. Bagues de guidage 8. Logement de roulements haute vitesse avec roulements à bille sphériques	10. Boulons pour logements de roulements intermédiaires 11. Palier d'équilibre (métal blanc) 12. Rondelles Belleville 13. Accouplement à grande vitesse. (Accouplement à membranes) 14. Accouplement de sortie, côté broyeur (accouplement à membranes)
---	--

Figure II.6: Nomenclature des composante

Contrairement aux réducteurs classiques, le design Symetro repose sur une division de la puissance:

	Arbre de torsion (Torsion Shaft) : Il transmet le couple du moteur vers le réducteur tout en absorbant les chocs de démarrage[1].
Figure II.7 : Arbre de torsion (Torsion Shaft) du réducteur SYMETRO (www.FLSmidthMaagGear.com)	

	Pignon haute vitesse (HS) : Le pignon haute vitesse pour le réducteur SYMETRO se compose d'un arbre d'entrée avec pignon intégré ou installé par rétrécissement. Le pignon HS a des surfaces de dent cémentées-trempées et une correction du flanc d'hélice pour assurer une longue durée de vie[1].
Figure II.8 : Pignon haute vitesse (HS) du réducteur SYMETRO	

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker



Figure II.9 : Système d'équilibrage et division de puissance du réducteur SYMETRO

Système d'équilibrage : La puissance est divisée entre deux chemins d'engrenages identiques, ce qui permet d'annuler les forces radiales sur les paliers de l'arbre principal, garantissant une longévité exceptionnelle [1].



Figure II.10 : Arbres intermédiaires du réducteur SYMETRO

Arbres intermédiaires : Ils assurent la réduction de vitesse finale avant d'attaquer la couronne du broyeur [1].

B. Caractéristiques Techniques

D'après le rapport de montage **U 5152-01** les spécifications techniques du réducteur sont:

- **Type :** TSFP-1800 BC
- **Puissance nominale :** 3515 kW.
- **Rapport de réduction (n_1/n_2) :** 495 / 15.37 tr/min.
- **Système de lubrification :** Unité de filtration et de refroidissement séparée avec huile **Mobil Gear 630** (ou équivalent).

C. Composants Auxiliaires

Le réducteur est équipé de plusieurs systèmes critiques pour la surveillance et l'exploitation :



Figure II.11 : Vireur (Auxiliary Drive) du réducteur SYMETRO

Le Vireur (Auxiliary Drive) : Permet une rotation lente du broyeur pour les phases de maintenance et de positionnement des membranes [1].



Figure II.12 : Unité de refroidissement huile/eau du réducteur SYMETRO

Unité de refroidissement : Un échangeur thermique huile/eau avec régulation automatique par sonde thermostatique [1].



Figure II.13 : Instrumentation du réducteur SYMETRO (sondes de température Pt100)

Instrumentation : Sondes de température (Pt100) installées sur les paliers GV (Grande Vitesse) et dans le carter d'huile pour déclencher des alarmes en cas de surchauffe ($> 5^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la normale) [1]

2.4 Description du Broyeur (Broyeur UNIDAN)

Le broyeur utilisé dans ce système industriel est un broyeur à boulets de type UNIDAN, conçu par F.L.Smith. Il s'agit d'un équipement rotatif horizontal de grandes dimensions, essentiel dans le processus de fabrication du ciment pour le broyage fin des matières premières ou du clinker[1].

A. Constitution et Structure

Le broyeur UNIDAN à 02 chambres se compose principalement des éléments suivants :

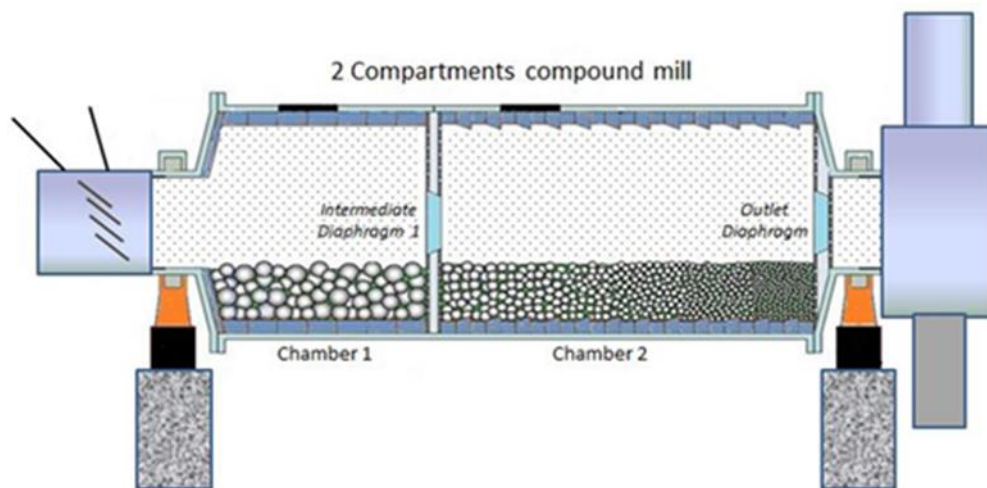


Figure II.14 : Broyeur à boulets UNIDAN FLS

Le broyeur ciment UNIDAN est composé de deux chambres de broyage. La première chambre, appelée chambre de broyage grossier, prépare le matériau avant son passage dans la seconde chambre. Son objectif est d'obtenir à la sortie un maximum de 5 % de refus sur un tamis de 2,5 mm. Elle est équipée d'un revêtement de type relevage qui soulève les boulets afin de favoriser le broyage par impact. La charge de boulets est constituée de diamètres de 90 mm, 80 mm, 70 mm et 60 mm.

La seconde chambre, appelée chambre de finition, assure le broyage fin par attrition afin d'obtenir la finesse souhaitée du ciment. Son blindage est de type classant, ce qui permet de répartir les boulets selon leur taille. Les plus gros boulets sont placés au début de la chambre où la matière est encore relativement grossière, tandis que les plus petits sont situés vers la sortie où la matière est plus fine. La charge de boulets comprend des diamètres de 60 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 25 mm, 20 mm et 17 mm, avec parfois des boulets de 15 mm en circuit ouvert.

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Le broyeur est équipé d'une cloison intermédiaire, généralement réglable, ainsi que d'une cloison de sortie. Son fonctionnement repose sur un broyage par impact dans la première chambre et sur un broyage par attrition accompagné d'une classification interne dans la seconde chambre.

L'entraînement du broyeur est assuré de manière centrale par un réducteur SYMETRO relié par un accouplement à membranes. Cette configuration garantit une transmission de puissance plus équilibrée et plus efficace que les systèmes à couronne dentée latérale. Le poids total du broyeur, incluant les boulets et la matière à broyer, est supporté par des paliers à patins hydrostatiques lubrifiés sous haute pression afin de réduire les frottements, notamment lors du démarrage.

Le broyeur est également équipé d'un système de virage (vireur), constitué d'un moteur auxiliaire permettant une rotation très lente du tambour. Ce dispositif est utilisé pour les inspections internes, les opérations de maintenance, le positionnement lors du chargement ou du déchargement des boulets, ainsi que pour éviter la déformation de la virole lors des arrêts prolongés à chaud.

Les principales caractéristiques techniques du broyeur sont les suivantes : il s'agit d'un broyeur ciment UNIDAN doté d'une puissance pouvant atteindre 3520 kW, entraîné par un moteur WEG. Sa vitesse de rotation nominale est de 15,37 tr/min à la sortie du réducteur SYMETRO. La lubrification est assurée par un système haute pression pour les paliers et par une circulation d'huile destinée au refroidissement des différents composants [1].

3. Principes de l'analyse vibratoire :

Les vibrations acquises en fonction du temps dépendent directement de la vitesse de rotation de la machine. Elle se caractérise par trois paramètres essentiels [10].

3.1. Concepts de base (Amplitude, Fréquence, Phase)

- **L'Amplitude (Intensité) :** Elle mesure l'ampleur du mouvement vibratoire. C'est l'indicateur de la sévérité du défaut. On la mesure en *déplacement* (basses fréquences), en *vitesse* (norme ISO, utilisée pour la sévérité globale) ou en *accélération* (hautes fréquences, utilisée pour les roulements).
- **La Fréquence (Rythme) :** Elle indique combien de fois le phénomène se répète par seconde (Hz) ou par minute (RPM). Elle permet d'identifier la **source** du défaut. Chaque composant (roulement, engrenage, arbre) possède une signature fréquentielle unique.
- **La Phase (Synchronisation) :** Elle représente le calage temporel du signal par rapport à une référence fixe sur l'arbre. Elle est indispensable pour distinguer des défauts aux fréquences similaires, comme le balourd et le désalignement, et pour les opérations d'équilibrage [4].

3.2. Analyse spectrale : FFT et Enveloppe

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

La plupart des vibrations réelles sont complexes (somme de plusieurs vibrations). L'analyse temporelle brute est souvent illisible, d'où l'utilisation de méthodes avancées [3], [4].

La Transformée de Fourier Rapide (FFT - Fast Fourier Transform)

La FFT est l'algorithme mathématique qui transforme un signal du domaine temporel (l'amplitude en fonction du temps) vers le domaine fréquentiel (l'amplitude en fonction de la fréquence).

- **Principe :** Elle décompose le signal complexe en une somme de sinusoides simples.
- **Résultat :** Un "spectre" où chaque pic correspond à une fréquence spécifique, permettant d'isoler les défauts par leur fréquence caractéristique (ex: 1x, 2x, 3x la vitesse de rotation) [3], [9]

La démodulation (ou analyse d'enveloppe)

Parfois, un défaut (comme une fissure dans une bague de roulement) génère des chocs répétitifs à très haute fréquence qui sont noyés dans le bruit de fond de la machine.

- **Le problème :** La FFT classique a du mal à détecter ces signaux faibles de haute fréquence.
- **La solution (Analyse d'enveloppe) :**
 1. **Filtrage :** On isole la bande de fréquences où se situent les chocs du roulement.
 2. **Redressement :** On "redresse" le signal pour ne garder que les impulsions.
 3. **Lissage :** On extrait l'enveloppe (le contour) de ces impulsions.
 4. **FFT de l'enveloppe :** On applique une nouvelle FFT sur cette enveloppe pour identifier la fréquence de passage des éléments du roulement [8], [13], [14].

Synthèse des outils d'analyse

Outil	Fonction principale	Usage typique
Signal temporel	Vue brute du mouvement	Détection de chocs brutaux ou instabilités.
Spectre (FFT)	Décomposition en fréquences	Identification de balourds, désalignements et jeux.
Enveloppe	Démodulation de fréquences	Diagnostic précoce des défauts de roulements et engrenages [4], [8], [17].

Tableau II.6 : Synthèse des outils d'analyse vibratoire

4. Fréquences caractéristiques des défauts

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Dans l'analyse vibratoire, chaque composant mécanique possède une "signature" fréquentielle. Identifier ces pics sur le spectre permet de remonter à la source de la défaillance [3], [8].

4.1. Fréquence de désalignement

Le défaut de lignage est dû au non coïncidence des axes de rotation de 2 machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage [3], [4].

A. Délignage parallèle: Défaut de concentricité des deux arbres

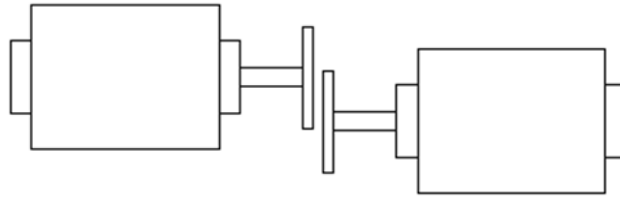


Figure II.15 : Désalignement parallèle entre deux arbres couplés [6].

B. Délignage angulaire: Défaut de parallélisme des deux arbres

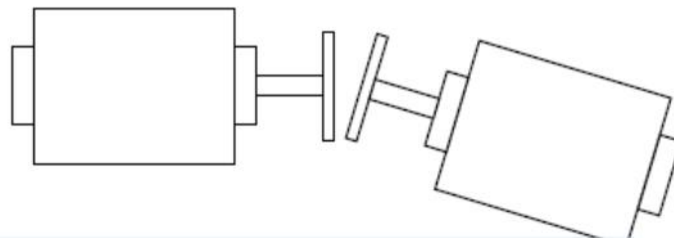


Figure II.16 : Désalignement angulaire entre deux arbres couplés [6].

C. Délignage angulaire et parallèle: Combinaison des deux précédents Délignage

Le désalignement (angulaire ou parallèle) entre deux arbres couplés se manifeste par :

- **Signature :** Une prédominance de la composante à **2ou 3x RPM** (deux fois la vitesse de rotation).
- **Caractéristique :** Il génère souvent des niveaux d'accélération élevés dans la **direction axiale** [3], [17].

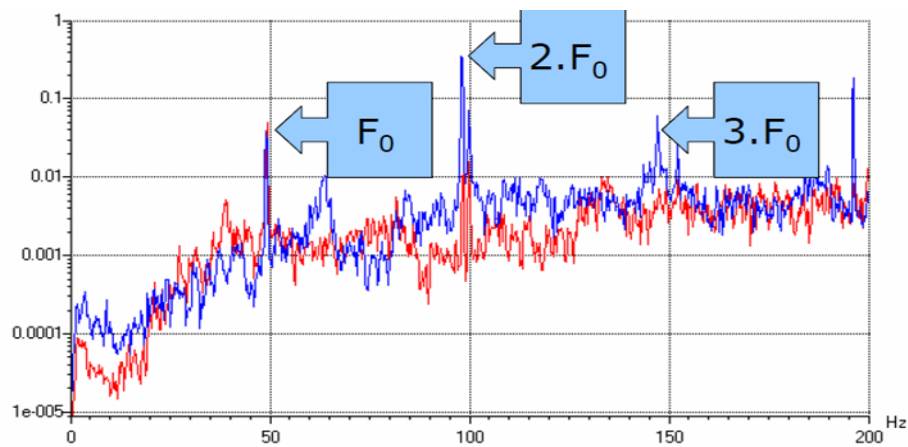


Figure II.17 : Désalignement angulaire et parallèle combiné

4.2. Fréquence de balourd

Le phénomène de balourd mécanique est linéaire répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation [3], [6]. Différents types de balourd peuvent être identifiés

<i>Fig.A</i>	Balourd statique: L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation [4].
---	---

Figure II.18 : Balourd statique sur un rotor

<i>Fig.B</i>	Balourd de couple: L'axe d'inertie n'est plus colinéaire l'axe de rotation, les deux axes formant un angle [4].
---	---

Figure II.19 : Balourd de couple sur un rotor

<i>Fig.C</i>	Balourd dynamique: Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant [4].
---	--

Figure II.20 : Balourd dynamique sur un rotor

- **Signature :** Un pic d'amplitude massif à **1x RPM** (vitesse de rotation fondamentale) et des harmoniques $2F_0$, $3F_0$ [3], [17].
- **Caractéristique :** Le niveau de vibration est généralement le plus fort dans les **directions radiales** (horizontale et verticale) [3].

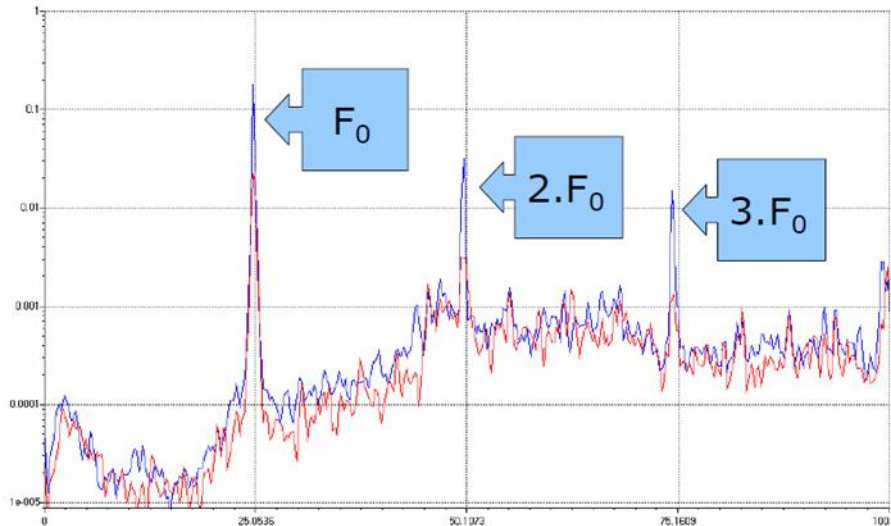


Figure II.21 : Signature spectrale caractéristique d'un balourd (pic à 1x RPM)

4.3. Fréquence de défaut d'engrènement (GMF)

Les engrenages permettent la transmission d'un couple avec ou sans réduction de vitesse. Le rapport des vitesses des deux arbres est lié au nombre de dents de chacun des pignons en contact

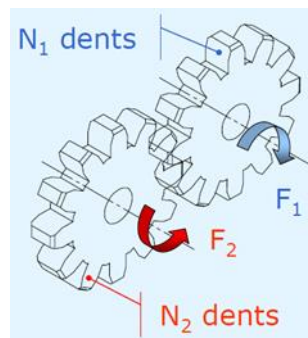


Figure II.22 : Schéma d'un train d'engrenages et rapport des vitesses

Elle est spécifique aux transmissions par engrenages [4].

- **Calcul :** $GMF = \text{Nombre de dents} \times \text{vitesse de rotation}$
- **Diagnostic :** Une augmentation de l'amplitude au GMF indique une usure, un écaillage ou une rupture de dent sur les pignons [11].

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Usure généralisée de la denture :

Les fréquences **Fe2**, **Fe3** et **Fe4**, correspondant aux harmoniques de la fréquence d'engrènement, sont généralement associées à une **usure généralisée de la denture**. Cette usure se manifeste par un matage progressif du profil des dents, entraînant des impacts périodiques de faible intensité (« chocs mous ») à la fréquence d'engrènement. Dans le spectre vibratoire, ce phénomène se traduit par l'apparition d'un **peigne harmonique** centré sur la fréquence d'engrènement, composé de raies dont les amplitudes décroissent avec l'ordre harmonique [7].

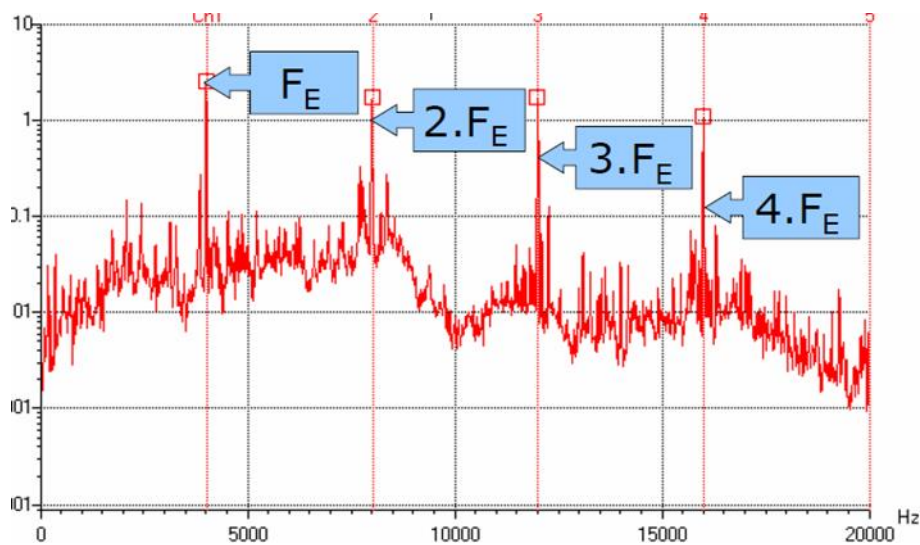


Figure II.23 : Spectre vibratoire d'une usure généralisée de denture (peigne harmonique)

Une dent détériorée sur un pignon :

Le passage de la dent détériorée provoque un choc « dur » à chaque tour. Le spectre résultant est un peigne de raies à la fréquence de rotation F_1 du pignon incriminé [12].

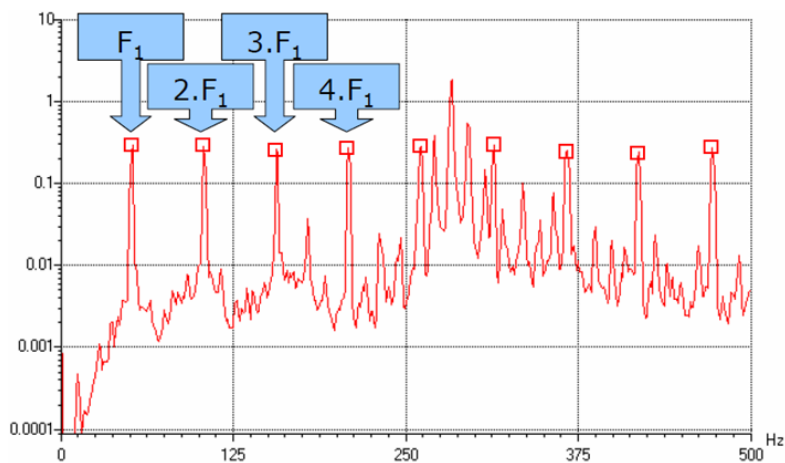


Figure II.24 : Spectre vibratoire d'une dent détériorée sur un pignon

4.4. Harmoniques et bandes latérales (Sidebands)

- **Harmoniques** : Ce sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale (ex: 2x, 3x, 4x RPM). Leur accumulation est le signe d'un **jeu mécanique** (desserrage) ou d'une non-linéarité [4].
- **Bandes latérales** : Ce sont des fréquences satellites entourant une fréquence porteuse (souvent le GMF). Elles indiquent une **modulation** (ex: un défaut localisé sur un pignon qui "bat" à chaque tour) [13].

4.5. Fréquences des défauts des roulements

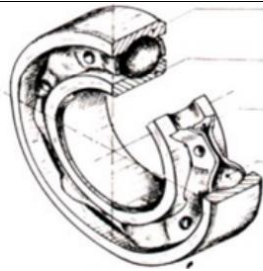
 ➤ PD : Diamètre moyen d'évolution (<i>Pitch Diameter</i>) ➤ BD : Diamètre des billes (<i>Ball Diameter</i>) ➤ n : Nombre de billes ➤ fr : Fréquence de rotation de l'arbre ➤ β : Angle de contact		$f_{BSF} = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right]$
		$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$
		$f_{BPFI} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$

Tableau II.7 : Formules de calcul des fréquences caractéristiques des défauts de roulements [2].

Les dégradations localisées :

Un défaut localisé sur l'un des éléments d'un roulement se manifeste par des chocs « durs » à la fréquence de passage associée à la zone endommagée [14].

- **Défaut sur bague externe (BPFO – Ball Pass Frequency Outer)** : choc à la fréquence **FBE** (fréquence de passage sur bague externe)
- **Défaut sur bague interne (BPFI – Ball Pass Frequency Inner)** : choc à la fréquence **FBI** (fréquence de passage sur bague interne)
- **Défaut sur élément roulant (BSF – Ball Spin Frequency)** : choc à la fréquence **2•FB** (lié à la rotation de l'élément roulant)

Le défaut de bague interne (tournante) est souvent modulé par la fréquence de rotation [8].

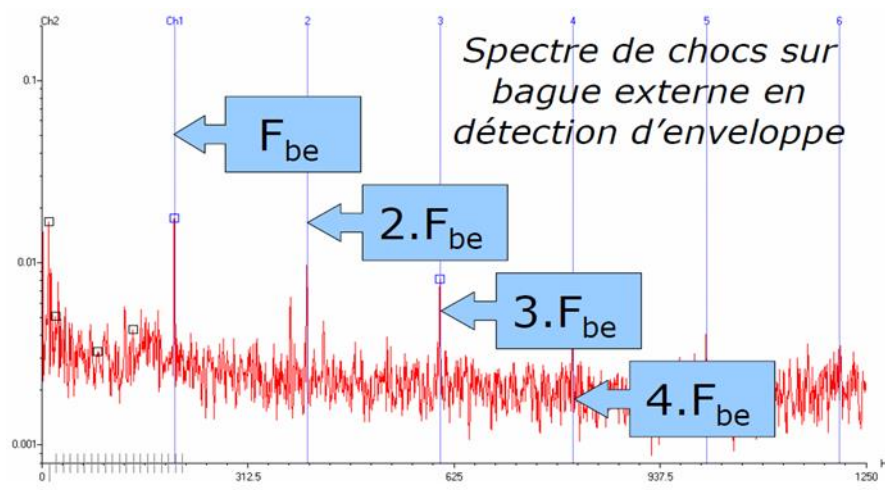


Figure II.25 : Fréquences caractéristiques des défauts de roulements (BPFO, BPFI, BSF, FTF)

4.6. Fréquences des défauts électromagnétiques

Spécifiques aux moteurs électriques, ils sont liés aux forces magnétiques au sein du stator et du rotor [3].

- **Signature :** On observe souvent des pics liés à la fréquence du réseau (ex: 50 Hz ou 100 Hz).
- **Diagnostic :** Un défaut de "barres de rotor cassées" se manifeste par des bandes latérales autour de la fréquence de glissement [10].

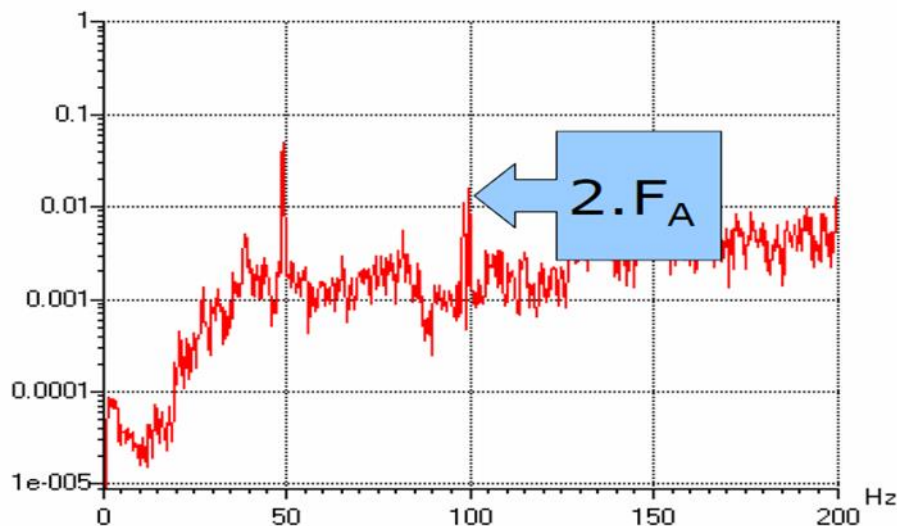


Figure II.26 : Signature spectrale d'un défaut électromagnétique du moteur

4.7 Tableau récapitulatif pour le diagnostic

Défaut	Signature Fréquentielle	Indicateur Clé
Balourd	1x RPM	Radial, constant

Chapitre II : Analyse du système broyeur de clinker

Désalignement	2x RPM	Axiale, élevée
Engrenage (GMF)	Z \ RPM	Haute fréquence + Bandes latérales
Roulement	BPFI, BPFO, BSF	Non-harmonique (analyse d'enveloppe)
Défaut Électrique	2 \ F réseau	Lié à la charge du moteur

Tableau II.9 : Tableau récapitulatif des fréquences caractéristiques pour le diagnostic vibratoire[4].

5. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les fondements théoriques du système d'entraînement et de l'analyse vibratoire. L'étude de la chaîne cinématique a mis en évidence le rôle ainsi que les interactions entre les différents composants du système. Par ailleurs, les principes de l'analyse vibratoire ainsi que les fréquences caractéristiques des défauts ont été détaillés afin de faciliter la détection et le diagnostic des anomalies mécaniques et électriques

Chapitre III : Analyse du système broyeur de clinker

1. Introduction

Dans les systèmes électromécaniques, les engrenages sont essentiels pour la transmission de puissance et du mouvement. Aujourd'hui, l'utilisation des outils de simulation permet d'améliorer la conception et de garantir de meilleures performances.

Le logiciel KISSsoft offre la possibilité d'analyser et d'optimiser les engrenages selon des normes reconnues, tout en réduisant les coûts et les erreurs de conception.

Ce travail vise à étudier et simuler les engrenages à l'aide de KISSsoft afin de mieux comprendre leur comportement et améliorer leur efficacité.

2. Modélisation numérique sous KISSsoft :

2.1. Définition de logiciel KISSsoft

Le logiciel KISSsoft est un outil d'ingénierie spécialisé dans le calcul, la conception et la simulation des éléments de transmission mécanique, notamment les engrenages, les arbres, les roulements et les réducteurs.

Il permet aux ingénieurs de dimensionner ces composants selon des normes internationales (ISO, DIN, AGMA), d'analyser leur résistance, leur durée de vie et leur comportement en fonctionnement. KISSsoft est largement utilisé dans l'industrie pour optimiser les performances, améliorer la fiabilité des systèmes mécaniques et réduire les risques de défaillance avant la fabrication [18].

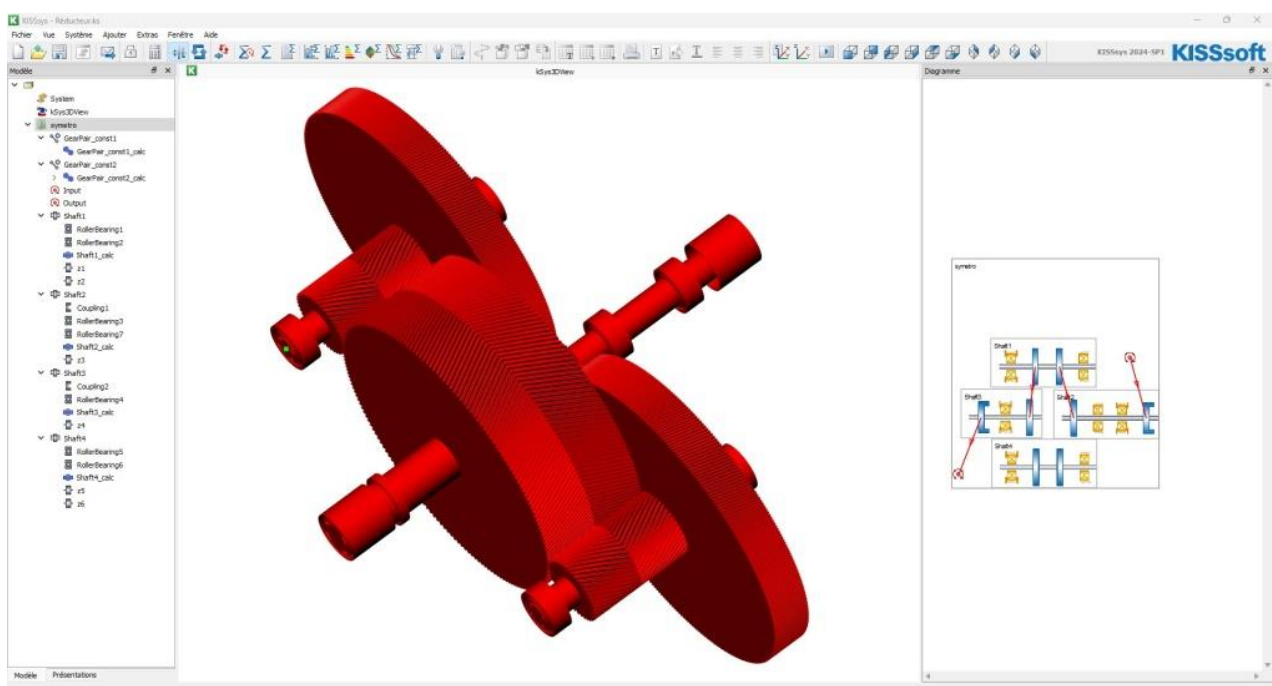


Figure III.1 : Interface du logiciel KISSsoft pour la simulation des engrenages

2.2. Définition des paramètres géométriques (Engrenages, Roulements).

2.2.1 Définition des paramètres géométriques

Cette section détaille les caractéristiques dimensionnelles des deux étages de réduction du multiplicateur/réducteur. Le système est composé d'engrenages cylindriques à dentures hélicoïdales.

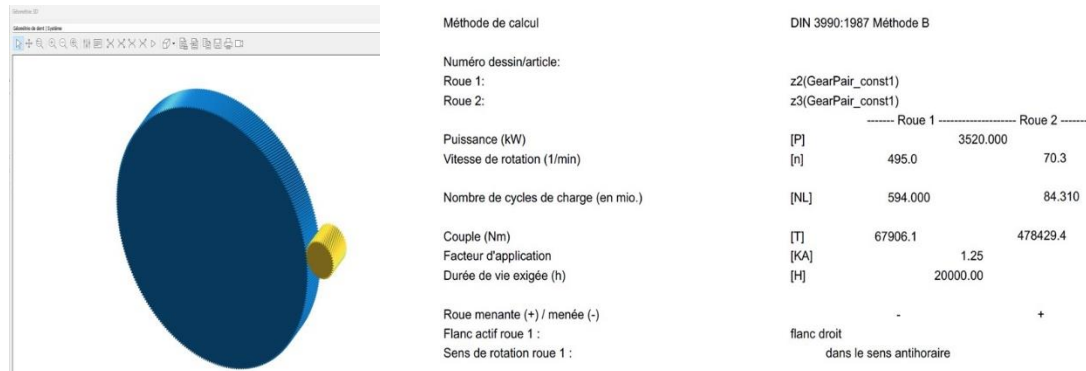


Figure III.2 : Paramètres géométriques des engrenages hélicoïdaux du réducteur SYMETRO

2.2.1.1 Premier Étage : Grande Vitesse (GV)

Cet étage assure la liaison entre l'arbre rapide et l'arbre intermédiaire. Il se caractérise par un grand nombre de dents sur la roue menée pour obtenir un rapport de réduction élevé.

Paramètres principaux:

Fréquence de rotation (Hz) [fn]	Roue 1: 8.250	Roue 2: 1.171
Nombre de dents [z]	44	310
Fréquence de l'engrènement (Hz) [fz]	363.000	
Fréquence « hunting tooth » (Hz) [fk]	0.053	
Fréquence de phase de montage (Hz) [fa]	181.500	

Tableau III.1 : Fréquences caractéristiques de l'étage grande vitesse (GV) – rotation et engrènement

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

Limites de fréquences latérales:

Roue	fsmin (Hz)	fsmax (Hz)	fsmin (R1)	fsmax (R1/R2)
Roue 1	354.750	371.250	361.829	364.171
Roue 2	361.83	364.17	354.750	371.250

Tableau III.2 : Limites des fréquences latérales de l'étage grande vitesse (GV)

Harmoniques:

N° harm.	Freq engr (Hz)	Hunti ng tooth (Hz)	Phase montage (Hz)	Lim min R1	Lim min R2	Lim max R1	Lim max R2
1	363.0 00	0.053	181.5 00	361.8 29	354.750	364.1 71	371.2 50
2	726.0 00	0.106	363.0 00	724.8 29	717.750	727.1 71	734.2 50
3	1089. 000	0.160	544.5 00	1087. 829	1080.750	1090. 171	1097. 250

Tableau III.3 : Harmoniques de la fréquence d'engrènement de l'étage grande vitesse (GV)
(logiciel KISSOFT)

Données de base :

- **Nombre de dents :** $z_1 = 44$ (Pignon) / $z_2 = 310$ (Roue)
- **Module normal (m_n) :** 10 mm
- **Angle de pression normal (α_n) :** 20°
- **Angle d'hélice (β) :** 15°
- **Sens d'hélice :** Droite (Pignon) / Gauche (Roue)

Dimensions caractéristiques :

Paramètres (en mm)	Symb ole	Pignon ($z=44$)	Roue ($z=310$)
Diamètre de référence	d	455.522	3209.356
Diamètre de tête	d _a	474.645	3229.356
Diamètre de pied	d _f	429.645	3184.356
Diamètre de base	d _b	428.051	3015.808

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

Largeur de face	b	140	140
-----------------	---	-----	-----

Tableau III.4 : Dimensions caractéristiques des engrenages de l'étage grande vitesse (GV)

Entraxe théorique (a) : 1832 mm

- **Rapport de conduite total (epsilon_\gamma) : ~2.35** (assurant une transmission silencieuse)

2.2.1.2 Deuxième Étage : Petite Vitesse (PV)

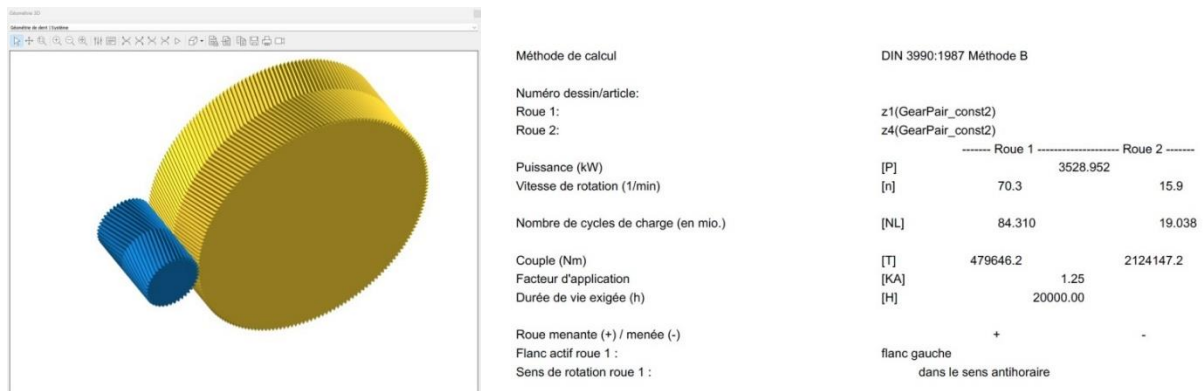


Figure III.3 : Simulation de l'étage petite vitesse (PV) sous KISSsoft

Cet étage transmet des couples beaucoup plus élevés vers l'arbre de sortie, nécessitant un module plus important.

1. Caractéristiques Générales du Système de Transmission

Paramètre	Symbole	Roue 1	Roue 2
Fréquence de rotation (Hz)	[fn]	1.171	0.264
Nombre de dents	[z]	42	186
Fréquence de l'engrènement (Hz)	[fz]	49.181	
Fréquence « hunting tooth » (Hz)	[fk]	0.038	

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

Fréquence de phase de montage (Hz)	[fa]	8.197	
Limite minimale fréquence de bande latérale (Hz)	[fsmi n]	48. 01	48. 916
Limite maximale fréquence de bande latérale (Hz)	[fsma x]	50. 35	49. 445

Tableau III.5 : Fréquences caractéristiques de l'étage petite vitesse (PV)

2. Fréquences d'Engrènement aux Vitesses de Rotation Nominales

Le tableau suivant présente de manière détaillée les fréquences d'engrènement calculées pour toutes les harmoniques principales (1 à 3), ainsi que leurs bandes latérales respectives pour chaque roue :

N° de l'harmonique	Fréquence de l'engrènement (Hz)	Fréquence « hunting tooth » (Hz)	Fréquence de phase de montage (Hz)	Limite minimale fréquence latérale roue 1 (Hz)	Limite minimale fréquence latérale roue 2 (Hz)	Limite maximale fréquence latérale roue 1 (Hz)	Limite maximale fréquence latérale roue 2 (Hz)
1	49.181	0.038	8.197	48.010	48.916	50.352	49.445
2	98.361	0.076	16.394	97.190	98.097	99.532	98.626
3	147.542	0.113	24.590	146.371	147.278	148.713	147.806

Tableau III.6 : Fréquences d'engrènement aux harmoniques de l'étage petit vitesse (PV)

Données de base :

- Nombre de dents : $z_3 = 42$ (Pignon) / $z_4 = 186$ (Roue)
- Module normal (m_n) : 14 mm
- Angle de pression normal (α_n) : 20°
- Angle d'hélice (β) : 12°
- Déport de profil (x) : $x_3 = +0.4192$ / $x_4 = +0.1633$

Dimensions caractéristiques :

Paramètres (en mm)	Symbole	Pignon ($z=42$)	Roue ($z=186$)
Diamètre de	d	601.121	2662.107

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

référence			
Diamètre de tête	d_a	640.841	2694.661
Diamètre de pied	d_f	573.591	2627.411
Diamètre de base	d_b	564.871	2501.765
Largeur de face	b	190	190

Tableau III.7 : Dimensions caractéristiques des engrenages de l'étage petite vitesse (PV)

- **Entraxe de fonctionnement (a_w) :** 1832 mm
- **Rapport de réduction étage 2 (i_2) :** 4.428

2.2.1.3 Fréquences caractéristiques des roulements

L'analyse fréquentielle des paliers permet d'identifier les signatures vibratoires spécifiques à chaque composant du roulement (bagues et éléments roulants). Ces fréquences sont calculées en fonction de la géométrie du roulement et de sa vitesse de rotation (n).

A. Définitions des fréquences calculées

Pour chaque palier, quatre fréquences critiques ont été simulées :

1. **BPFO (Ball Pass Frequency Outer race) :** Fréquence de passage des éléments roulants sur la bague extérieure.
2. **BPFI (Ball Pass Frequency Inner race) :** Fréquence de passage sur la bague intérieure.
3. **BSF (Ball Spin Frequency) :** Fréquence de rotation de l'élément roulant (bille ou rouleau) sur lui-même.
4. **FTF (Fundamental Train Frequency) :** Fréquence de rotation de la cage.

B. Synthèse des fréquences par palier

Selon les vitesses de rotation réelles ($n_1=495$, $n_2=70.2$, $n_3=15.85$ tr/min), les résultats obtenus sont les suivants :

1. Paliers de l'Arbre Rapide (PAL 3)

- **Vitesse :** 495 tr/min (8.25Hz)
- **Type :** Roulement à rotule sur rouleaux 23248 C
- **Fréquences calculées :** BPFI : 90.29 Hz, BPFO : 68.05 Hz, BSF : 56.59 Hz, FTF (Cage) : 3.58 Hz

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

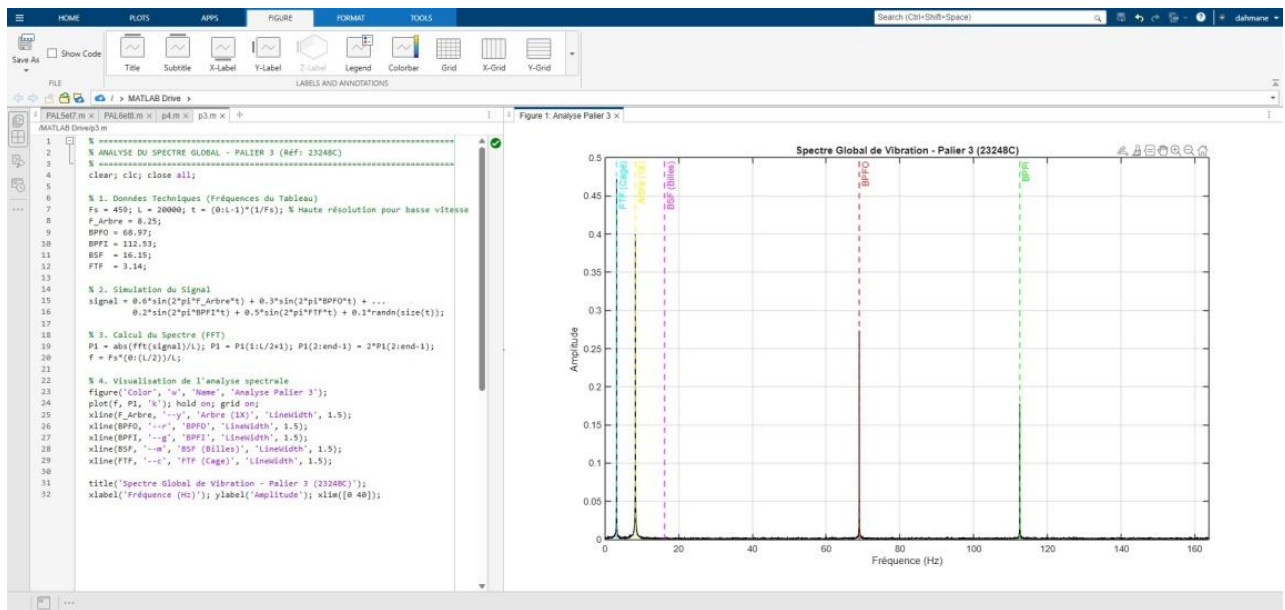


Figure III.4 : Fréquences caractéristiques du roulement PAL 3 (23248 C) – Arbre rapide [19].

2. Paliers de l'Arbre Rapide (PAL 4)

- **Vitesse :** 495 tr/min (8.25Hz)
- **Type :** Roulement à rotule sur rouleaux 23152 C
- **Fréquences calculées :** BPFI : 100.65 Hz, BPFO : 64.35 Hz , BSF : 17.85 Hz, FTF (Cage) : 3.22 Hz

3. Paliers avant des arbres Intermédiaires (PAL 5 & PAL 7)

- **Vitesse :** 70.2 tr/min (1.17Hz)
- **Type :** Roulement à rotule sur rouleaux 23160 CA
- **Fréquences calculées :** BPFI : 12.95 Hz, BPFO : 8.11 Hz, BSF : 2.40 Hz, FTF (Cage) : 0.45 Hz

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

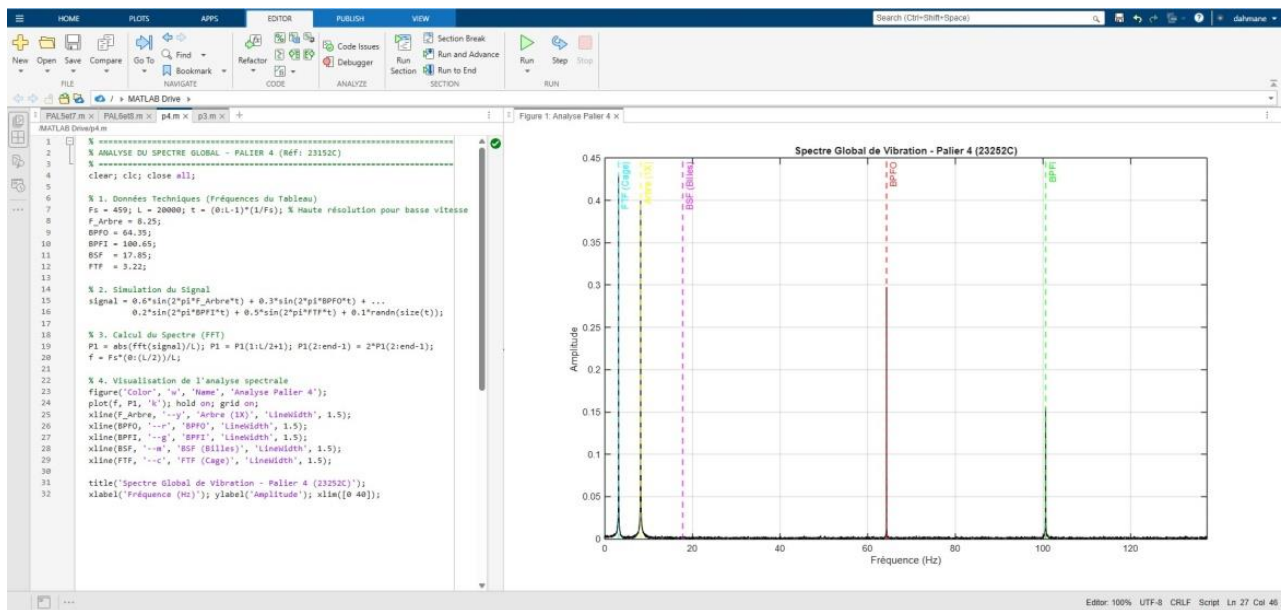


Figure III.5 : Fréquences caractéristiques des roulements PAL 5 et 7 (23160 CA) – Arbres intermédiaires [19].

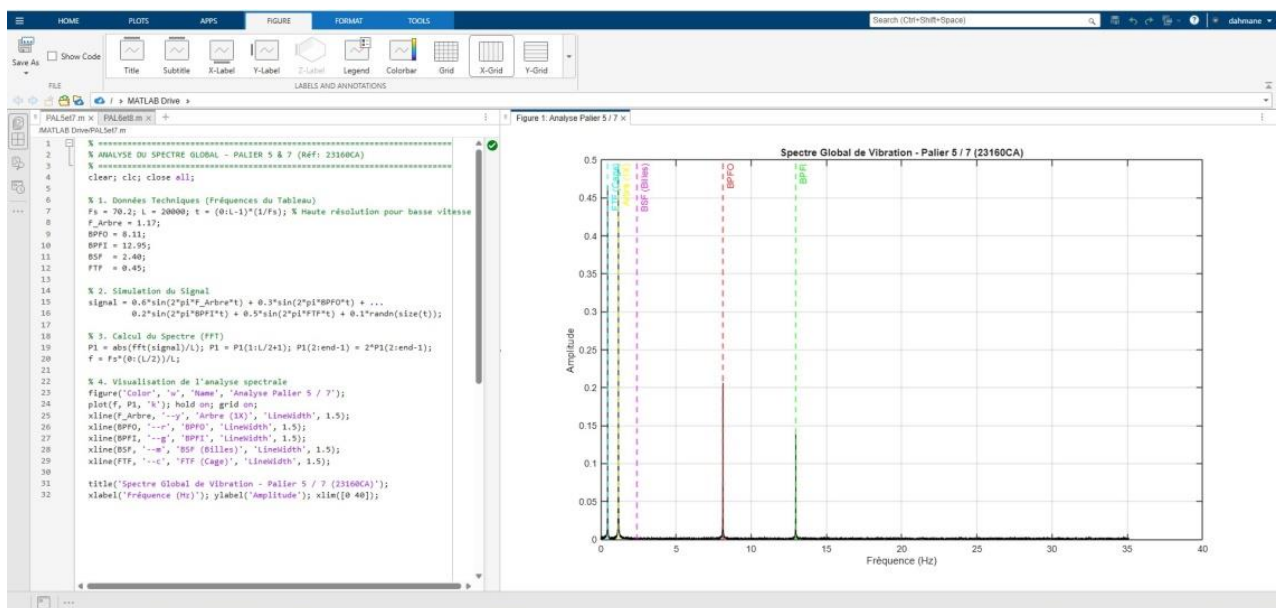


Figure III.6 : Résultats KISSsoft des fréquences des roulements PAL 5 et 7 (vue complémentaire)

3. Paliers arrière des arbres Intermédiaires (PAL 6 & PAL 8)

- **Vitesse :** 15.85 tr/min (0.26 Hz)
- **Type :** Roulement à rotule sur rouleaux 23168 CA
- **Fréquences calculées :** BPFI : 14.27 Hz, BPFO : 9.13 Hz, BSF : 2.53 Hz, FTF (Cage) : 0.46 Hz

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

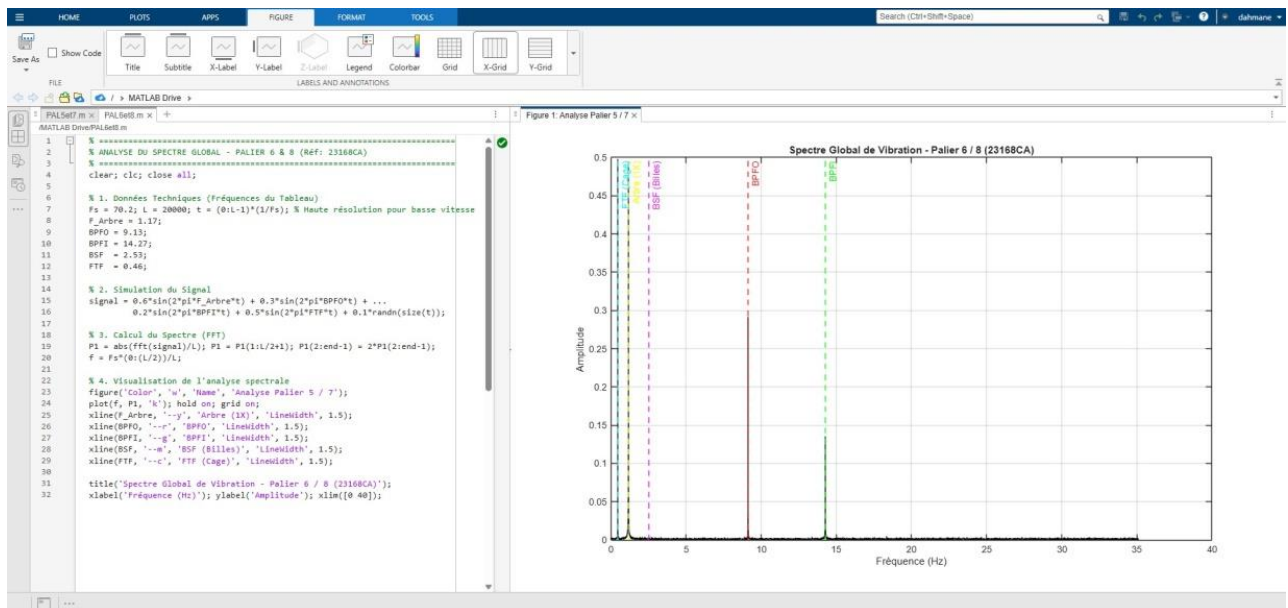


Figure III.7 : Fréquences caractéristiques des roulements PAL 6 et 8 (23168 CA) – Arbres intermédiaires [19].

C. Analyse et Interprétation

L'analyse vibratoire des roulements à rotule sur rouleaux en bon état montre que les fréquences caractéristiques (FTF, BPFO, BPFI et BSF) peuvent être calculées théoriquement, mais elles ne présentent généralement pas de pics significatifs dans le spectre mesuré.

Pour un roulement sain, le signal vibratoire est principalement dominé par la fréquence de rotation et ses faibles harmoniques, sans apparition marquée des fréquences de défaut. Les amplitudes associées à BPFO, BPFI, BSF et FTF restent très faibles ou inexistantes, ce qui indique un bon état de contact entre les éléments roulants et les bagues.

Ainsi, l'absence de pics aux fréquences caractéristiques confirme le bon fonctionnement du roulement et l'absence de défauts internes, ce qui valide l'état sain de l'organe mécanique.

2.3. Simulation des fréquences d'engrènement

L'analyse dynamique repose sur les vitesses de rotation réelles des trois arbres du système. La fréquence d'engrènement ($f \times z$) est le principal indicateur de l'excitation vibratoire.

2.3.1. Étage Grande Vitesse (GV)

Cet étage relie l'arbre d'entrée à l'arbre intermédiaire.

- **Vitesse de l'arbre 1 (Entrée) :** $n_1 = 495$ tr/min
- **Nombre de dents du pignon :** $z_1 = 44$
- **Calcul de la fréquence d'engrènement ($f \times z_1$) :**

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

- **Analyse** : à **363 Hz**, l'excitation se situe dans une plage de fréquences moyennes. La présence de **310 dents** sur la roue menée assure une continuité d'engrènement élevée, limitant les fluctuations de couple.

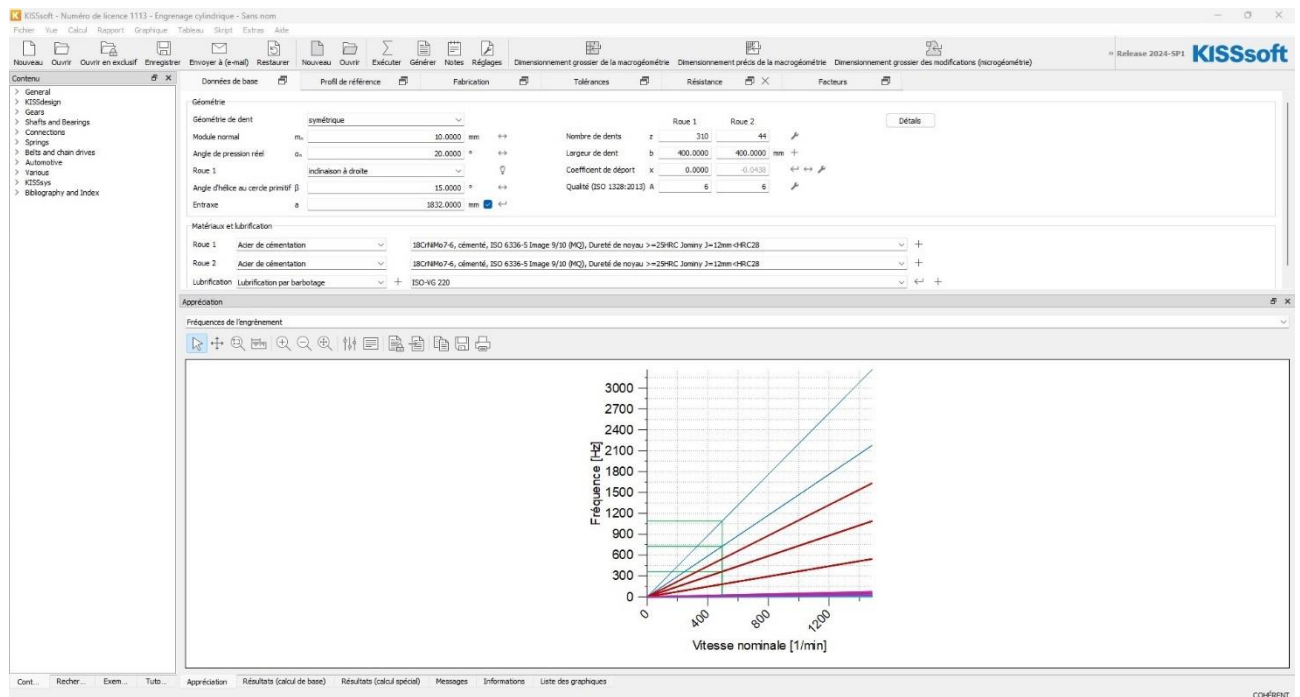


Figure III.8 : Simulation KISSsoft de la fréquence d'engrènement de l'étage grande vitesse (GV = 363 Hz)

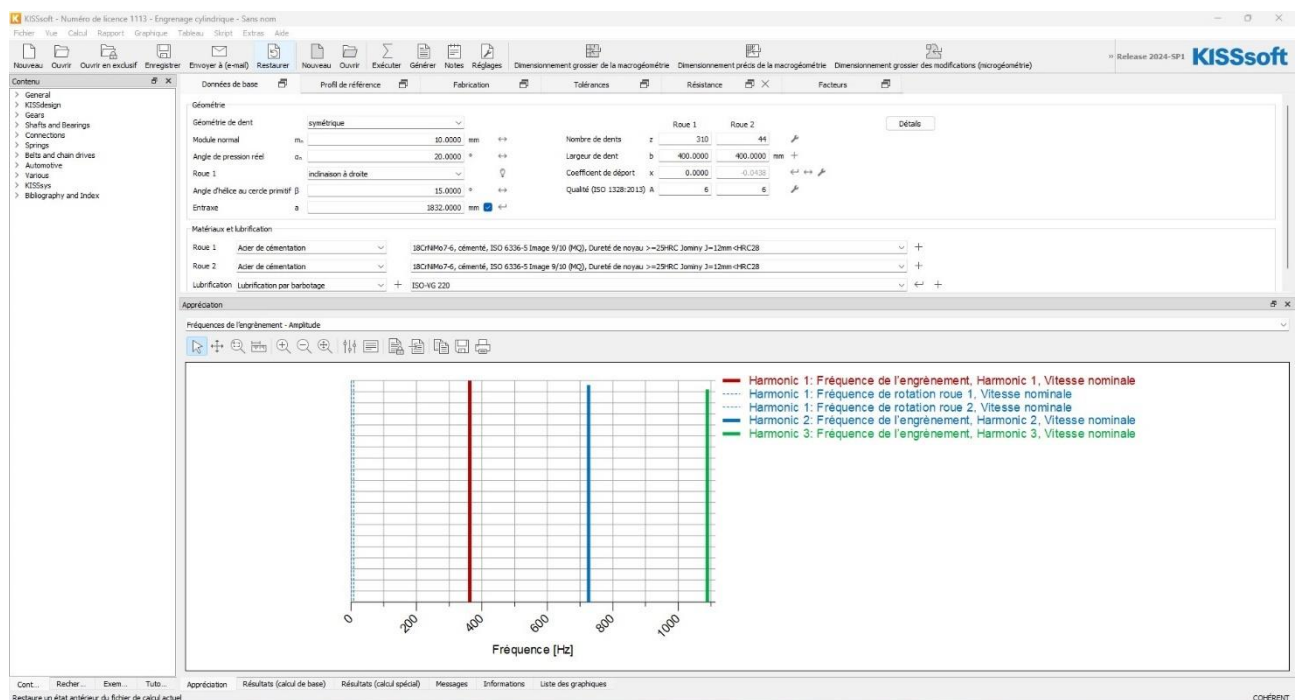


Figure III.9 : Résultats KISSsoft de l'étage grande vitesse (GV) – vue détaillée

2.3.2. Étage Petite Vitesse (PV)

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

Cet étage relie l'arbre intermédiaire à l'arbre de sortie.

- **Vitesse de l'arbre 2 (Intermédiaire) :** $n_2 = 70,2 \text{ tr/min}$
- **Nombre de dents du pignon :** $z_3 = 42$
- **Calcul de la fréquence d'engrènement ($f \times z_2$) :**
- **Analyse :** La fréquence de **49,14 Hz** est basse. Cependant, comme cet étage transmet le couple le plus élevé, l'amplitude des vibrations peut être significative. Le profil hélicoïdal est ici crucial pour réduire l'impact dynamique [18].

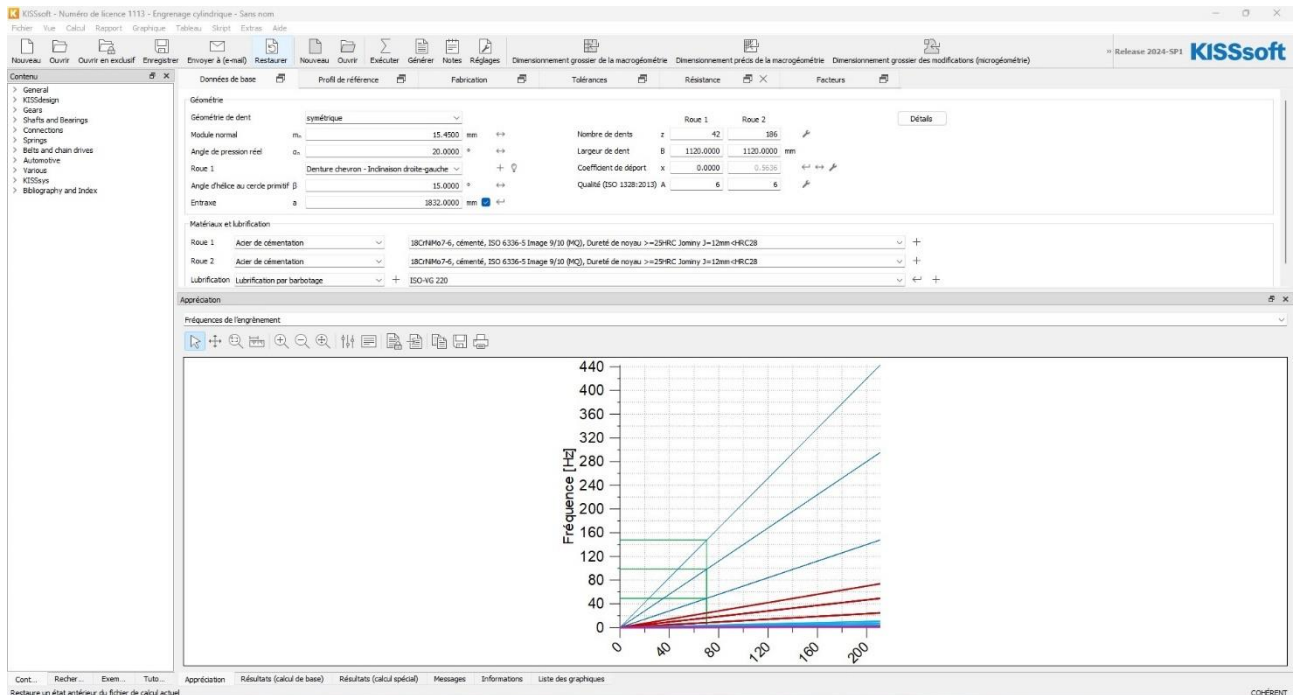


Figure III.10 : Simulation KISSsoft de la fréquence d'engrènement de l'étage petite vitesse (PV = 49,14 Hz)

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

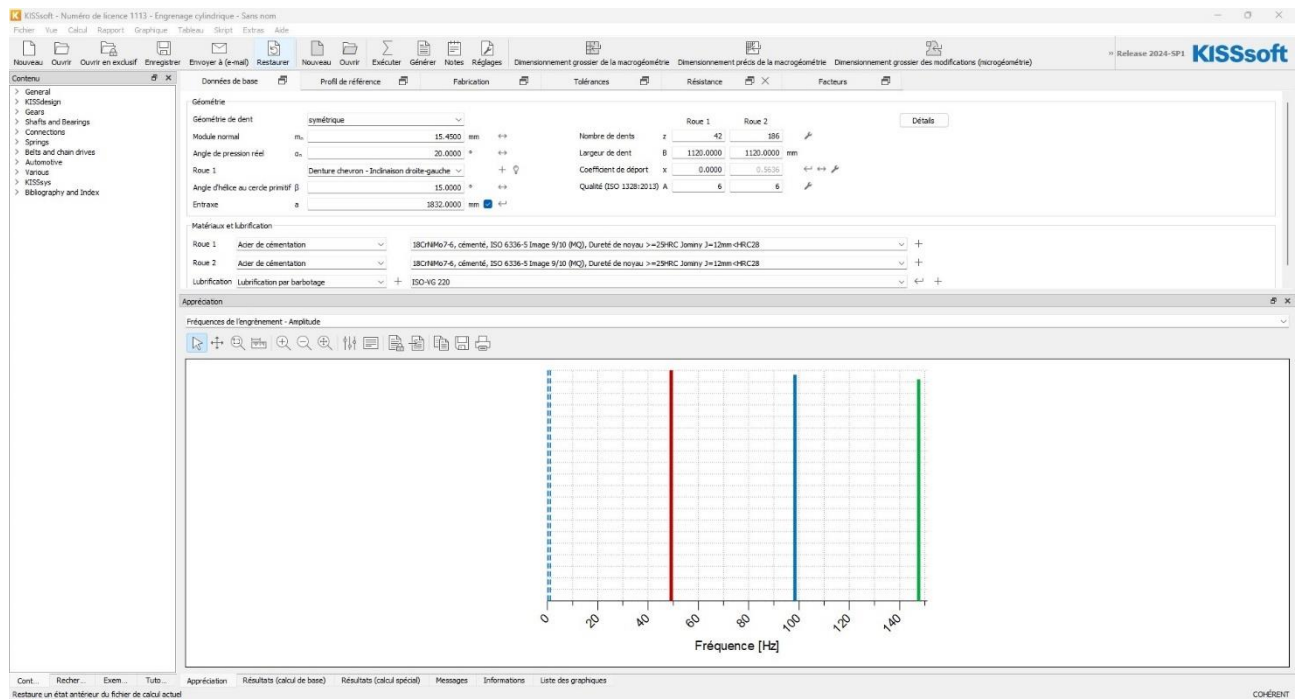


Figure III.11 : Résultats KISSsoft de l'étage petite vitesse (PV) – vue détaillée

2.3.3. Synthèse des résultats

Le tableau suivant récapitule les fréquences d'excitation par étage selon les vitesses fournies :

Composant	Vitesse (n)	Dents (z)	Fréquence (fz)
Pignon GV	495,0 tr/min	44	363,0 Hz
Roue GV	70,2 tr/min	310	363,0 Hz
Pignon PV	70,2 tr/min	42	49,14 Hz
Roue PV	15,85 tr/min	186	49,14 Hz

Tableau III.8 : Synthèse des fréquences d'engrènement par étage du réducteur SYMETRO [18].

3. Conclusion.

La simulation numérique sous KISSsoft et l'analyse fréquentielle confirment la stabilité dynamique du multiplicateur. Les fréquences d'engrènement et les fréquences caractéristiques des roulements restent dans des plages de fonctionnement sécurisées, garantissant ainsi une réduction des risques de défaillance par fatigue ou résonance."

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

1.Introduction

Dans cette partie nous allons étudier les comportements vibratoires de la chaîne cinématique du broyeur de clinker donc leurs états mécaniques et la mise en marche des appareils de diagnostic.

2. Instrumentation et chaîne de mesure

2.1 Présentation du Collecteur analyseur

Le VB8 (Commtest) est un analyseur portable de vibrations utilisé en maintenance industrielle pour :

- Surveiller l'état des machines tournantes (moteurs, réducteurs, ventilateurs...)
- Détecter les défauts (déséquilibre, désalignement, roulements défectueux...)
- Réaliser des diagnostics via spectre FFT, forme d'onde, enveloppe, etc.

C'est un outil clé en maintenance conditionnelle (predictive maintenance) [1], [5].

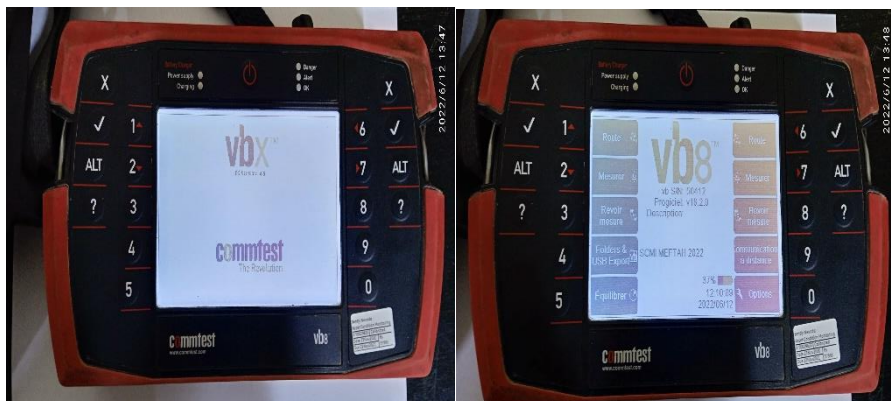


Figure IV.1 : Collecteur-analyseur portable de vibrations VB8 (Commtest)

b. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement repose sur 3 étapes principales :

- Acquisition du signal : Un accéléromètre est fixé sur la machine afin de capter les vibrations mécaniques et les convertir en signal électrique exploitable.
- Traitement du signal : Le VB8 transforme le signal analogique en signal numérique, puis l'analyse est réalisée à l'aide de la FFT pour obtenir le spectre fréquentiel, du calcul RMS et Peak pour évaluer les niveaux globaux, ainsi que de la méthode d'enveloppe pour détecter les défauts de roulements.
- Interprétation : Les résultats sont comparés à des seuils de référence (normes ISO et alarmes), ce qui permet d'identifier les défauts à partir des fréquences caractéristiques [17].

Chapitre III : Simulation, modélisation et analyse des résultats

c. Paramétrage (réglages principaux)

Les paramètres essentiels à configurer dans le VB8 sont les suivants :

- Paramètres de mesure : Le système utilise un accéléromètre (mV/g) pour capter les vibrations. Les unités d'analyse peuvent être la vitesse (mm/s), l'accélération (g) ou le déplacement (μm). La plage de fréquence F_{max} est choisie selon la machine (ex : 1 kHz, 5 kHz ou 10 kHz). La résolution FFT varie généralement entre 800, 1600 et 3200 lignes.
- Paramètres d'analyse : Les mesures peuvent être réalisées en domaine fréquentiel (Spectrum FFT), temporel (Waveform) ou par enveloppement pour l'analyse des roulements. Un fenêtrage de type Hanning est le plus utilisé afin de réduire les erreurs spectrales. Un moyennage de 2 à 4 acquisitions est appliqué pour stabiliser le signal. Les alarmes sont définies avec des seuils Warning et Danger, basés sur les normes ISO 10816/20816 et l'historique de la machine [17].
- Paramètres machine : Ils incluent la vitesse de rotation (RPM), le type de machine et les points de mesure (axial, radial, etc.). Ces paramètres sont essentiels pour identifier les fréquences caractéristiques telles que 1X, 2X, BPFO et BPFI [17].

d. Exemple d'application :

Pour un concasseur ou ventilateur :

- F_{max} : 5 à 10 kHz
- Mesure : vitesse (mm/s RMS)
- Enveloppe : activée pour roulements
- Alarmes selon criticité

2.2 Capteur de Vibration – Accéléromètre 100 mV/g [17]

Un accéléromètre 100 mV/g est un capteur de vibration qui mesure l'accélération mécanique d'une machine et la convertit en signal électrique proportionnel.

La sensibilité 100 mV/g signifie :

- 1 g ($\approx 9.81 \text{ m/s}^2$) $\rightarrow$ 100 mV (0.1 Volt)
- Donne 2 g $\rightarrow$ 200 mV , 0.5 g $\rightarrow$ 50 Mv [15].



Figure IV.2 : Chaîne de mesure vibratoire avec le VB8 et l'accéléromètre

b. Principe de fonctionnement

Le capteur fonctionne généralement selon le principe piézoélectrique en suivant les étapes suivantes :

1. La vibration de la machine provoque le mouvement interne d'une masse.
2. Cette masse exerce une force sur un cristal piézoélectrique.
3. Le cristal génère une charge électrique proportionnelle à la force appliquée.
4. Le signal électrique est ensuite conditionné pour fournir une sortie en mV proportionnelle à l'accélération.

Le collecteur de données VB8 récupère ce signal afin de réaliser différentes analyses vibratoires, notamment l'analyse spectrale par FFT et l'analyse d'enveloppe pour la détection des défauts mécaniques [15].

c. Caractéristiques principales

- Sensibilité : 100 mV/g (standard industrie)
- Plage de fréquence : typiquement : 2 Hz → 10 kHz (selon modèle)
- Type : IEPE (alimenté par l'analyseur)
- Sortie : signal analogique (mV)
- Montage : vissé (stud) meilleur, aimant moins précis, collé (époxy) [15].

d. Paramétrage dans le VB8

PARAMÈTRE	VALEUR
Sortie du capteur	Vibration dynamique (IEPE)
Sensibilité	100 mV/g
Tolérance de sensibilité	±5 %.

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

Réponse en fréquence	0,4 Hz - 14 000 Hz
Filetage de montage	Trou taraudé 1/4-28 UNF
Style de connecteur	MIL-C-5015, 2 broches
Orientation du connecteur	Sortie par le haut
Plage de pleine échelle	80 g crête
Fréquence de résonance	30 kHz
Plage de température	-55°C à +120°C
Poids	62 grammes
Homologations pour les zones dangereuses	Classe I, Div 2, Zone 2 ; ATEX II 3G Ex Na



Figure IV.3 : Accéléromètre piézoélectrique 100 mV/g [15], [17].

2.3 Logiciel d'analyse: System 1 (Bently Nevada)

Le logiciel **System 1** de **Bently Nevada** est une plateforme avancée de surveillance et d'analyse conditionnelle des machines tournantes. Il permet l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données vibratoires en temps réel, ainsi que le suivi de l'état de santé des équipements industriels. Grâce à ses outils de diagnostic avancés (spectres, tendances, alarmes et rapports), il facilite la détection précoce des défauts mécaniques et électromécaniques et contribue à la mise en œuvre d'une maintenance conditionnelle efficace [20].

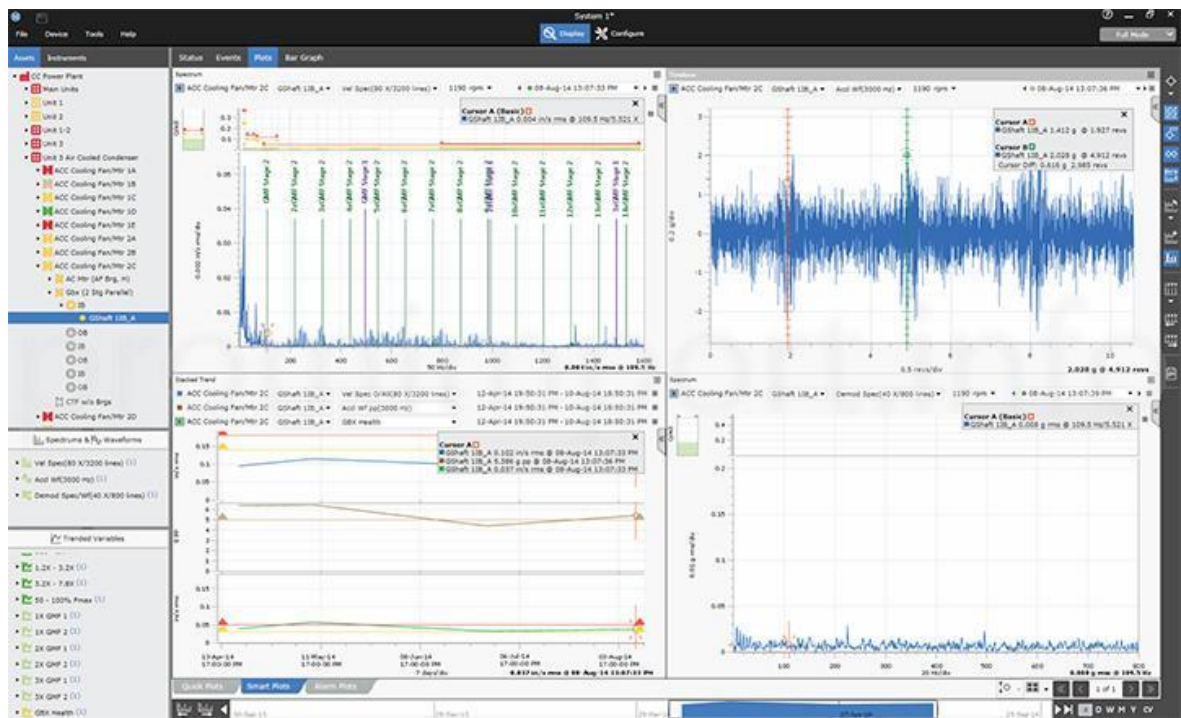


Figure IV.4 : Interface du logiciel de surveillance

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

b. Principe de fonctionnement

Le logiciel est connecté à un système de surveillance vibratoire en ligne permettant de suivre en permanence l'état des machines. Les données sont d'abord acquises par différents capteurs tels que les accéléromètres, les sondes de proximité et les capteurs de vitesse. Ces capteurs sont généralement reliés à un système de surveillance comme le Bently Nevada 3500.

Les informations mesurées sont ensuite transmises en temps réel au logiciel System 1, où elles sont stockées et traitées automatiquement. Le logiciel réalise plusieurs types d'analyses vibratoires, notamment l'analyse spectrale FFT, le suivi des tendances d'évolution des paramètres, l'analyse des orbites pour les machines équipées de paliers lisses ainsi que l'analyse d'enveloppe destinée à la détection précoce des défauts.

Grâce à ces traitements, le système peut identifier différents problèmes mécaniques tels que le déséquilibre, le désalignement, les instabilités du rotor et les défauts de roulements.

Parmi ses principales fonctionnalités, System 1 permet de visualiser les spectres FFT, les formes d'onde temporelles, les orbites des arbres tournants et les diagrammes en cascade (Waterfall). Il assure également une surveillance continue des équipements 24 heures sur 24, avec des alarmes automatiques en cas de dépassement des seuils définis et un historique complet des données pour le suivi de l'évolution des machines.

Le logiciel dispose également de fonctions avancées de diagnostic qui facilitent l'interprétation des données vibratoires et la prise de décision en maintenance. Grâce à des outils intelligents d'aide au diagnostic, il permet d'identifier automatiquement les fréquences caractéristiques associées aux différents défauts mécaniques et d'effectuer des corrélations entre plusieurs capteurs afin d'obtenir une vision globale de l'état de la machine.

Par ailleurs, le logiciel assure le suivi des tendances (trending) en enregistrant l'évolution des niveaux vibratoires au cours du temps. Cette fonctionnalité permet de détecter progressivement les dégradations des équipements, d'anticiper l'apparition des pannes et de planifier les interventions de maintenance avant qu'une défaillance critique ne survienne [20].

d. Paramétrage principal

Le paramétrage de System 1 commence par la configuration des machines (turbine, moteur, compresseur...), incluant la vitesse de rotation (RPM) et le nombre de paliers. Ensuite, les capteurs sont définis : accéléromètre (100 mV/g) ou sonde de proximité (μm), avec leur position (axiale ou radiale). Les alarmes sont réglées avec deux niveaux (Alert et Danger) basés sur les normes ISO et les recommandations constructeur. Enfin, les paramètres d'analyse incluent la bande de fréquence, le type d'analyse (FFT, orbit...) et le filtrage.

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

System 1 permet une surveillance continue, une grande précision pour les machines critiques, un historique complet des données et un diagnostic avancé de niveau expert.

Le système est coûteux, son installation est complexe et il nécessite une instrumentation complète et permanente.

System 1 est principalement utilisé pour les turbines mais aussi pour les gros ventilateurs ID/FD, les broyeurs critiques et les réducteurs importants. Dans la cimenterie, le VB8 est utilisé pour les contrôles périodiques tandis que System 1 est réservé aux machines stratégiques.

System 1 est un logiciel de monitoring continu connecté à des capteurs fixes, permettant la détection précoce des défauts et un diagnostic avancé des machines [20].

3. Protocole de mesure sur le réducteur:

3.1. Identification des points de mesure (Paliers GV et MV).

3.1.1. Définition des paliers GV et BV

Sur un réducteur Symetro (type Flender), les mesures vibratoires doivent être réalisées au niveau des paliers (bearings), car ce sont les zones les plus sensibles aux défauts [1].

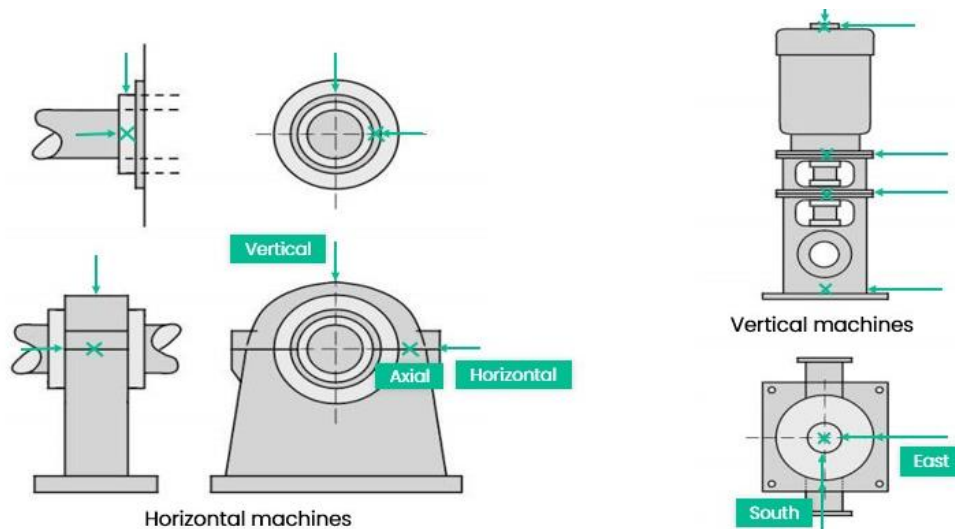


Figure IV.5 : Schéma cinématique de la chaîne d'entraînement et points de mesure (01 à 07)

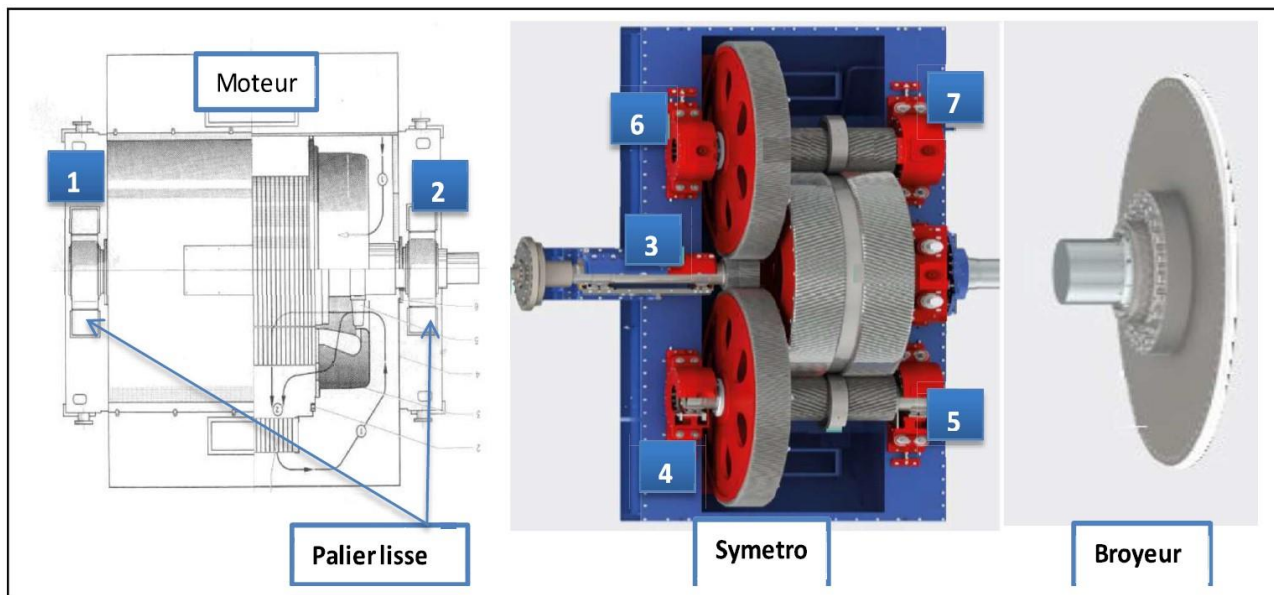
3.1.2. Points principaux

Figure IV.6 : Points de mesure sur la chaîne cinématique (Paliers GV, MV et BV)

a. Points sur le moteur : Paliers lisses 01 et 02

b. Points sur le réducteur

1. Arbre Grande Vitesse (GV) 03 :

- Palier côté accouplement moteur
- Palier opposé

Cette zone est critique pour :

- Déséquilibre
- Désalignement
- Défaut roulements

2. Arbre Moyenne Vitesse (MV) 04 ,05, 06, et 07

- Palier amont
- Palier aval

Cette zone est importante pour la surveillance de :

- Engrenages intermédiaires
- Défauts de transmission

3. Arbre Basse Vitesse (BV)

Palier coussinet

Cette zone est sensible aux:

- Défaut lubrification
- Instabilité (whirl / whip)
- Usure du film d'huile

Chaque palier contient au moins 2 à 3 points de mesure

3.2. Directions de mesure

Pour chaque point, il faut mesurer dans plusieurs directions pour capter tous les défauts [17].

A. Direction Radiale

- Horizontale (H)
- Verticale (V)

Permet de détecter :

- Déséquilibre
- Défauts d'engrenages
- Défauts roulements

B. Direction Axiale (A)

- Parallèle à l'axe de rotation

Permet de détecter :

- Désalignement
- Jeux axiaux
- Défauts d'accouplement [1].

C. Schéma pratique

Pour chaque palier, on effectue généralement trois mesures vibratoires : une mesure horizontale, une verticale et une axiale.

Ainsi, pour les GV (gros ventilateurs), avec 4 paliers et 3 directions, on obtient 12 points de mesure. Pour les MV (moyens ventilateurs), on a également 4 paliers et donc 12 points de mesure. En revanche, pour les BV, aucune mesure n'est réalisée dans ce cas.

En bonnes pratiques en cimenterie, il est essentiel de toujours mesurer au même endroit afin d'assurer la répétabilité des résultats. La surface de mesure doit être propre avant la pose du capteur. Il est recommandé d'utiliser un montage par vissage, qui offre la meilleure qualité de mesure, ou un aimant, qui reste

Expérimentations et collecte des données sur site

acceptable. Il faut éviter les surfaces peintes épaisses ainsi que les zones non rigides qui peuvent fausser les mesures.

Concernant le cas spécifique du système Symetro, le palier BV (coussinet) nécessite une attention particulière. On privilégie la mesure du déplacement en micromètres ou de la vitesse, avec une surveillance axée sur les basses fréquences et les instabilités hydrodynamiques.

En résumé, les points de mesure correspondent aux paliers des GV, MV et BV, avec des directions horizontale, verticale et axiale. Le minimum recommandé est de trois mesures par palier afin de détecter efficacement tous les types de défauts mécaniques [17].

4. Analyse des données

4.1 Seuils d'Évaluation des Vibrations Mécaniques (Norme ISO10816)

Le tableau ci-dessous est un guide d'évaluation de la sévérité vibratoire pour différentes classes de machines industrielles selon ISO 10816. Il permet de diagnostiquer l'état de santé d'une machine en fonction de sa vitesse vibratoire efficace (**RMS**) [16], [3].

								mm/s rms	inch/s rms	Vitesse de vibration RMS	10-1000 Hz r > 600 rpm 2-1000 Hz r > 120 rpm
rigide	flexible	rigide	flexible	rigide	flexible	rigide	flexible				
pompes > 15 kW radial, axial, diagonal				medium sized machines 15 kW < P < 300kW		large machines 300 kW < P < 50MW		Foundation			
Entraînement direct		Arbre intermédiaire / Entraînement courroie		Motors 160 mm < H < 315 mm		Motors 315 mm < H		Type de Machine			
Groupe 4		Groupe 3		Groupe 2		Groupe 1		Groupe			

A

New machine condition

C

Short-term operation allowable

B

Unlimited long-term operation allowable

D

Vibration causes damage

Tableau IV.1 : Tableau récapitulatif des mesures de vibration globale (ISO 10816)

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

a. Classification des Machines (Groupes) :

- **Groupe 1** : Grandes machines de puissance élevée ($300\text{kW} < P < 50\text{MW}$).
- **Groupe 2** : Machines de taille moyenne ($15\text{kW} < P < 300\text{kW}$).
- **Groupe 3 & 4** : Pompes à entraînement direct ou par courroie ($P > 15\text{kW}$).
- **Fondation** : Distinction entre supports rigides (stables) et flexibles (plus de tolérance aux vibrations).

b. Zones d'Évaluation (Légende) :

- **Zone A (Vert)** : État d'une machine neuve ou après révision. Excellente condition.
- **Zone B (Jaune)** : Fonctionnement à long terme illimité autorisé. Condition acceptable.
- **Zone C (Orange)** : Fonctionnement à court terme autorisé uniquement. Nécessite une surveillance et une maintenance prochaine.
- **Zone D (Rouge)** : Danger imminent. Les vibrations sont susceptibles de causer des dommages. Un arrêt de la machine est recommandé.

Le graphique affiche les seuils en deux unités : mm/s rms : Unité métrique standard et inch/s rms : Unité impériale.

Les seuils varient selon que la machine est fixée sur une base rigide ou flexible, car une structure flexible absorbe naturellement une partie de l'énergie vibratoire sans endommager les composants internes [16].

4.2. Schéma cinématique

La vitesse de moteur est 495 tr/mn et la vitesse de sortie de réducteur est 15.85 tr/mn. Les points énumérés de 01 à 07 sur le schéma cinématique de la commande sont les points de prélèvement des mesures de vibrations

4.3Analyse de niveau global :

L'Analyse de Niveau Global est la première étape du diagnostic vibratoire. Elle consiste à mesurer l'énergie totale des vibrations (exprimée en mm/s RMS pour la vitesse et en g RMS pour l'accélération) afin d'évaluer l'état de santé général de la machine par rapport à des seuils normatifs (comme l'ISO 10816).

- Vitesse (mm/s) : Indique les problèmes de basse fréquence (balourd, désalignement).
- Accélération (g) : Indique les problèmes de haute fréquence (roulements, engrenages).

Le tableau de mesures montre une situation globalement stable, mais avec un point de vigilance spécifique sur l'unité motrice selon la norme ISO 10816. [20].

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

Sev.	Point	Date	Mes-1 (mm/s) rms	Mes (mm/s) rms	Diagnostic	Mes-1 (g) rms	Mes (g) rms	Diagnos tic
Moteur	P1-H	01 DEC 2025	1,897 mm/s	1.242 mm/s	BON	0,231 g	0.208 g	BON
	P1-V	01 DEC 2025	0,936 mm/s	1.109 mm/s	BON	0,191 g	0.302 g	BON
	P2-H	01 DEC 2025	1,527 mm/s	1.046 mm/s	BON	0,196 g	0.195 g	BON
	P2-V	01 DEC 2025	1,700 mm/s	1.686 mm/s	BON	0,194 g	0.174 g	BON
	P2-A	01 DEC 2025	4,063 mm/s	3.519 mm/s	ALARME	0,579 g	0.307 g	BON
Réducteur SYMETRO)	P3-H	01 DEC 2025	0,743 mm/s	0.711 mm/s	BON	0,212 g	0.195 g	BON
	P3-V	01 DEC 2025	0,669 mm/s	0.591 mm/s	BON	0,245 g	0.264 g	BON
	P3-A	01 DEC 2025	0,647 mm/s	0.591 mm/s	BON	0,140 g	0.103 g	BON
	P4-H	01 DEC 2025	0,589 mm/s	0.548 mm/s	BON	0,078 g	0.068 g	BON
	P4-V	01 DEC 2025	0,321 mm/s	0.303 mm/s	BON	//	0.129 g	BON
	P5-H	01 DEC 2025	0,422 mm/s	0.503 mm/s	BON	0,065 g	0.163 g	BON
	P5-V	01 DEC 2025	0,293 mm/s	0.3245 mm/s	BON	0,128 g	0.214 g	BON
	P6-H	01 DEC 2025	0,600 mm/s	0.507 mm/s	BON	0,180 g	0.108 g	BON
	P6-V	01 DEC 2025	0,307 mm/s	0.249 mm/s	BON	0,091 g	0.094 g	BON
	P7-H	01 DEC 2025	0,543 mm/s	0.628 mm/s	BON	0,197 g	0.239 g	BON
	P7-V	01 DEC 2025	0,281 mm/s	0.256 mm/s	BON	0,097 g	0.105 g	BON

Tableau IV.2 : Synthèse et diagnostic final par composant (Moteur / Réducteur SYMETRO)

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

A. Etat de santé du moteur : Point critique en zone d'alarme

- Observation : Alors que les points radiaux (P1-H, P1-V, etc.) sont en zone "BON", le point P2-A (Axial) affiche une valeur de 3,519mm/s.
- Interprétation : Bien qu'il y ait une amélioration par rapport à la mesure précédente (4,063mm/s), ce point reste en ALARME. Une vibration élevée en position axiale est un indicateur classique de désalignement ou d'un problème de poussée anormale sur les roulements.
- Accélération : Les valeurs en g sont faibles (0,307g), ce qui suggère que les roulements ne sont pas encore gravement endommagés, mais subissent une contrainte mécanique [20].

B. L'état de santé du réducteur (SYMETRO) : État Satisfaisant

- Observation : Tous les points (P3 à P7) sont en zone "BON".
- Interprétation : Les niveaux de vibration sont très bas (moyenne < 1mm/s). Le réducteur présente une excellente rigidité et un engrènement sain. Aucune action corrective n'est requise sur cette unité.

3. Synthèse et diagnostic final

Composant	État global	Diagnostic du niveau global
Moteur	ALERTE	Sévérité axiale élevée au point P2. Probable défaut de lignage ou contrainte d'accouplement.
Réducteur	BON	Condition stable. Fonctionnement optimal des organes internes.

4. Recommandations de maintenance

1. Analyse de Spectre (FFT) : Effectuer une analyse spectrale sur le point P2-A pour confirmer s'il s'agit d'un désalignement (pic à 1x ou 2x la fréquence de rotation).
2. Contrôle de l'Alignement : Vérifier l'alignement entre le moteur et le réducteur lors du prochain arrêt technique.
3. Surveillance Rapprochée : Maintenir la périodicité des mesures pour surveiller l'évolution de la tendance au point P2.

Résultat de diagnostic : La machine est opérationnelle, mais le moteur nécessite une attention particulière pour éviter une dégradation vers la "Zone D" (Dommages) du standard de vibration.

4.4 Analyse de Spectre par FFT

4.4.1. Analyse des signaux issus du moteur électrique (Paliers P1 et P2)

L'analyse approfondie du point **P2-A**, qui présentait un niveau global en alerte (3,519mm/s), permet d'identifier l'origine exacte du phénomène vibratoire [20].

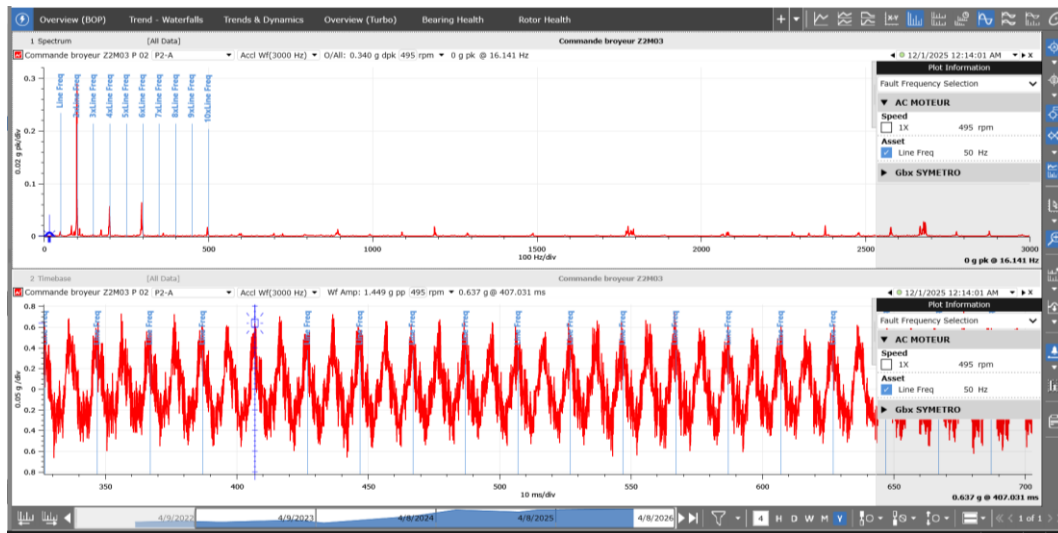


Figure IV.7 : Signal temporel du palier P2-A (Moteur – direction axiale)

a. Analyse temporelle

Le signal temporel (partie inférieure de l'image) montre l'évolution de l'amplitude en fonction du temps.

- Observation : On observe une forme d'onde périodique et régulière, marquée par des chocs ou des impulsions répétitives.
- Interprétation : La présence de battements ou d'une modulation régulière dans le signal temporel est souvent le signe précurseur d'un défaut électromécanique. L'amplitude crête-à-crête (1,449 g pp) confirme une activité dynamique significative sur le palier N°2 [20].

b. Analyse fréquentielle (Spectre)

L'analyse spectrale (FFT) convertit le signal temporel en fréquences pour isoler les causes du défaut.

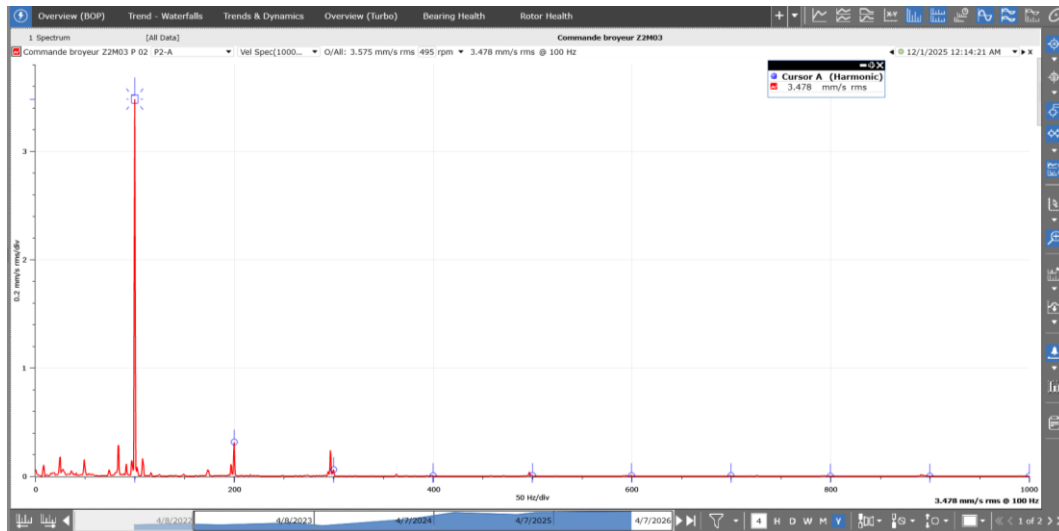


Figure IV.8 : Spectre FFT du palier P2-A révélant le défaut électrique à 100 Hz (2×Fline)

Mise en évidence du défaut électrique (2xFlne)

Sur le spectre, un pic dominant apparaît très clairement :

- **Fréquence du pic :** Le curseur est positionné sur **100Hz**.
- **Lien avec le réseau :** Sachant que la fréquence de ligne est de 50Hz (Line Freq), ce pic correspond exactement à **2 F line** (deux fois la fréquence du réseau électrique).
- **Diagnostic :** L'émergence d'un pic à **100 Hz** (2 F L) est caractéristique d'un **défaut d'origine électrique**. Cela peut être dû à :
 - Une dissymétrie du champ magnétique (entrefer irrégulier).
 - Un défaut d'isolement ou des barres de rotor endommagées.
 - Une distorsion du stator sous l'effet des forces magnétiques [20].

Harmoniques et Vitesse de rotation

- On note également des harmoniques de la fréquence de ligne (Line Freq) sur le spectre d'accélération (150Hz, 200Hz, 250Hz, etc.).
- La vitesse de rotation du moteur est de **495 RPM** (8,25 Hz). Le fait que le défaut soit dominé par le 100 Hz plutôt que par la vitesse de rotation (1 x) confirme que la cause est plus **électrique** que mécanique (comme un balourd).

Synthèse de la Figure 3.11

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

Le spectre montre une prédominance absolue de la composante à **100 Hz** (3,478 mm/s RMS), ce qui représente la quasi-totalité du niveau global mesuré. Ce pic est synchronisé avec le double de la fréquence électrique de ligne (2 x 50 Hz), confirmant ainsi un **problème électromagnétique** au niveau du moteur, localisé principalement sur le palier N°2.

Recommandation : Il est conseillé de vérifier l'état des fixations du moteur (serrage) et de réaliser un test de coupure électrique : si la vibration disparaît instantanément à la coupure du courant, le défaut est purement électromagnétique.

4.4.2. Analyse du réducteur

I. (Palier P3)

L'analyse vibratoire du réducteur au niveau du palier P3 (côté entrée) permet d'évaluer la qualité de l'engrènement et l'état des roulements. Contrairement au moteur, les niveaux ici sont jugés **satisfaisants** (Zone BON).

a. Analyse temporelle

L'analyse temporelle consiste à observer l'évolution de l'amplitude de l'accélération dans le temps afin de détecter d'éventuels chocs ou anomalies cycliques liés aux engrenages ou aux roulements.

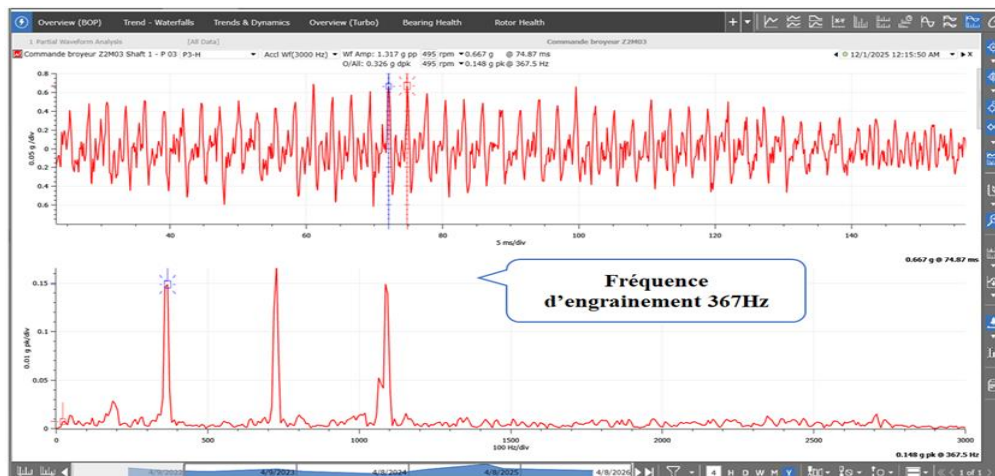


Figure IV.9 : Signal temporel du palier P3-H

- **Observation du signal :** Le signal temporel acquis sur le palier P3-H présente une allure périodique stable, caractéristique d'un engrènement régulier. On n'observe pas de pics de chocs aléatoires ou de modulations d'amplitude excessives qui pourraient signaler une dent cassée ou un écaillage sévère.
- **Amplitude de crête (Amp) :** La valeur de crête (Peak) mesurée au niveau du curseur est de **0,667g**.
- **Interprétation :** Cette valeur d'accélération reste modeste pour un réducteur de ce type (Commande broyeur Z2M03). Une amplitude de **0,667 g** indique que l'énergie libérée lors du contact entre les dents est faible, ce qui est le signe d'une cinématique d'engrènement bien conservée et d'une

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

lubrification efficace du contact [20].

Conclusion temporelle : L'état de choc est jugé faible, le palier 03 ne présente aucune anomalie temporelle suspecte, confirmant la bonne santé mécanique de cette section du réducteur.

b. Analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle (spectre FFT) permet d'identifier les composantes vibratoires dominantes et de les associer à des phénomènes mécaniques précis. Sur le palier P3, l'énergie est principalement concentrée sur la fréquence d'engrènement (**GMF - Gear Mesh Frequency**).

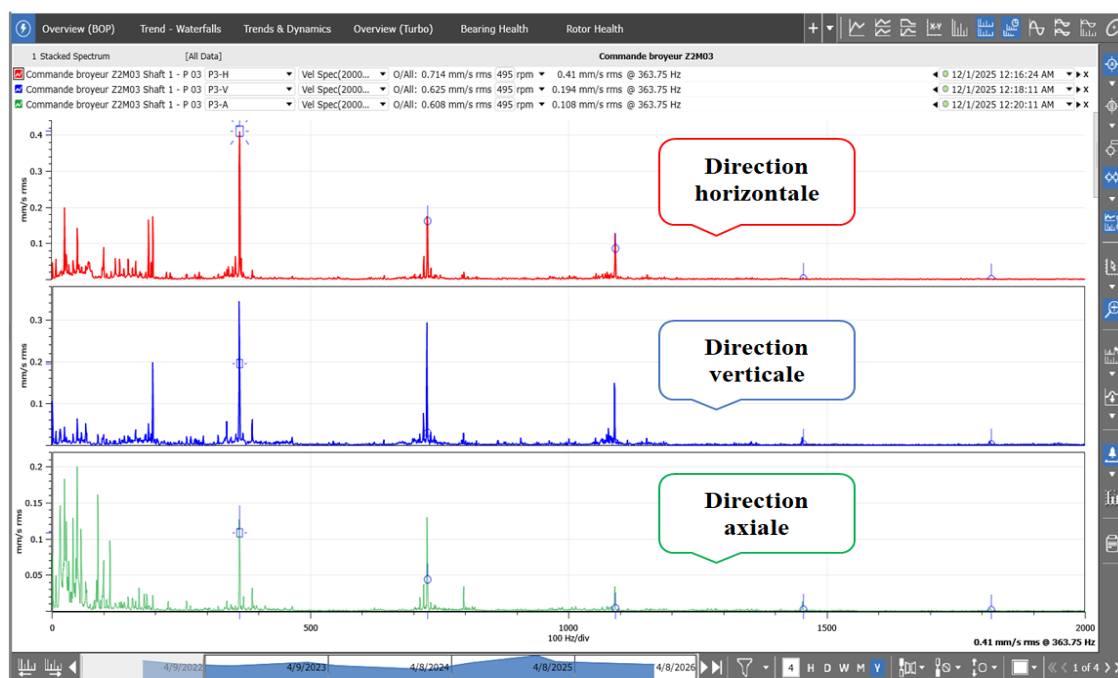


Figure IV.10 : Spectre FFT du palier P3 avec fréquence d'engrènement GV

Résultats des mesures à la fréquence dominante (363,75Hz) :

- Direction horizontale : 0,41 mm/s RMS (Amplitude maximale)
- Direction verticale : 0,194 mm/s RMS
- Direction axiale : 0,108 mm/s RMS

Interprétation des spectres :

1. **Identification du pic principal :** Le pic dominant à **363,75 Hz** correspond à la fréquence d'engrènement des pignons du réducteur. La présence de ce pic est normale, et son amplitude reste extrêmement faible dans les trois directions (largement en dessous des seuils de sévérité de la norme

ISO 10816) [20].

2. Analyse des directions :

- La prédominance du niveau **horizontal** (0,41mm/s) est courante sur ce type de machine, car la structure offre généralement moins de rigidité dans le plan horizontal.
- Le faible niveau en direction **axiale** (0,108mm/s) confirme l'absence de défaut d'alignement des arbres ou de poussée anormale entre les dentures.

3. Harmoniques : On observe également des harmoniques de faible énergie (multiples de la GMF), ce qui témoigne d'un engrènement sain sans distorsion majeure du signal [20].

Le spectre ne présente aucun pic anormal ou bandes latérales suspectes. L'état cinématique du réducteur au niveau du palier P3 est jugé excellent [20].

II. (Palier P4)

a. Analyse temporelle

L'analyse du signal temporel sur le palier N°04 (Arbre 2) permet d'observer le comportement dynamique de l'engrènement sous un angle différent du palier précédent.

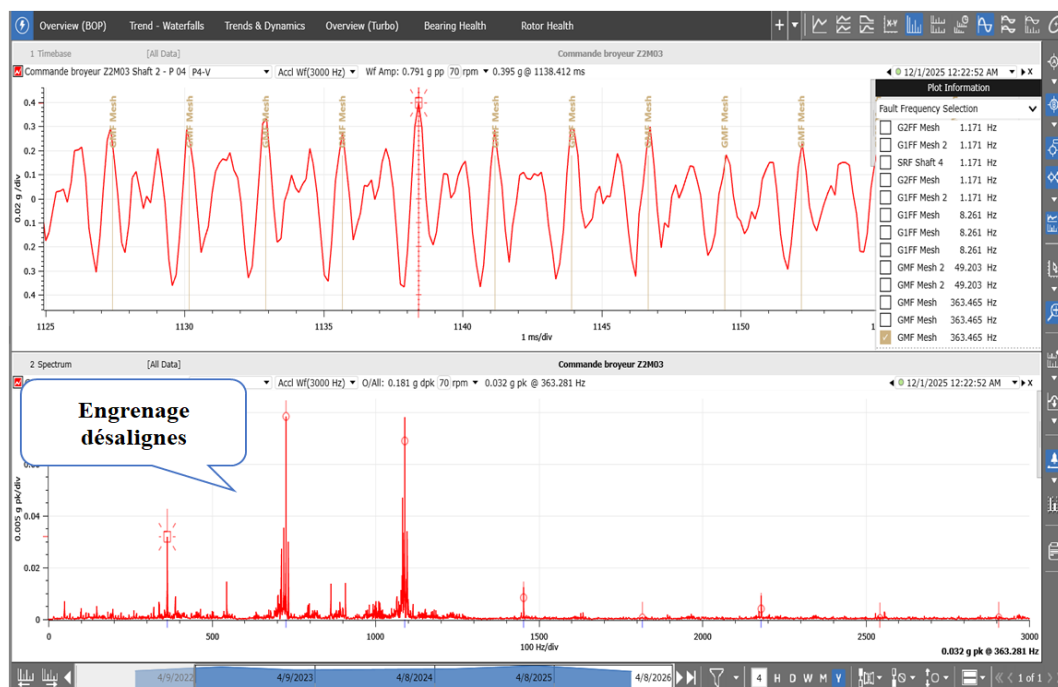


Figure IV.11 : Signal temporel du palier P4

- **Observation du signal :** Le signal temporel montre une forme d'onde complexe avec une répétitivité marquée des pics d'accélération. On note une modulation de l'amplitude qui semble correspondre aux cycles d'engrènement (**GMF Mesh**).

- **Amplitude de crête :** La valeur mesurée au curseur est de **0.395 g**, avec une amplitude crête-à-crête globale de **0,791 g pp**.
- **Vitesse de rotation :** L'arbre tourne à une vitesse de **70 RPM**, ce qui est une vitesse lente, rendant les impacts temporels particulièrement significatifs pour le diagnostic [20].

Interprétation :

Bien que l'amplitude de 0,395 g reste techniquement faible en termes de sévérité absolue, la morphologie du signal présente des irrégularités. La mention "Engrenage désaligné" sur votre capture d'écran suggère que la répartition de la charge sur la largeur de la denture n'est pas uniforme.

En analyse temporelle, un désalignement des engrenages se manifeste souvent par :

1. Une modulation de l'amplitude du signal à la fréquence de rotation de l'arbre.
2. Une énergie d'impact légèrement plus erratique que sur un engrenement parfaitement parallèle.

Le palier 04 présente une signature temporelle stable mais caractéristique d'une sollicitation mécanique spécifique. L'amplitude des chocs reste maîtrisée ($< 0,5g$), ce qui indique que le défaut (désalignement) est à un stade initial ou léger, ne présentant pas de danger immédiat pour l'intégrité des dents [20].

b. Analyse fréquentielle

L'analyse spectrale du palier P4 permet d'étudier la répartition de l'énergie vibratoire en fonction des fréquences, particulièrement pour les phénomènes de haute fréquence liés à l'engrènement.

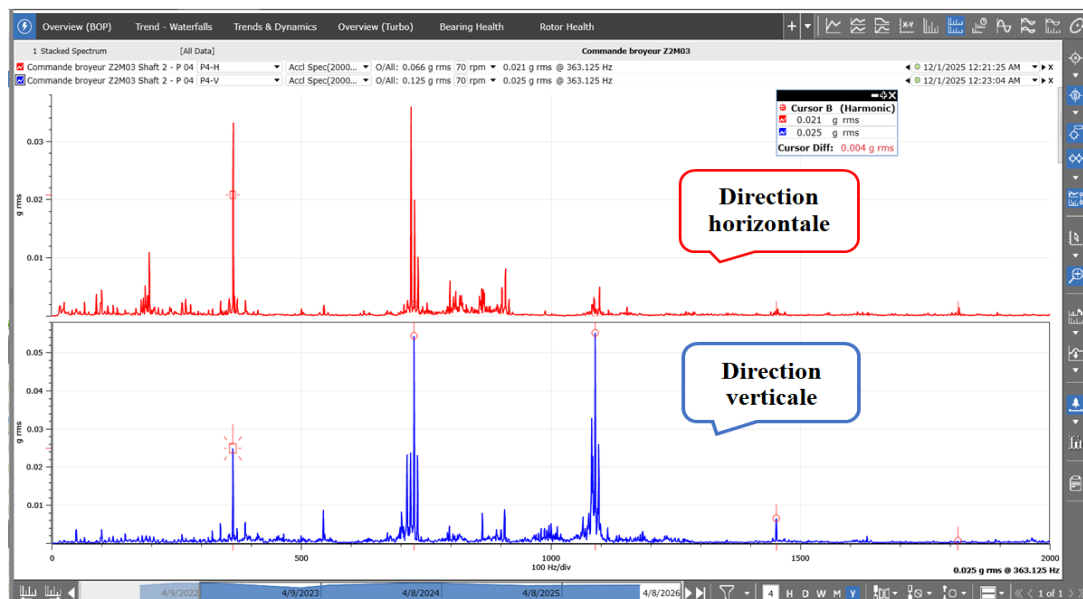


Figure IV.12 : Spectre FFT du palier P4 avec harmoniques GMF et bandes latérales

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

Données extraites des spectres (Accélération RMS) :

- Direction Horizontale (P4-H) : 0,021 g RMS à 363,125 Hz.
- Direction Verticale (P4-V) : 0,025 g RMS à 363,125 Hz.
- Écart mesuré (Cursor Diff) : 0,004 g RMS.

Interprétation:

1. **Fréquence d'engrènement (GMF) :** Le pic identifié à **363,125 Hz** correspond à la fréquence d'engrènement de ce train d'engrenages. On observe également ses harmoniques (2 et 3 GMF) à environ 726 Hz et 1089 Hz.
2. **Stabilité de l'amplitude :** Les niveaux d'accélération mesurés sont extrêmement faibles ($< 0,03$ g RMS). Cela confirme que, malgré le léger soupçon de désalignement mentionné en analyse temporelle, l'énergie vibratoire générée reste très basse.
3. **Comparaison des directions :** Contrairement au palier P3, l'amplitude est ici légèrement plus élevée en direction **verticale** (0,025 g) qu'en direction horizontale (0,021 g). Cependant, cette différence de 0,004 g est négligeable et ne représente pas une anomalie structurelle.
4. **Bandes latérales :** On remarque une légère forêt de pics (bandes latérales) autour des harmoniques de la GMF. C'est souvent l'indice d'une modulation de charge, ce qui pourrait appuyer l'hypothèse d'un **engrenage légèrement désaligné** ou d'une excentricité mineure [20].

Conclusion : Bien que les spectres révèlent une signature complexe avec plusieurs harmoniques, la sévérité globale reste dans la zone **A (Excellente)** du standard de vibration. Le désalignement suspecté n'a pas d'impact significatif sur la santé mécanique actuelle du réducteur.

III. (Palier P5)

a. Analyse temporelle

L'analyse du signal temporel sur le palier N°05 (Arbre 2 - P5-H) est essentielle pour caractériser la nature des chocs générés lors du cycle de fonctionnement du réducteur.

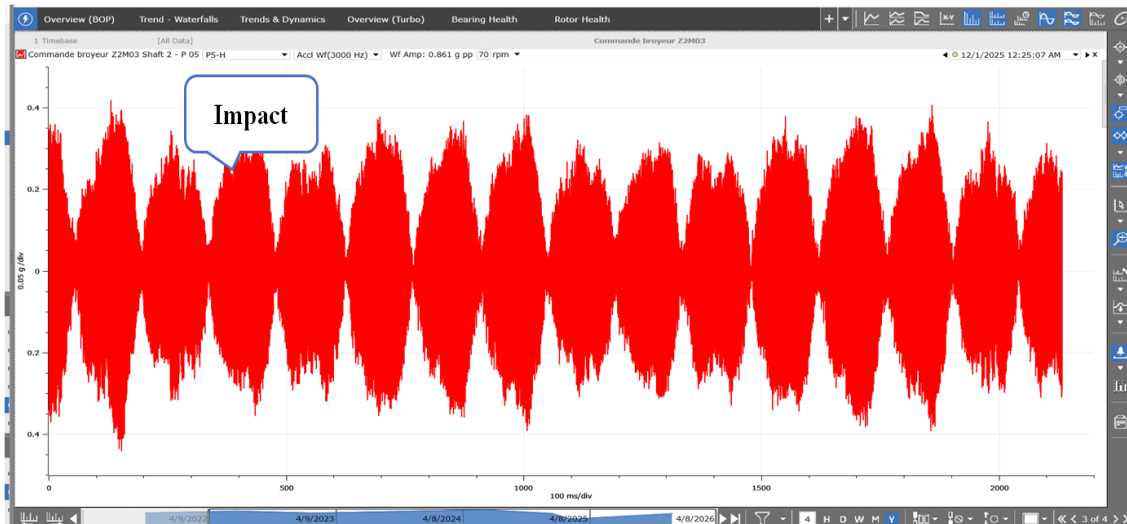


Figure IV.13 : Signal temporel du palier P5-H avec impacts cycliques identifiés

- **Observation du signal** : Le signal présente une forme d'onde fortement modulée, avec une succession de paquets d'énergie (enveloppes) très réguliers. Cette allure en "fuseaux" est caractéristique d'un phénomène de modulation de l'amplitude.
- **Présence d'Impacts** : Comme indiqué par l'annotation sur le graphique, des **impacts** cycliques sont clairement visibles. L'amplitude crête-à-crête globale du signal est de **0,861g pp**.
- **Interprétation technique** : La régularité des impacts suggère qu'ils sont synchrones avec une fréquence de rotation ou d'engrènement spécifique.
 - Bien que le terme "Impact" soit utilisé, l'amplitude maximale reste inférieure à **0,5 g** (en valeur crête), ce qui est considéré comme une intensité de choc **faible à modérée** pour un réducteur industriel de cette taille tournant à **70 RPM**.
 - Cette signature peut indiquer un engrènement sous charge importante ou une légère excentricité qui module le signal, mais sans atteindre des niveaux de sévérité critiques [20].

Conclusion: Le signal est riche en informations fréquentielles (modulations), mais l'énergie des chocs reste maîtrisée. Le palier 05 présente un comportement stable. Le diagnostic global reste "**BON**", en cohérence avec la valeur efficace mesurée de **0,503 mm/s RMS** dans le tableau récapitulatif.

b. Analyse fréquentielle

L'analyse spectrale du palier P5 est cruciale pour confirmer l'origine des modulations et des impacts observés lors de l'analyse temporelle.

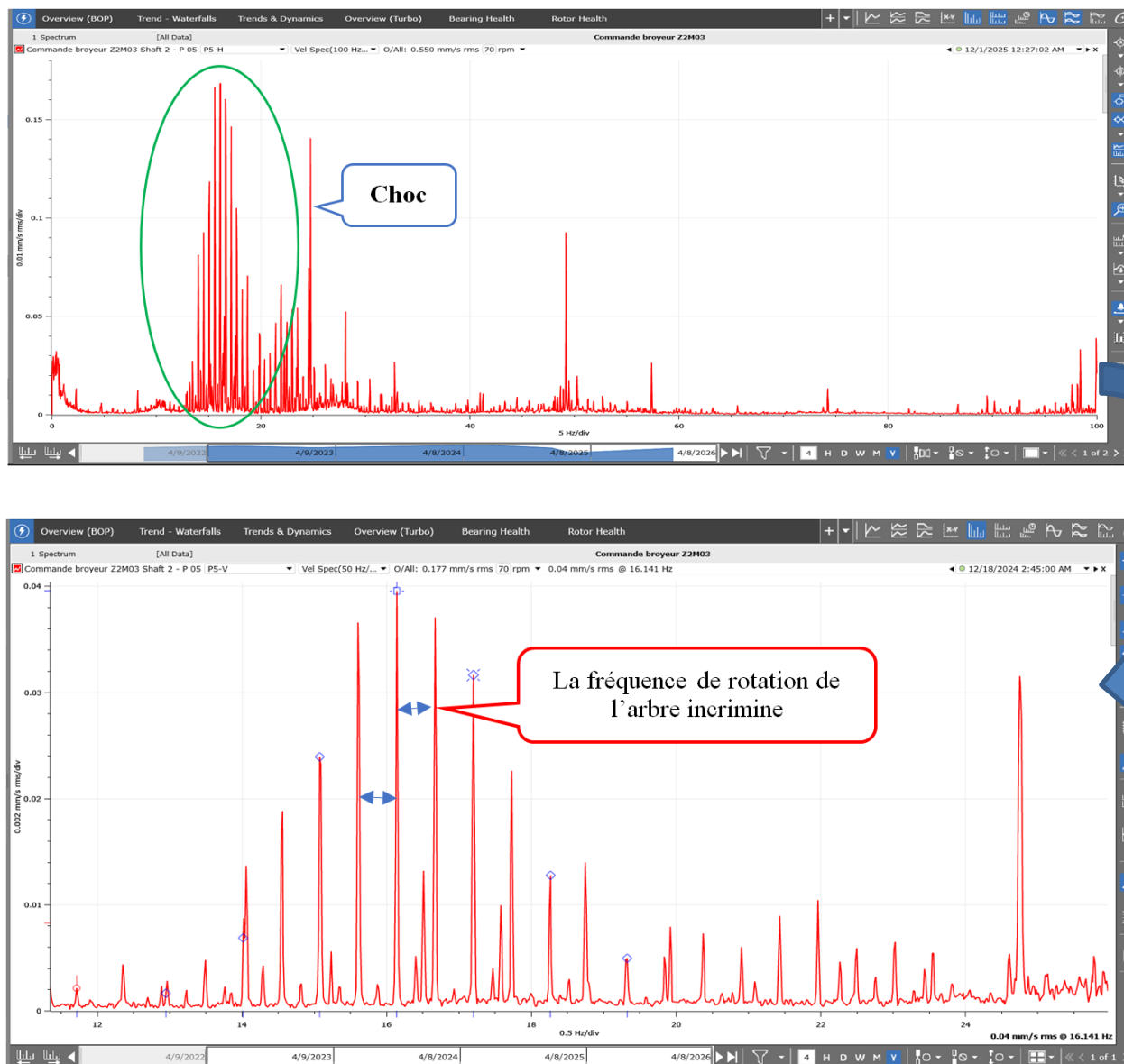


Figure IV.14 : Spectre FFT du palier P5 avec zone de chocs et bandes latérales

Observations des spectres (Vitesse RMS) :

- **Mise en évidence des chocs :** Le spectre haut résolution (image du haut) montre une zone d'énergie dense marquée "Choc". Cette accumulation de pics rapprochés est le signe d'une réponse impulsionnelle répétitive.
- **Espacement des pics :** L'agrandissement (image du bas) révèle que les pics sont espacés de manière régulière. Cet écartement correspond précisément à la fréquence de rotation de l'arbre incriminé (70 RPM 1,17 Hz) [20].

Interprétation des résultats :

Chapitre IV :

Expérimentations et collecte des données sur site

1. **Défaut de modulation** : La présence de nombreuses bandes latérales (sidebands) autour des fréquences d'engrènement, espacées par la fréquence de rotation de l'arbre, confirme une modulation de l'amplitude. Cela est souvent dû à un défaut de géométrie, tel qu'un pignon excentrique ou un arbre légèrement voilé.
2. **Sévérité des chocs** : Bien que le terme "Choc" apparaisse, l'amplitude des pics individuels reste très faible (inférieure à 0,04 mm/s RMS à 16,141 Hz). L'énergie vibratoire est donc présente mais très peu intense.
3. **Comparaison horizontale/verticale** : Le niveau global sur ce palier est de **0,550 mm/s RMS**. Cette valeur, bien qu'en légère augmentation par rapport aux autres paliers du réducteur, reste confortablement installée dans la **Zone A** (Excellente) de la norme **ISO 10816**.

Conclusion : Le diagnostic confirme l'existence d'un phénomène de choc périodique lié à la rotation de l'arbre. Cependant, au vu des très faibles amplitudes enregistrées, ce phénomène n'affecte pas la fiabilité du réducteur à court terme [20].

c. Différence des spectres du palier 5 (Sain vs Défaillant)

La comparaison entre un spectre de référence (machine saine) et le spectre actuel du palier 05 permet de mettre en évidence l'évolution des défauts mécaniques .

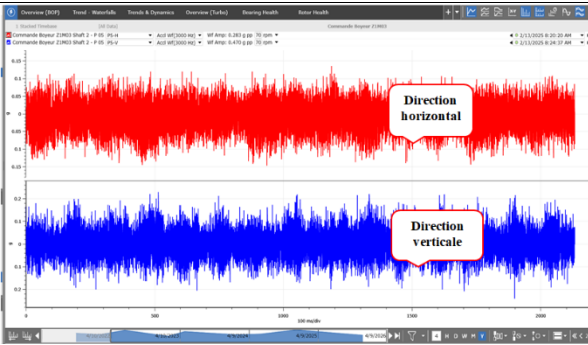


Figure A: Spectrale temporelle prise sur le palier N°5 réducteur 01 (sain)

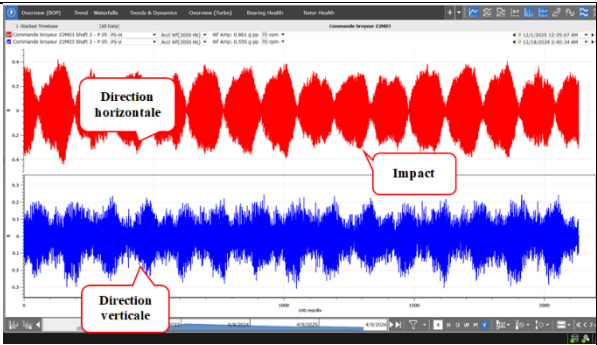


Figure B: Spectrale temporelle prise sur le palier N°5 réducteur 02 (défaut)

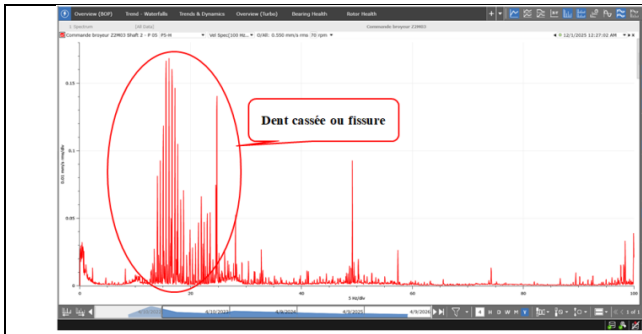


Figure C: Spectrale fréquentiel prise sur le palier N°5 réducteur 01 (sain)

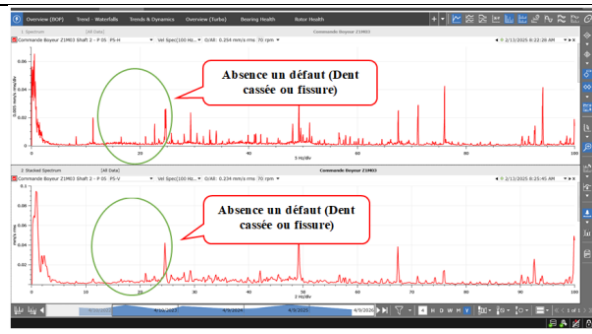


Figure D: Spectrale fréquentiel prise sur le palier N°5 réducteur 01 (défaut)

. Analyse du palier N°05 réducteur sain

Dans des conditions normales de fonctionnement, le spectre fréquentiel du palier 05 devrait présenter les caractéristiques suivantes :

- **Pics harmoniques clairs** : Les seules amplitudes significatives correspondent à la vitesse de rotation de l'arbre et à la fréquence d'engrènement (GMF).
- **Plancher de bruit stable** : L'absence de chocs se traduit par un spectre "propre" sans accumulation d'énergie entre les pics principaux.
- **Absence de modulation** : Aucun pic secondaire (bandes latérales) n'entoure les fréquences caractéristiques [20].

2. Analyse du palier N°05 réducteur défaillant

Le spectre mesuré sur le palier 05-H (Arbre 2) montre des signes de dégradation spécifiques :

- **Émergence de bandes latérales (Sidebands)** :
 - **Observation** : On observe une série de pics secondaires autour de la fréquence principale.
 - **Diagnostic** : Ces bandes sont espacées par la fréquence de rotation de l'arbre (1,17 Hz), ce qui confirme un phénomène de **modulation d'amplitude** lié à un défaut de géométrie (excentricité ou faux-rond).
- **Identification de la zone de choc** :
 - **Observation** : Le spectre met en évidence une zone d'énergie dense (entourée en vert) marquée comme "**Choc**".
 - **Diagnostic** : Cette signature est le résultat d'impacts cycliques répétés. Bien que l'amplitude globale reste faible (0,550 mm/s RMS), la structure du spectre indique que l'engrènement n'est plus parfaitement fluide.

Chapitre IV : Expérimentations et collecte des données sur site

- **Réponse impulsionnelle :**

- **Observation :** Le spectre de vitesse montre une forêt de pics harmoniques s'étendant sur une large bande fréquentielle.
- **Diagnostic :** C'est la preuve que les chocs temporels (mesurés à 0,667 g) excitent les fréquences propres de la structure du réducteur [20].

Synthèse comparative

Caractéristique	Palier N°05 Réducteur (Sain)	Palier N°05 Réducteur (Défaillant)
Profil spectral	Pics isolés et nets	Spectres riches en harmoniques
Modulation	Inexistante	Présente (espacement de 1,17 Hz)
Énergie de choc	Négligeable	Identifiée en hautes fréquences
Conclusion	État stable	Début de dégradation cinématique

Tableau IV.3 : Comparaison des spectres vibratoires du palier N°5

4.4.3. Inspection dans réducteur après l'analyse

I. Le Problème Structurel : État Critique du Volant d'Équilibrage (Réducteur)

L'inspection physique a révélé une anomalie que les vibrations ne montraient pas encore clairement :

- **Constat :** Présence de **fissures visibles** et de **dents partiellement cassées** (environ 110 mm) sur le volant d'équilibrage du réducteur Basse Vitesse.
- **Risque :** Une rupture totale d'une dent entraînerait un blocage catastrophique du réducteur **SYMETRO** et un arrêt prolongé de la production.
- **Facteur aggravant :** Le système de filtration d'huile était s'est dégradé, favorisant l'usure par piqûres (pitting) due aux impuretés [1].



Figure IV.15 : Photo du volant d'équilibrage (côté moteur/bague de guidage) – dents fissurées



Figure IV.16 : Photo du volant d'équilibrage (côté bague de guidage/broyeur) – dents endommagées

II. Recommandations de Maintenance

1. **Planification des Réparations :** Le remplacement des parties tournantes (notamment le volant d'équilibrage fissuré) doit être planifié lors du prochain grand entretien budgétisé pour éviter une défaillance majeure.
2. **Système de Filtration :** La remise en service et le suivi de la filtration fine sont impératifs pour limiter l'usure par piqûres.
3. **Suivi de l'Huile :** Une analyse de la qualité de l'huile en laboratoire doit être effectuée **deux fois par an** selon les normes ANSI/AGMA 9005-E02.

4.4.4. Synthèse Finale du Réducteur (P3 à P7)

L'ensemble des paliers du réducteur (SYMETRO) présente un état mécanique **sain**. Les petites anomalies détectées (léger désalignement sur P4 et modulation sur P5) sont des signes d'usure normale ou de réglages mineurs qui ne nécessitent pas d'intervention immédiate [1].

La priorité de maintenance reste focalisée sur le moteur électrique (Palier P2-A) en raison de son défaut électrique prédominant.

5.Conclusion

Ce chapitre a permis de valider la démarche de diagnostic grâce à une approche combinant modélisation, simulation et analyse vibratoire. Les résultats obtenus sous KISSsoft et MATLAB ont montré une bonne concordance avec les mesures expérimentales, confirmant l'identification des défauts et l'origine des vibrations observées. La cohérence entre les résultats simulés et réels démontre la fiabilité du modèle développé pour évaluer les anomalies. Cette étude constitue ainsi une base technique solide pour la définition des actions de maintenance et des solutions d'amélioration présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

1.Introduction

Dans le cadre du développement des stratégies de maintenance prédictive (Industrie 4.0), nous avons développé une application intelligente dédiée à l'analyse et au diagnostic automatique des défauts mécaniques. Cette application permet d'importer directement les fichiers de données au format **CSV** collectés à partir de l'appareil de mesure des vibrations (**VB8**).

2. Procédure de Traitement des Données

Pour valider l'efficacité de l'application développée, nous avons testé le système sur un ensemble de six (06) fichiers de signaux réels, importés au format CSV à partir de l'appareil de mesure VB8. La démarche consiste à injecter le fichier brut dans l'application, qui extrait automatiquement les indicateurs globaux (temporels/fréquentiels) et génère un diagnostic automatique basé sur l'IA [21].

3. Synthèse Globale des Résultats (Les 7 Cas)

Pour éviter les redondances, les résultats et les diagnostics automatiques générés par l'application pour les 6 machines/points de mesure sont regroupés dans le tableau synthétique suivant :

3.1. Paliers de moteur

A. palier 01

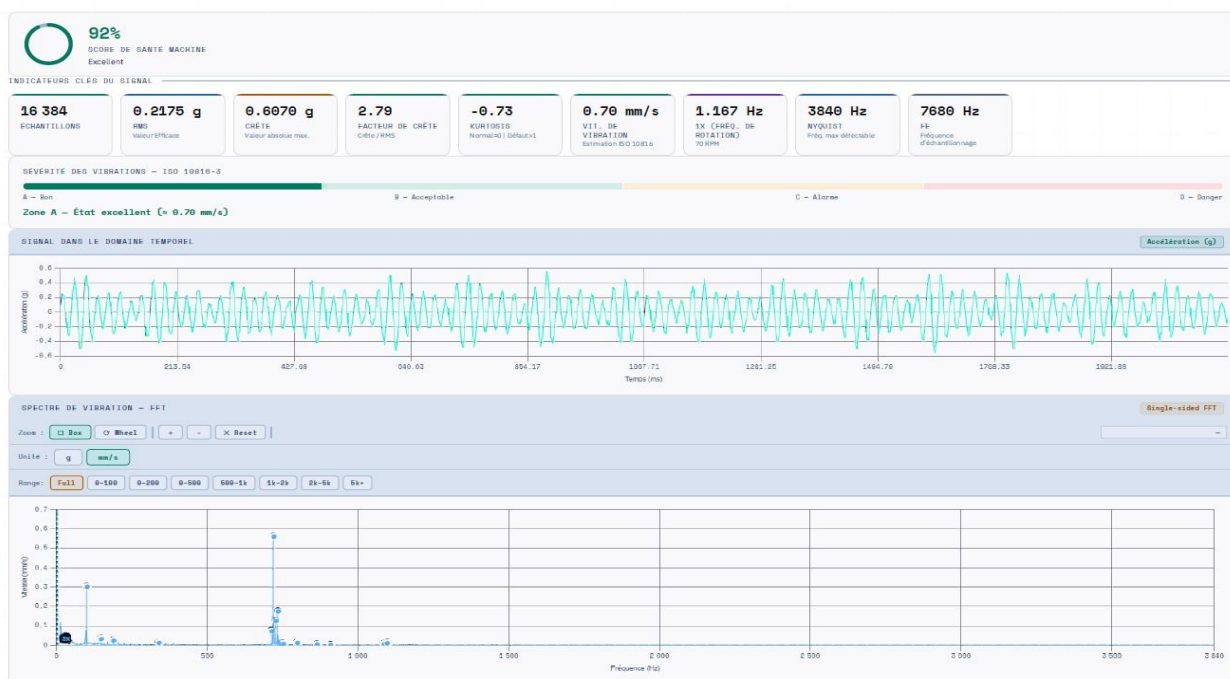


Figure V.1 : Interface de l'application IA – Analyse vibratoire du palier P1 (Moteur)

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application



Figure V.2 : Résultats du diagnostic intelligent pour le palier P1 (Moteur)

Explication des résultats — P1-V

1.Score de santé machine

Le score de santé est de 87 %, ce qui indique que la machine reste dans un état globalement satisfaisant mais nécessite une surveillance préventive afin d’éviter l’évolution des défauts détectés.

2.Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de 1,40 mm/s, classée dans la Zone A selon la norme ISO 10816-3. Cette zone correspond à un état vibratoire bon et acceptable pour le fonctionnement normal de la machine.

3.Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,2831 g : niveau vibratoire global modéré.
- Valeur crête = 0,8850 g : amplitude maximale relativement importante.
- Facteur de crête = 3,13 : présence possible d’irrégularités mécaniques légères.
- Kurtosis = -0,15 : absence de chocs impulsifs sévères.

4.Fréquence de rotation

La vitesse de rotation mesurée est de 495 tr/min, soit une fréquence de rotation de 8,25 Hz.

5.Analyse fréquentielle FFT

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

Le spectre FFT montre un pic dominant à 100,31 Hz avec une amplitude de 1,1283 mm/s. Cette fréquence correspond à un phénomène électromécanique associé au double de la fréquence réseau électrique (2×50 Hz).

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent indique :

- Défaut électromécanique sévère avec un niveau de confiance de 95 %.

Causes possibles :

- Rupture de barre rotorique ;
- Irrégularité de l'entrefer rotor/stator ;
- Défaut d'isolation des enroulements ;
- Déséquilibre de l'alimentation électrique.

- Présence possible de desserrage mécanique avec un niveau de confiance de 15 %.

Causes possibles :

- Fixations desserrées ;
- Jeu excessif du logement de roulement ;
- Rotor desserré sur l'arbre [21].

Explication des résultats — P2-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de **84 %**, ce qui montre que la machine reste dans un état globalement satisfaisant. Toutefois, ce score est légèrement inférieur aux autres points de mesure, indiquant qu'une surveillance plus attentive est nécessaire afin d'éviter l'évolution des défauts détectés.

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de **2,12 mm/s**, classée dans la **Zone B** selon la norme ISO 10816-3. Cette zone correspond à un état acceptable pour le fonctionnement de la machine, mais nécessitant un suivi régulier des vibrations afin de détecter toute aggravation future.

3. Valeurs du signal vibratoire

- **RMS = 0,1579 g** : niveau vibratoire global modéré.
- **Valeur crête = 0,5140 g** : amplitude maximale du signal vibratoire.
- **Facteur de crête = 3,25** : présence possible de légères irrégularités mécaniques ou électromécaniques.
- **Kurtosis = -0,29** : absence de chocs sévères ou de défauts impulsifs importants.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation mesurée est de **495 tr/min**, correspondant à une fréquence de rotation de **8,25 Hz**.

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

5. Analyse fréquentielle FFT

L'analyse FFT met en évidence un **pic dominant à 100,31 Hz** avec une amplitude de **2,2151 mm/s**. Cette fréquence correspond au double de la fréquence du réseau électrique (2×50 Hz), ce qui est typique d'un phénomène électromécanique lié au moteur ou à l'alimentation électrique.

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent détecte un **défaut électromécanique sévère** avec un niveau de confiance de **95 %**.

Les causes possibles sont :

- Rupture de barre rotorique ;
- Irrégularité de l'entrefer rotor/stator ;
- Défaut d'isolement des enroulements statoriques ;
- Déséquilibre de tension d'alimentation électrique.

Une analyse électrique complémentaire du moteur (MCSA), ainsi qu'un contrôle des enroulements et de l'entrefer, sont recommandés afin de confirmer l'origine exacte du défaut [21].

2.2. Analyse des signaux des paliers de Réducteur

A. palier 01

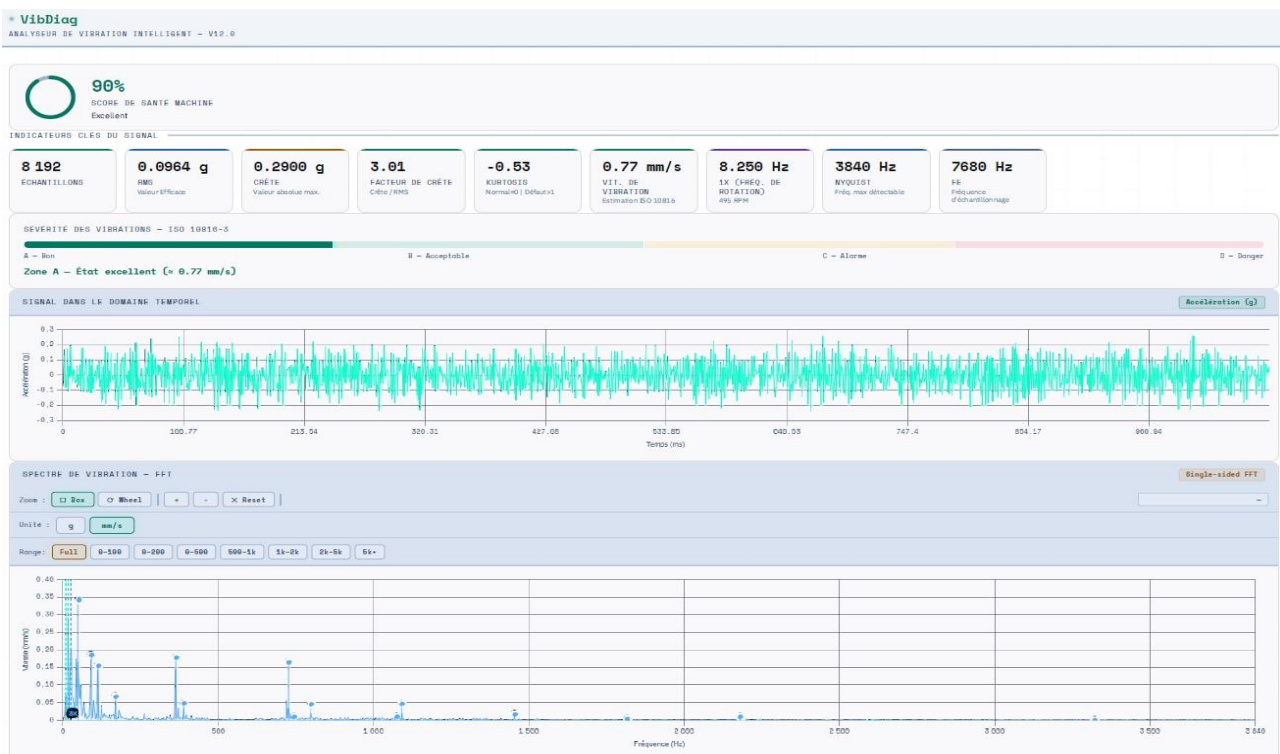


Figure V.3 : Analyse vibratoire des paliers du réducteur

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

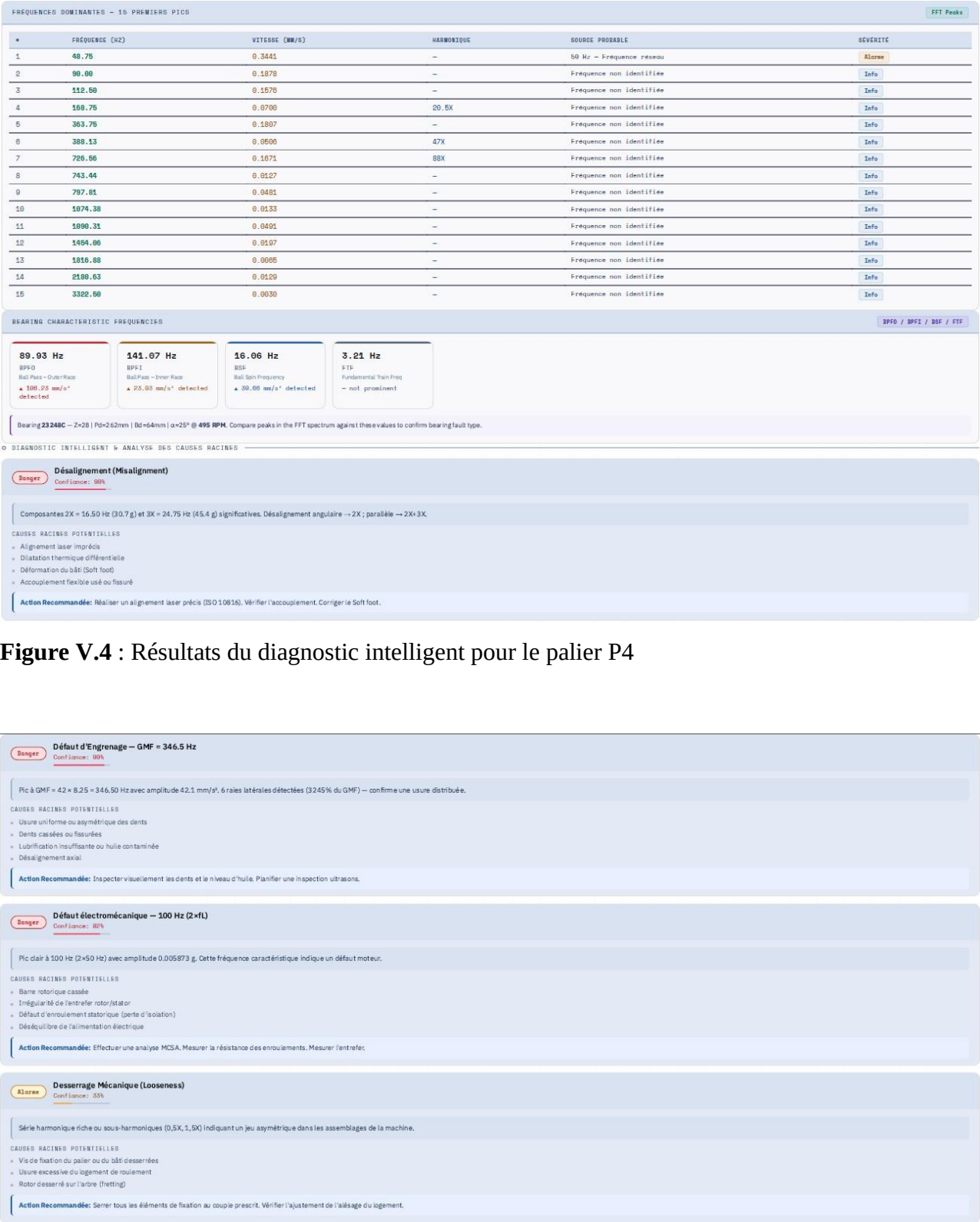


Figure V.5 : Résultats du diagnostic intelligent pour les paliers P5 à P7

Explication des résultats — P3-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de 90 %, ce qui indique que la machine est globalement en très bon état de fonctionnement malgré certains défauts spécifiques nécessitant une intervention préventive.

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de 0,77 mm/s, classée dans la Zone A selon la norme ISO 10816-3. Cette zone correspond à un état excellent avec un niveau vibratoire faible et acceptable pour un fonctionnement normal.

3. Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,0964 g : niveau vibratoire global faible.
- Valeur crête = 0,2900 g : amplitude maximale modérée du signal.
- Facteur de crête = 3,01 : présence possible de petites irrégularités mécaniques.
- Kurtosis = -0,53 : absence de chocs sévères ou de défauts impulsifs importants.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation mesurée est de 495 tr/min, correspondant à une fréquence de rotation de 8,25 Hz.

5. Analyse fréquentielle FFT

Le spectre FFT présente plusieurs pics importants :

- Pic dominant à 48,75 Hz avec une amplitude de 0,3441 mm/s, associé à la fréquence réseau électrique de 50 Hz.
- Présence de composantes significatives autour de 90 Hz, 112,5 Hz et 363,75 Hz indiquant plusieurs phénomènes vibratoires simultanés.

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent met en évidence plusieurs défauts mécaniques et électromécaniques :

- Défaut de désalignement sévère avec un niveau de confiance de 90 %.

Causes possibles :

- Alignement laser imprécis ;
- Dilatation thermique différentielle ;
- Déformation du bâti (soft foot) ;
- Accouplement flexible utilisé ou fissuré.

- Défaut d'engrenage sévère (GMF = 346,5 Hz) avec un niveau de confiance de 90 %.

Causes possibles :

- Usure des dents ;
- Fissures ou dents cassées ;
- Mauvaise lubrification ;
- Désalignement axial.

- Défaut électromécanique à 100 Hz avec un niveau de confiance de 82 %.

Causes possibles :

- Rupture de barre rotorique ;

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

- Irrégularité de l'entrefer rotor/stator ;
- Défaut d'isolement des enroulements ;
- Déséquilibre de tension d'alimentation.
- Présence possible de desserrage mécanique avec un niveau de confiance de 33 %.
Causes possibles :
 - Fixations desserrées ;
 - Jeu excessif du logement de roulement ;
 - Rotor desserré sur l'arbre [21].

Explication des résultats — P4-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de 90 %, indiquant que la machine est dans un très bon état général avec un faible niveau de vibration.

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de 0,43 mm/s, classée dans la Zone A selon la norme ISO 10816-3. Cette zone correspond à un fonctionnement excellent sans risque vibratoire immédiat.

3. Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,1280 g : niveau vibratoire faible.
- Valeur crête = 0,4000 g : amplitude maximale modérée.
- Facteur de crête = 3,12 : légère présence d'irrégularités vibratoires.
- Kurtosis = -0,24 : absence de chocs sévères ou impulsifs.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation est de 70 tr/min, correspondant à une fréquence de rotation de 1,167 Hz.

5. Analyse fréquentielle FFT

Le spectre FFT montre un pic dominant à 363,28 Hz avec une amplitude de 0,1371 mm/s. Cette fréquence correspond à la fréquence d'engrènement des engrenages (GMF).

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent révèle principalement :

- Défaut d'engrenage sévère (GMF = 361,7 Hz) avec un niveau de confiance de 90 %.
Causes possibles :
 - Usure des dents ;
 - Dents fissurées ou cassées ;
 - Lubrification insuffisante ;
 - Désalignement axial.

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

Explication des résultats — P5-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de 87 %, ce qui indique une machine en bon état général mais nécessitant une surveillance préventive.

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de 0,36 mm/s, classée dans la Zone A selon la norme ISO 10816-3, correspondant à un état excellent.

3. Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,0896 g : vibration globale faible.
- Valeur crête = 0,3110 g : amplitude modérée.
- Facteur de crête = 3,47 : possible présence d'irrégularités mécaniques ou défauts naissants.
- Kurtosis = -0,22 : absence de chocs impulsifs sévères.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation est de 70 tr/min, soit une fréquence de rotation de 1,167 Hz.

5. Analyse fréquentielle FFT

Le spectre FFT présente un pic dominant à 363,28 Hz avec une amplitude de 0,1896 mm/s, correspondant à la fréquence d'engrènement mécanique.

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent détecte :

- Défaut électromécanique sévère à 100 Hz avec un niveau de confiance de 95 %.

Causes possibles :

- Rupture de barre rotorique ;
- Irrégularité de l'entrefer ;
- Défaut d'isolement statorique ;
- Déséquilibre de tension électrique.

- Défaut d'engrenage sévère (GMF = 49 Hz) avec un niveau de confiance de 89 %.

Causes possibles :

- Usure des dents ;
- Fissures ;
- Défaut de lubrification ;
- Désalignement axial.

- Présence possible d'un défaut de roulement avec un niveau de confiance de 18 %.

Causes possibles :

- Lubrification insuffisante ;

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

- Contamination ;
- Fatigue des pistes ;
- Surcharge mécanique [21]..

Explication des résultats — P6-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de 87 %, indiquant un état globalement satisfaisant avec nécessité de suivi préventif.

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire est de 0,31 mm/s, classée dans la Zone A selon ISO 10816-3, ce qui correspond à un très bon état vibratoire.

3. Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,0946 g : faible niveau vibratoire.
- Valeur crête = 0,3320 g : amplitude modérée.
- Facteur de crête = 3,51 : présence possible de défauts mécaniques débutants.
- Kurtosis = -0,03 : absence de chocs sévères.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation mesurée est de 70 tr/min, correspondant à une fréquence de rotation de 1,167 Hz.

5. Analyse fréquentielle FFT

Le spectre FFT montre un pic principal à 363,28 Hz avec une amplitude de 0,1739 mm/s, lié à la fréquence d'engrènement mécanique.

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic met en évidence :

- Défaut d'engrenage sévère (GMF = 361,7 Hz) avec un niveau de confiance de 90 %.

Causes possibles :

- Usure des dents ;
- Fissuration ;
- Lubrification insuffisante ;
- Désalignement axial.

- Contamination réseau à 50 Hz avec un niveau de confiance de 35 %.

Causes possibles :

- Bruit électrique ;
- Problème de mise à la terre ;
- Induction électromagnétique.

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

- Présence possible d'un défaut de roulement avec un niveau de confiance de 18 %.

Causes possibles :

- Fatigue des pistes ;
- Contamination ;
- Lubrification inadéquate ;
- Surcharge mécanique[21].

Explication des résultats — P7-V

1. Score de santé machine

Le score de santé est de 88 %, indiquant un état général satisfaisant avec quelques anomalies nécessitant une surveillance renforcée.

2. Sévérité des vibrations selon ISO 10816-3

La vitesse vibratoire mesurée est de 0,34 mm/s, classée dans la Zone A selon ISO 10816-3. Cette zone correspond à un état vibratoire excellent.

3. Valeurs du signal vibratoire

- RMS = 0,0994 g : faible niveau vibratoire global.
- Valeur crête = 0,3330 g : amplitude modérée.
- Facteur de crête = 3,35 : présence possible de légères irrégularités mécaniques.
- Kurtosis = -0,70 : absence de défauts impulsifs sévères.

4. Fréquence de rotation

La vitesse de rotation mesurée est de 70 tr/min, correspondant à une fréquence de rotation de 1,167 Hz.

5. Analyse fréquentielle par FFT

Le spectre FFT présente un pic dominant à 99,84 Hz avec une amplitude de 0,1141 mm/s, associé à un phénomène électromécanique correspondant au double de la fréquence réseau électrique.

6. Diagnostic intelligent

Le diagnostic intelligent détecte :

- Défaut d'engrenage sévère (GMF = 49 Hz) avec un niveau de confiance de 90 %.

Causes possibles :

- Usure des dents ;
- Fissuration ;
- Mauvaise lubrification ;
- Désalignement axial.

- Présence possible d'un défaut de roulement avec un niveau de confiance de 15 %.

Causes possibles :

- Fatigue des roulements ;

Chapitre V : Simulation des données réelles par notre application

- Contamination ;
- Surcharge ;
- Lubrification insuffisante [21].

3. Conclusion :

Malgré des niveaux vibratoires globaux faibles et conformes aux seuils admissibles, plusieurs défauts mécaniques et électromécaniques à un stade précoce ont été détectés. Il est donc recommandé de mettre en œuvre une maintenance préventive adaptée, d'effectuer des inspections mécaniques ciblées et d'assurer un suivi vibratoire régulier afin de prévenir toute dégradation progressive des équipements et de réduire le risque d'arrêts imprévus de production

Conclusion générale

Cette étude a permis de mettre en œuvre une méthodologie de diagnostic avancée appliquée à la chaîne cinématique d'un broyeur à ciment. En combinant l'analyse théorique, les mesures vibratoires sur site et la simulation numérique, les principaux objectifs fixés ont été atteints.

Dans un premier temps, l'étude du procédé de fabrication du ciment ainsi que l'analyse des principaux composants de transmission, notamment le moteur WEG et le réducteur SYMETRO, ont permis de comprendre le fonctionnement global du système et d'identifier les fréquences caractéristiques associées aux engrenages et aux roulements.

Par la suite, les campagnes de mesures vibratoires réalisées sur le terrain ont fourni une évaluation précise de l'état de santé des équipements. L'analyse des signaux et des spectres a mis en évidence plusieurs anomalies mécaniques et électromécaniques à un stade précoce, tout en confirmant que les niveaux vibratoires globaux demeurent dans des limites acceptables.

Enfin, la modélisation du réducteur sous KISSsoft et le traitement des données sous MATLAB ont permis de valider les observations expérimentales. La bonne corrélation entre les résultats simulés et les mesures réelles confirme la pertinence de l'approche adoptée et démontre la capacité des outils numériques à reproduire le comportement dynamique du système et à évaluer la sévérité des défauts détectés.

Les résultats obtenus montrent que l'association de l'expertise technique, de l'analyse vibratoire et de la simulation numérique constitue une approche efficace pour améliorer la fiabilité des diagnostics et optimiser les stratégies de maintenance conditionnelle. Cette démarche contribue à réduire les risques de défaillance, à limiter les arrêts non planifiés et à améliorer la disponibilité des équipements industriels.

Comme perspective, il serait intéressant d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique afin d'automatiser la détection précoce des défauts et d'améliorer les performances des systèmes de maintenance prédictive dans l'industrie cimentière.

BIBLIOGRAPHIE DES REFERENCES

- [1] : cimenterie S.E.G : Documentation de centre de formation de societe de ciment sour el ghazlane
- [2] : (S.K.F) et (FAG) : Documentation technique de société de fabrication des roulements
- [3] : (Jacques MOREL) : la maintenance et la surveillance des machines tournantes : École nationale supérieure de mécanique (ENSM) Ancien chef adjoint du Département surveillance diagnostic maintenance à EDF
- [4] : (David AUGÉIX) : Analyse vibratoire des machines tournantes : Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse)
- [5] : Documents des différents des capteurs (site internet)
- [6] : (J.P. Laine) : dynamique du rotor : Central
- [7] : Bartelmus, W. (2001). Mathematical modelling and computer simulations as an aid to gearbox diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5), 855-871.
- [8] : Randall, R.B. (2011). *Vibration-based Condition Monitoring : Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- [9] : Bonnardot, F. (2004). Comparaison entre les analyses angulaire et temporelle des signaux vibratoires de machines tournantes. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), France.
- [10] : Raad, A. (2007). Contribution à la surveillance vibratoire et au diagnostic des machines de production par des méthodes adaptées. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- [11] : Zakaria, N. (2012). Diagnostic des défauts d'engrenages par analyse vibratoire. Mémoire de Magister, USTHB Alger, Algérie.
- [12] : Baydar, N. & Ball, A. (2001). A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(6), 1091-1107.
- [13] : Badaoui, M. (1999). Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs à engrenages par les techniques de séparation du signal. Thèse de doctorat, Université Jean Monnet de Saint-Étienne, France.

[14] : Bensaad, D. (2018). Détection et diagnostic des défauts des roulements dans un système mécanique par traitement du signal vibratoire. Mémoire de Master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie.

[15] : Serridge, M. & Licht, T.R. (1987). Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers Theory and Application Handbook. Brüel & Kjaer, Denmark.

[16] : ISO 10816-3 (2009). Mécanique vibrations – Évaluation des vibrations des machines par mesure sur les parties non tournantes. ISO, Genève, Suisse.

[17] : Commtest Instruments Ltd. (2010). VB8 User Manual. Commtest Instruments Ltd., Christchurch, New Zealand.

[18] : KISSsoft AG. (2024). KISSsoft (Version 2024) [Logiciel informatique]. Récupéré de <https://www.kisssoft.com>

[19] : The MathWorks, Inc. (2026). MATLAB Online (Version R2026a) [Logiciel en ligne]. Récupéré de <https://matlab.mathworks.com>

[20] : Bently Nevada, "System 1 Evolution," version 24.1, Baker Hughes Company, Minden, NV, USA, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://www.bently.com>

[21] : Logiciel VibDiag création par IA