

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité Fabrication mécanique et productique

**Étude de simulation numérique et diagnostic
vibratoire d'une machine tournante.**

Cas : Détacheur DS 306.

Promoteur :

Dr MAGRAOUI Rabah

Pr TEMMAR Mustapha

Réalisé par :

LAAGUEB OUSSAMA

MADAOUI MOHAMED

Promotion:2024/2025

Remerciements

*En premier lieu nous remercions **Dieu notre Créateur** pour nous avoir accordé la force la patience et la persévérance nécessaires tout au long de notre parcours et pour nous avoir permis d'atteindre ce niveau de formation.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **MAGRAOUI RABAH** notre encadrant et à Monsieur **TEMMAR Mustapha** notre Co-encadrant pour la confiance qu'ils nous ont accordé la pertinence du sujet proposé ainsi que pour leur accompagnement constant leurs conseils précieux et leur disponibilité durant toutes les étapes de notre travail.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants de **département de mécanique** pour la qualité de l'enseignement dispensé et pour les efforts fournis tout au long de notre formation.*

*Nos remerciements les plus sincères vont aussi à **nos parents** pour leur soutien moral indéfectible leur accompagnement constant ainsi que leur aide financière précieuse sans lesquels la concrétisation de ce mémoire n'aurait pas été possible.*

Dédicaces

À Dieu Tout-Puissant

source de toute réussite et de toute bénédiction

Lui qui m'a guidé soutenu et accordé le succès dans ce travail.

À mes chers parents. Les deux bougies qui illuminent ma vie.

*Qu'Allah les protège et leur accorde longue vie et bonheur
pour leur amour leurs sacrifices et leurs prières qui ont accompagné
chaque étape de mon parcours.*

*À mes sœurs et bien-aimées et à mon frère cher à mon cœur Pour leur
présence rassurante et leur soutien constant qui m'ont toujours
réconforté dans les moments difficiles.*

À ma grand-mère.

*Véritable source de tendresse et d'affection
dont les prières et l'amour ont été une force pour moi.*

À mes oncles

chacun par son nom

À mon collègue et ami de projet de fin d'études,

Mohamed Madaoui

*pour leur engagement, leur sérieux et leur grand travail à côté de moi
pour la réussite de ce mémoire.*

*À tous les enseignants qui m'ont formé, guidé et accompagné tout au
long de mon parcours
et qui ont contribué de près ou de loin à cette réussite.*

À tous mes amis depuis mon enfance

*et à tous ceux qui m'ont aimé et aidé même par un mot, un geste ou
une pensée bienveillante.*

*Je vous dédie ce modeste travail avec toute ma gratitude et mon
affection.*

LAAGUEB OUSSAMA

Résumé

Ce mémoire présente une étude technique détaillée d'un broyeur DS306 industriel, en mettant l'accent sur son principe de fonctionnement, ses composants mécaniques, ainsi que les différents types existants et leurs applications. L'objectif principal de ce travail est de concevoir un broyeur efficace et adapté aux exigences de la production, en tenant compte des contraintes de robustesse, de performance énergétique et de sécurité.

Dans un premier temps, nous avons abordé les généralités sur les différents types de broyeurs (à marteaux, à broches, à boulets, etc.). Ensuite, une analyse approfondie du modèle choisi a été réalisée, incluant des simulations numériques et des diagnostics vibratoires du rotor d'un broyeur.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de conception industrielle visant à allier efficacité, fiabilité et simplicité d'entretien.

Abstract

This thesis presents a detailed technical study of an industrial crusher, focusing on its operating principle, mechanical components, as well as the different existing types and their applications. The main objective of this work is to design an efficient crusher adapted to production requirements, taking into account constraints of robustness, energy performance, and safety.

First, we covered general information about material fragmentation and the different types of crushers (hammer, pin, ball, etc.). Next, an in-depth analysis of the chosen model was conducted, including kinematic calculations, motor selection, material selection, and SolidWorks modeling. Finally, maintenance solutions were proposed to optimize the machine's lifespan and efficiency.

This work is part of an industrial design approach aimed at combining efficiency, reliability, and ease of maintenance.

المخلص

تقدم هذه الأطروحة دراسة تقنية مفصلة لكسارة صناعي مع التركيز على مبدأ تشغيلها ومكوناتها الميكانيكية بالإضافة إلى الأنواع المختلفة المتاحة وتطبيقاتها. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم الرحاية فعالة تتكيف مع متطلبات الإنتاج مراعاة معايير المتانة وأداء الطاقة والسلامة مع.

أولى تناولنا معلومات عامة حول تجزئة المواد وأنواع الكسارات المختلفة ألمطرقة ألدبوس ألكرة الخ). بعد ذلك أجرينا تحليلاً متعمقاً للنموذج المختار بما في ذلك الحسابات الحركية واختيار المحرك واختيار المواد ونمذجة ، وأخيراً اقترحت حلول صيانة لتحسين عمر الآلة وكفاءتها

هذا العمل جزء من نهج تصميم صناعي يهدف إلى الجمع بين الكفاءة والموثوقية وسهولة الصيانة

SOMMAIRE

1 Chapitre I : Généralités sur les broyeurs

I.1 Introduction	1
I.2 Généralités sur les broyeurs	3
I.2.1 Le broyage	3
I.2.2 Définition d'un broyeur	3
I.2.2.1 Partie mécanique	3
I.2.2.2 Partie électrique	3
I.2.3 Classification des broyeurs	3
I.3 Les différents types de broyeurs	4
I.3.1 Broyeur à couteaux	4
I.3.1.1 Principe de fonctionnement	3
I.3.1.2 Avantages	4
I.3.1.3 Souplesse et robustesse	4
I.3.2 Broyeur à marteaux	6
I.3.2.1 Principe de fonctionnement	6
I.3.2.2 Avantages	7
I.3.3 Broyeur à broches	8
I.3.3.1 Principe de fonctionnement	9
I.3.4 Broyeur à cylindres	9
I.3.4.1 Principe de fonctionnement	9
I.3.5 Broyeur à meules	10
I.3.5.1 Principe de fonctionnement	10
I.3.5.2 Éléments déterminants	11
I.4 Définition des machines tournantes	12
I.5 Classification des machines tournantes	13
I.6 Exemple d'application : Le détacheur DS306	13

Chapitre II

2 Chapitre 2 : Généralités sur la maintenance industrielle

II.1 Introduction	15
II.2 Définition de maintenance industrielle	15
II.3 Pourquoi la maintenance est-elle importante ?	15
II.4 Les différentes formes de maintenance	15
II.4.1 La maintenance corrective	15
II.4.1.1 Maintenance palliative	16
II.4.1.2 Maintenance curative	16
II.4.2 La maintenance préventive	16
II.4.2.1 La maintenance systématique	16
II.4.2.2 La maintenance conditionnelle	16
II.4.2.3 La maintenance prévisionnelle	17
II.5.2.1 La maintenance systématique :	17
II.6 Maintenance conditionnelle... ..	22
II.6.1 Analyse vibratoire.....	22
II.6.2 Analyse acoustique.	22
II.6.3 Sonorisation.. ..	23
II.6.4 Thermographie... ..	23
II.7. Analyse vibratoire... ..	23
II.7.1 Définition	23
II.7.2 Objectifs de l'analyse vibratoire.. ..	23
II.7.3 Principe de l'analyse vibratoire... ..	24
II.7.4 Méthodes d'analyse.....	24
II.7.5 Applications industrielles..... ..	24
II.7.6 Types de défauts détectés.....	24

II.7.7 Avantages de l'analyse vibratoire.....	24
II.7.8 Limites.....	25
Conclusion.....	25

3 Chapitre 3 : Simulation numérique et analyse modale du système rotor – Détacheur DS 306

3-1 Simulation numérique par SolidWorks	27
3-1-1 Introduction	27
3-1-2 Simulation du système rotor détacheur par le logiciel SolidWorks	27
3-1-3 Propriétés de l'étude de la simulation	28
3-1-4 Informations sur le maillage	29
3-1-5 Résultats de la simulation par SolidWorks	30
3-1-6 Liste des modes	31
3-1-7 Interprétation des résultats de la simulation	32
3-2 Simulation numérique par Ansys	33
3-2-1 Résultat de la simulation du système par Ansys	34
3-2-2 Interprétation des résultats de la simulation	36
3-3 Confrontation et validation des résultats numériques avec ceux de l'expérimentale	36
3-4 Solutions proposées	41
3-5 Conclusion	41

4 Chapitre 4 : Étude expérimentale – Analyse vibratoire d'une machine tournante : cas du Détacheur DS 306

4.1 Introduction	43
4.2 Application : Cas vécu, celui du Détacheur DS 306	43
4.3 Machine Détacheur DS 306	45
4-3-1 Description de la machine	45
4-3-2 Choix des points de mesures de vibrations	46

4.4 Historique de la machine	46
4.5 Interprétation spectrale des résultats	48
4.6 Travaux réalisés	49
4.7 Conclusion	51

Liste des Figures et Photos

• Figure1 -1 : Chambre de broyage d'un broyeur à couteaux n.....	5
• Figure1- 2 : Schéma d'un broyeur à marteaux n.....	7
• Figure1 -3 : Chambre de broyage d'un broyeur à broches n.....	8
• Figure 1-4 : Les deux types de broyeur à cylindre n.....	10
• Figure1- 5 : Schéma d'un broyeur à meule n.....	12
• Figure 3-1 : Système rotor détacheur DS306 n.....	18
• Figure 3-2 : Condition de fixation des paliers n.....	24
• Figure 3-3 : Maillage du système n.....	24
• Figure 3-4 : Premier mode de vibrations à 233,4 Hz n.....	25
• Figure 3-5 : Deuxième mode de vibrations à 384,83 Hz n.....	25
• Figure 3-6 : Troisième mode de vibrations à 385,20 Hz n.....	26
• Figure 3-7 : Quatrième mode de vibrations à 403,14 Hz	26
• Figure 3-8 : Cinquième mode de vibrations à 490,27 Hz n.....	27
• Figure 3-9 : Sixième mode de vibrations à 595,27 Hz	27
• Figure 3-10 : Septième mode de vibrations à 598,97 Hz	28
• Figure 3-11 : Huitième mode de vibrations à 617,04 Hz n.....	28
• Figure 3-12 : Neuvième mode de vibrations à 621,85 Hz n.....	29
• Figure 3-13 : Dixième mode de vibrations à 642,62 Hz n.....	29
• Figure 3-14 : Premier mode de vibrations (ANSYS) à 36,54 Hz n.....	32
• Figure 3-15 : Deuxième mode de vibrations à 328,45 Hz n.....	32
• Figure 3-16 : Troisième mode de vibrations à 340,87 Hz n.....	32
• Figure 3-17 : Quatrième mode de vibrations à 341,14 Hz n.....	33
• Figure 3-18 : Cinquième mode de vibrations à 499,72 Hz n.....	33
• Figure 3-19 : Sixième mode de vibrations à 548,78 Hz n.....	34
• Figure 3-20 : Septième mode de vibrations à 551,66 Hz	34
• Figure 3-21 : Huitième mode de vibrations à 620,74 Hz	35
• Figure 3-22 : Neuvième mode de vibrations à 624,84 Hz	35
• Figure 3-23 : Dixième mode de vibrations à 643,83 Hz n.....	35
• Figure 4-1 : Schéma cinématique et points de mesures de vibrations	41
• Photo 4-1 : Machine détacheur DS306 n.....	42
• Photo 4-2 : Rotor du détacheur DS306 n.....	43
• Photo 4-3 : Roulement et courroie de transmission du détacheur	44
• Photo 4-4 : Contrôle des portées de roulement et déformation du rotor n.....	45

- Figure 4-2 : Tendance vibratoire sur le palier N°02 n.....47
- Figure 4-3 : Tendance vibratoire sur le palier N°03 n.....48
- Figure 4-4 : Tendance vibratoire sur le palier N°0448
- Figure 4-5 : Spectre pris sur le palier N°0250
- Figure 4-6 : Spectre pris sur le palier N°0351
- Figure 4-7 : Spectre pris sur le palier N°04 n.....52
- Figure 4-8 : Suivi vibratoire
global.....53

Liste des Tableaux

Tableau 3.1 : Propriétés de l'étude de la simulation du rotor ventilateur n.....24

Tableau 3.2 : Informations sur le maillage du modèle établi par SolidWorks n.....25

Tableau 3.3 : Liste des fréquences propres du système établies par SolidWorks n.....31

Tableau 3.4 : Liste des fréquences propres du système par Ansys n.....37

Tableau 3.5 : Confrontation des résultats de la simulation numérique avec ceux de l'expérimentale
.....38

Tableau 4.1 : Historique du suivi vibratoire du détacheur DS306 avec interventions et observations
.....46

➤ **Introduction
générale**

Introduction Générale

La réduction de la taille des matériaux solides constitue l'une des opérations fondamentales dans l'industrie moderne. Elle joue un rôle essentiel dans divers secteurs tels que l'agroalimentaire, la pharmaceutique, la chimie, les matériaux de construction et les mines. Cette opération est réalisée à l'aide de machines appelées broyeurs, dont la fonction principale est de transformer les matières premières en particules plus petites, facilitant ainsi leur transport, leur traitement ou leur intégra...

Les broyeurs sont classés selon leur principe de fonctionnement, leur conception et leur domaine d'application. On distingue notamment les broyeurs à marteaux, à mâchoires, à couteaux, à cylindres, et ceux à disques rotatifs, chacun étant adapté à un usage spécifique selon la nature du matériau traité [1].

Dans ce contexte, on se propose d'étudier une machine tournante industrielle celle du Détacheur DS306. Cette machine ayant des couteaux, est utilisée dans la dernière étape de finition pour le décorticage des particules de la farine du blé. L'objectif est de mieux comprendre son comportement dynamique en service, d'identifier les sources de vibrations et d'envisager les solutions d'amélioration possibles en termes de fiabilité et de maintenance.

Dans le premier chapitre, sont présentés, des généralités sur les broyeurs, leurs types et leur classification

Pour le deuxième chapitre nous traitons les types de maintenance appliqués au niveau des entreprises industrielles et la connaissance des causes des pannes probables qui touchent les broyeurs durant le service et les remèdes qui conviennent.

Pour le troisième chapitre, une simulation numérique par Solidworks et Ansys du mécanisme a été élaboré.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons présenté un diagnostic vibratoire de la machine DS 306, avec des résultats expérimentaux. Ces résultats ont été confrontés et validés avec ceux de la numérisation.

CHAPITRE 1

1-1 Introduction :

Les broyeurs sont des équipements indispensables dans de nombreux domaines, que ce soit en agriculture, en industrie ou même à la maison. Leur fonctionnement, leurs différents types et leurs avantages peuvent parfois être méconnus du grand public. Cet article a pour but de vous éclairer sur tout ce que vous devez savoir sur le broyeur.

1.2 Généralités sur les broyeurs

1.2-1 Le broyage

Le broyage est une opération unitaire visant à fragmenter un matériau pour en réduire la taille afin de lui donner une forme utilisable ou d'en séparer les constituants. à cette fin, le matériau est soumis à des sollicitations mécaniques qui entraînent une augmentation de son énergie libre.

Cette énergie, lors de la fragmentation peut être transformée suivant différents processus en énergie élastique (mettant en jeu les défauts de réseaux qui donnent naissance à la fissuration), en énergie de surface (progression des fissures et génération de fractures), et diverses autres formes d'énergie (avec comme possibles conséquences l'amorphisation superficielle ou massique des solides cristallins, l'agglomération, les transitions polymorphiques, les réactions mécano-chimiques). [2]

1.2.2 Définition d'un broyeur [2]: Un broyeur est une machine de broyage des matériaux qui est constitué généralement en deux parties suivante :

1.2.2.1 Partie mécanique :

Qui comporte une trémie, des axes, des utiles de broyage (Couteaux, lames, marteaux...etc.), un réducteur de vitesse, et une carcasse qui assure l'assemblage de tous ces éléments.

1.2.2.2 Partie électrique :

Qui contient un circuit de commande (tableau de commande), et un circuit de puissance (moteur électrique ou thermique).

1.2.3 Classification des broyeur :

Dans les industries quel que soit le broyeur utilisé pour telle matière on peut toujours différencier les fragments de son déchet selon leurs diamètres, donc il est préférable de les classer en se basant sur ce critère et on distingue trois familles des broyeurs [3]

1. Broyeur à fragmentation grossière (particules de l'ordre de mm). Dans ce type on rencontre habituellement :

- Broyeur à couteaux : ils sont utilisés généralement pour broyer du plastique ou du papier

- Broyeur à marteaux : sont utilisés pour broyer les matières dures tel que la roche ou le verre

2. Broyeur à fragmentation fine (1000 à 10 μ m) :

Les technologies ont été pratiquement restreintes à un seul mode d'action consistant à la mise en œuvre de forces d'impact (les particules sont comprimées entre les corps broyant, projetées violemment contre une paroi, qui peut être fixe ou mobile, ou les unes contre les autres dans ce cas-là on parlera d'auto broyage)

3. Broyeur à fragmentation ultrafine : Dans le domaine de l'ultrafine (particules des tailles comprises entre 5 et 10 μ m), les forces mises en œuvre sont du type compression, cisaillement, et impact. L'énergie théorique nécessaire pour la réduction ultrafine des grains est toujours inférieure de 1% de l'énergie réelle dépensée..

1.3 les différents Types de broyeurs

La plupart des applications alimentaires peuvent être traitées avec des grands types de broyeurs tels que :

- Broyeurs à couteaux
- Broyeurs à marteaux
- Broyeurs universel
- Broyeur à cylindre (à rouleaux)
- Broyeur à meules

. 1.3.1- Broyeur à couteaux

Les broyeurs à couteaux sont utilisés pour le pré-broyage des matériaux tendres, mi-durs, caoutchouteux, élastiques et fibreux ainsi que des mélanges des matériaux hétérogènes comme les épices, aliments pour animaux, bois, caoutchoucs, cartons, cuirs, déchets électroniques, lignites, morceaux de plantes, os, pailles, papiers, plastiques, résines, textiles...

1.3.1.1- Principe de fonctionnement

Parfois appelés granulateurs, ils mettent en œuvre un système rotor-stator qui cisaille le produit broyé. Leur capacité de production dépend de la puissance fournie (de l'ordre de 250 à 1500 Watts), de la vitesse du rotor ainsi que de la longueur et du nombre des couteaux dont la forme peut aussi éventuellement varier. Ces appareils sont particulièrement recommandés pour le traitement des matériaux fibreux tels que les légumes, les plantes aromatiques et certaines épices et aussi pour les matières plastiques et le papier. Les tailles obtenues sont généralement de l'ordre de 1 à 6 mm. A titre indicatif, les débits peuvent être très importants et dépasser plusieurs dizaines de tonnes à l'heure comme lors du broyage de la betterave en sucrerie. Certains appareils sont munis de dispositif d'alimentation permettant d'introduire des pièces de grandes tailles.[4]

I.3.1.2- Avantages

- coupes optimales
- nettoyage rapide et facile grâce aux surfaces lisses et au rotor extractible
- granulométrie finale définie par des tamis de fond à ouverture de maille de 0,25 à 20 mm rotors et tamis
- vaste gamme d'accessoires tels que trémies, récipients collecteurs,
- normes de sécurité les plus élevées

I.3.1.3- Souplesse et robustesse

Les broyeurs à couteaux sont l'idéal pour fragmenter des matériaux mous à mi durs, cassants, fibreux, résistants, sensibles à la température, pour broyer des plastiques et préparer des mélanges hétérogènes. Les échantillons sont fragmentés par coupes et cisaillements, la cassette-tamis détermine la finesse souhaitée. Des couteaux en géométries diverses et des lames remplaçables assurent une flexibilité et une durabilité optimisées. Pour contrôler le comportement à l'abrasion, il est possible d'utiliser des outils de coupe en différents types d'acier ou en carbure de tungstène.

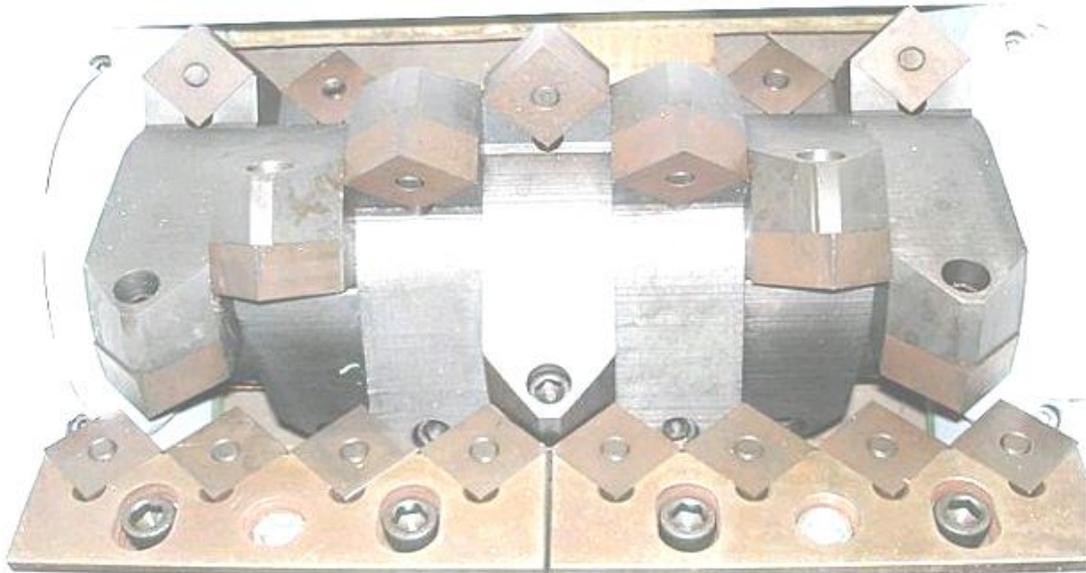


Figure N° 1. Chambre de broyage d'un broyeur à couteaux. [4]

1.3.2- Broyeur à marteaux

broyeur dans lequel le matériau est soumis à des marteaux articulés fixés à un rotor ; destiné aux produits demi-durs et non abrasifs. Ils produisent une réduction de taille par impact entre les particules et une surface dure. Dans le broyeur à marteaux, les grains ne sont pas écrasés mais éclatés par choc avec les marteaux articulés tournant à grande vitesse (3000 tr/mn ou plus) dans une chambre de broyage. La finesse des farines est en fonction de celle des perforations de la grille entourant la chambre de broyage. Plus le diamètre de perforation est petit, plus la farine sera fine mais cela implique un faible débit du broyeur. La granulométrie finale peut aller de la moyenne (2mm) à fine (20µm).[5]

Les principaux facteurs régissant le procédé sont :

- **la taille et la forme du tamis associées**
- **Le type des marteaux**
- **La vitesse périphérique des marteaux (20 à 60 m.s¹) .**

Ces moulins sont les plus utilisés dans les industries de Provenderie ; leur arbre horizontal est entraîné par une source d'énergie extérieure, moteur électrique ou thermique. Certains modèles peuvent aussi être couplés à la prise de force d'un tracteur. Un rotor muni de pièces d'acier fixe ou mobile appelé « marteau » lance le produit à plus de 100mètres à la seconde sur une plaque de choc fixe et sur une grille dont le diamètre de perforation règle la finesse de broyage. La granulométrie de la provende est bonne pourvue que les marteaux ne soient pas usés et que la grille ne présente pas des trous anormaux dus à des corps étrangers (pierre ; pièces métalliques). La puissance des moteurs électriques varie entre 2 et 15kW, selon la taille et le modèle de broyeur

. 1.3.2.1- Principe de fonctionnement :

Les moulins à marteaux ont pour principe de pulvériser les grains en les projetant à grande vitesse contre la chambre de broyage. Le broyage s'effectue principalement entre la grille et les marteaux. Lorsque la finesse voulue est atteinte, les matériaux passent alors à travers la grille d'évacuation. Cet appareil doit obligatoirement, être entraîné par un moteur car la vitesse de rotation des marteaux ne permet pas un entraînement manuel. Son principal avantage est centré sur l'entretien simple et peu coûteux ; son principal inconvénient réside sur le fait qu'il s'accommode mal à des oléagineux et à des céréales humides. Dans le broyeur à marteaux, les grains ne sont pas écrasés mais éclatés par choc avec les marteaux articulés tournant. La vitesse de rotation des marteaux doit être d'au moins 1500 tours par minute ; le plus souvent, elle est de 3000 tours par minute pour un moteur de puissance 5 à 7ch. Le débit est influencé par plusieurs facteurs, en particulier par les caractéristiques de la grille, le taux d'humidité des grains et la puissance du moteur. Le broyeur à marteaux est utilisé pour réduire des produits de masse moyenne à lourde en percutant la matière par des marteaux. La finesse des farines est en fonction de celle des perforations de la grille

entourant la chambre de broyage. Plus le diamètre de perforation est petit et plus la farine sera fine mais cela implique également un faible débit du broyeur. Le broyeur à marteaux est polyvalent, robuste, et nécessite un entretien aisé. Il n'est utilisé que pour des produits secs (grains, cossettes..) notamment avec les grilles à fines perforations.

Selon sa configuration, le broyeur à marteaux peut traiter les produits tendres, de masse faible, moyenne ou lourde, collants, abrasifs... dans les domaines suivants :

- Environnement et recyclage
- Combustibles
- Minéraux, engrais, chimie minérale
- Alimentaire, pharmacie, chimie fine
- Métaux

1.3.2.2- Avantages

- Robuste
- Broyeur totalement adaptable,
- Granulométrie uniforme à la sortie,
- Usage industriel intensive,
- Transmission par courroie,
- Accès aisé pour l'entretien et le contrôle de l'usure,
- Accès et remplacement faciles de la grille.

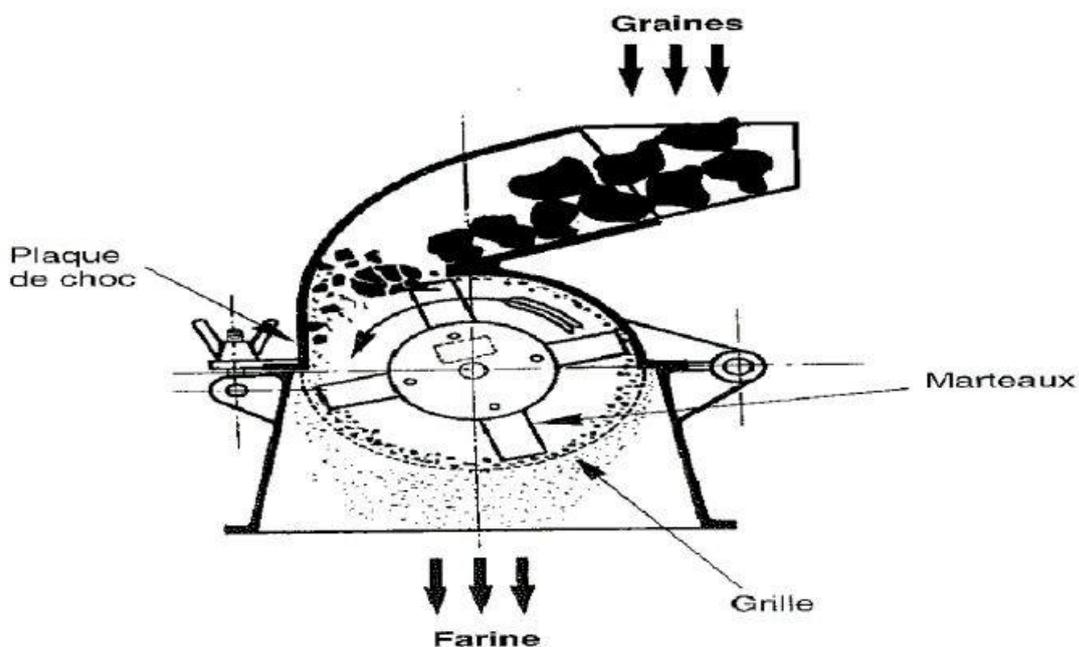
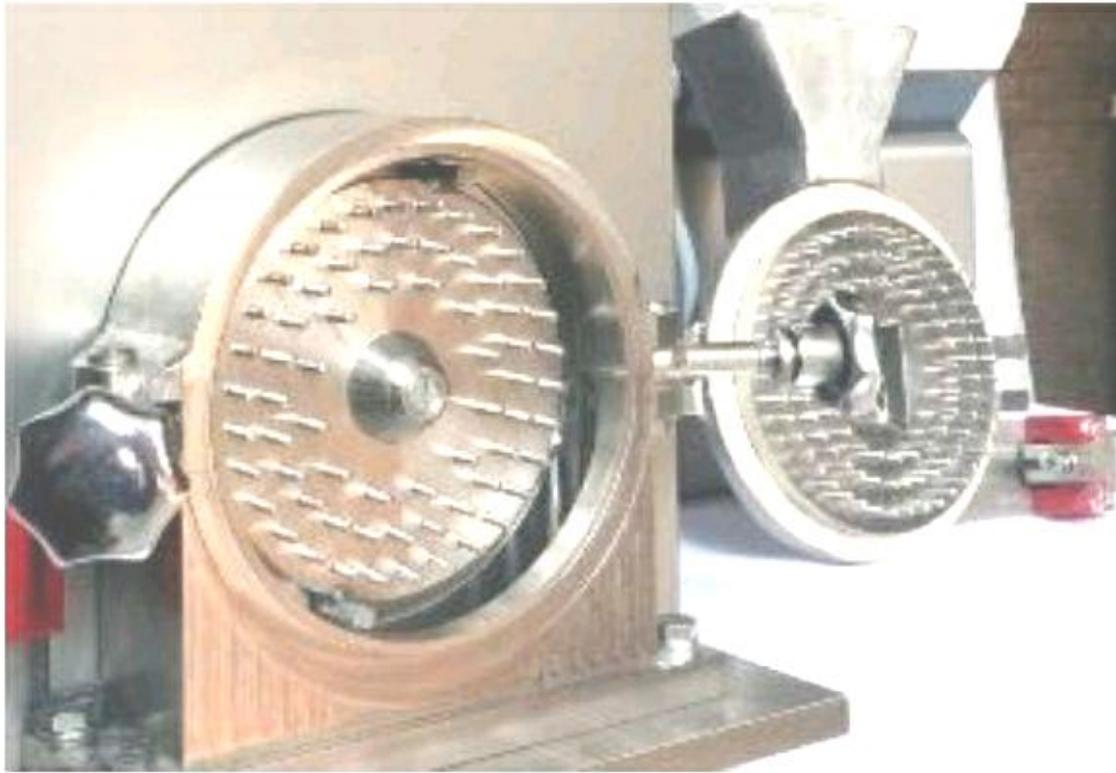


Figure N° 2. Schéma d'un broyeur à marteaux[4]

1.3.3- Broyeur à broches

Sur la base du corps de broyeur du broyeur à croisillon Peppink, des broyeurs à broches sont construits selon les spécifications du client. Un broyeur à broches a la propriété de broyer finement un produit. Utiliser le broyeur à broches comme pré concasseur pour un broyeur à croisillon est aussi une option. Le broyeur à broches est exécuté selon les spécification émanant du client sous une forme soudée. Le produit à broyer, la granulométrie et la capacité jouent un rôle important dans la conception du broyeur à broches.



. Figure N° 3. Chambre de broyage d'un broyeur à broches[5]

I-3-3-1Principe de fonctionnement :

Le broyeur à broches se compose de deux disques verticaux disposés en face l'un de l'autre ; des broches sont fixées sur les disques. Le matériau est introduit au centre de ces disques qui broient le produit grâce à un disque à rotatif à broches. Le produit est alors amené à travers les cercles concentriques des broches vers l'extérieur. La granulométrie finale peut être influencée en modifiant la vitesse du disque interne. Le disque extérieur (porte) peut être aisément ouvert, de manière à permettre à un nettoyage rapide et en profondeur. En option, le disque stationnaire peut aussi être entraîné dans le sens opposé. Ils se

caractérisent par l'interchangeabilité de couples rotor-stator (couteaux, marteaux, broches, disques de cisaillement) qui leur donne une grande diversité d'applications. Ils sont souvent présents dans les laboratoires et en petites production industrielles. Souvent classés dans les catégories des broyeurs à impacts pour broyage fin, ils génèrent la fragmentation par trois phénomènes :

- Les impacts entre particules et corps broyant
- Les chocs inter-particules
- L'attrition

Lors de l'utilisation d'un module rotor-stator de type disques à broches, le solide à broyer entre par gravité au niveau de l'axe de la chambre de broyage et est projeté par la force centrifuge contre les broches fixe du stator. La vitesse du rotor peut atteindre des vitesses périphériques de l'ordre de 200 m.s⁻¹. La taille des particules est dans cette configuration déterminée par les débits d'alimentation et les vitesses des disques à broches

1.3.4- Broyeur à cylindres :

Très utilisés dans les industries agro-alimentaires, on les trouve dans de nombreux secteurs. Ils comportent généralement plusieurs paires de cylindres.

1.3.4-1Principe de fonctionnement :

Chaque paire de cylindres tournent en sens opposé de vitesse différente. La surface des cylindres (lisses ou cannelés), leur vitesse de rotation et leur écartement conditionnent la finesse de la mouture. Lorsque les cylindres sont lisses, la compression et frottement sont les facteurs de fracture tandis qu'avec des cylindres cannelés, une action de cisaillement existe également. La matière passe entre deux cylindres et ressort sous forme de plaquette friable. Ce type d'appareil est souvent utilisé en pré-broyage ou en broyage hybride. Outre le concassage des produits moyennement abrasifs, il peut servir pour le concassage de produits mous, collants, élastiques ou fibreux.

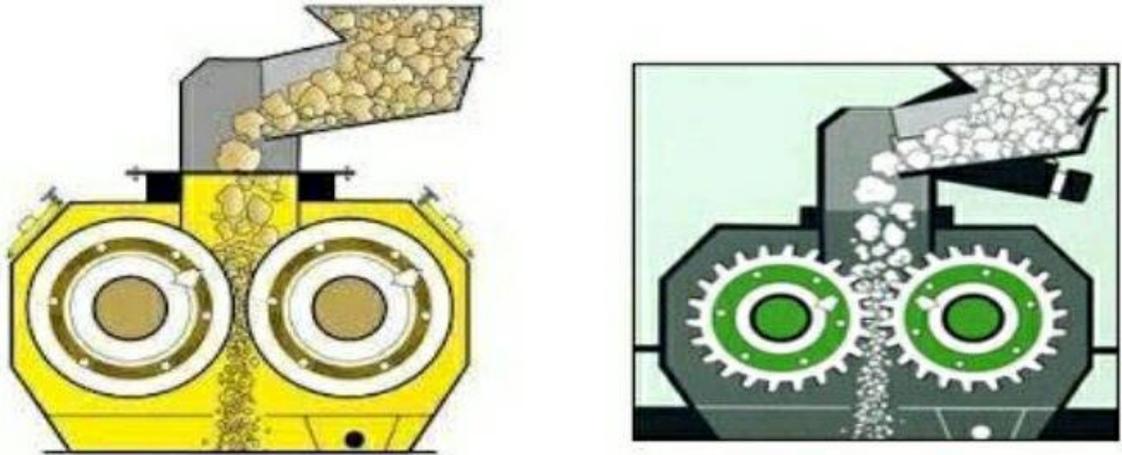


Figure N° 4. Les deux types de broyeur à cylindre [5]

1.3.5- Broyeur à meules :

1.3.5.1 Principe de fonctionnement :

Le moulin est constitué d'une meule fixe, et d'une meule mobile tournant sur la première, dans un plan horizontal ou vertical. Les deux meules de la machine sont de matière ayant de dimensions identiques. Le grain est déversé dans une trémie d'alimentation de forme conique ou pyramide inversée. Une vanne d'alimentation située à la base de trémie permet de régler le débit du grain. Il pénètre dans la chambre de broyage par le centre d'une des meules dont la partie axiale est creuse. Le broyage du grain se fait durant le trajet effectué entre les deux meules, du centre vers la périphérie. L'un des disques est fixe tandis que l'autre est entraîné par une courroie reliée à un moteur électrique ou thermique. Le disque mobile tourne à une vitesse de l'ordre de 600 t/mn. Les grains sortant d'une trémie sont amenés par une vis sans fin dans l'intervalle qui sépare les deux meules ; l'écartement de ces deux dernières peut être modifié selon la finesse de la mouture désirée. Les meules portent des rainures destinées à faciliter le cisaillement et l'écrasement des grains. La production horaire des moulins à meules métalliques dépend de la finesse de mouture désirée, de la variété du grain et de sa teneur en humidité

. 1.3.5.2- Éléments déterminants :

Les meules métalliques sont des plaques de broyage fabriquées en fonte ou en acier. Elles sont très solides, et permettent de broyer une grande variété de produit sec ou légèrement humide (céréales, maniocs, arachides). Par contre, la farine risque de s'échauffer et pour obtenir une farine très fine, il faut la repasser deux fois au moulin. Le réglage de

l'écartement des meules détermine la finesse de la farine. Plus les meules sont rapprochées, plus la farine est fine et le débit est faible. Les moulins à meule métallique peuvent broyer tous type de céréales, et peuvent même broyer des particules humides comme les oléagineux mais malgré cela, ces moulins sont difficiles à construire, en particulier le système de réglage de meule. De ce fait, très peu d'artisans se sont lancés pour leur fabrication. Dans les moulins à meules métalliques (que l'on désigne, parfois aussi sous les noms de moulins à disques ou moulins à plateaux), la mouture est réalisée par deux disques métalliques parallèles logés à l'intérieur d'un carter. La machine elle-même est montée sur un bâti ou sur un socle. Le moulin à meules est destiné à moudre les produits secs (grains, cossettes...) mais il peut également être utilisé pour les produits humides. C'est un moulin très apprécié pour sa polyvalence. Avant l'utilisation généralisée des appareils à cylindres en meunerie, on utilisait des broyeurs où une meule en pierre mobile venait écraser le grain sur un plateau circulaire fixe. Les modes de fragmentation mis en jeu étant la compression, l'abrasion et le cisaillement.

Ces actions sont accomplies par deux lourdes meules tournant à l'intérieur d'une cuve cylindrique avec plaque de fond perforée sur laquelle la matière à traiter est alimentée. La structure de base autoportante permet l'installation de grands plateaux ou tapis de déchargement La motorisation principale est aisément accessible. La capacité de production, variable de 40 à 140 T/h, est obtenue grâce à 3 modèles aux différents diamètres du plateau de base et largeurs des roues.

- Structure de base en deux parties, soutenue par 4 piliers en béton, avec éléments anti-vibration.
- Pistes de broyage interne et externe séparées.
- Alimentation centrale de la matière à la piste de broyage interne par trémie rotative.
- . Section centrale robuste pour le logement des meules.
- Éléments d'usure interchangeables entre les plaques perforées et la structure de base
- Réducteur épicycloïdal central monté dans la partie inférieure.
- Groupe de refroidissement pour le réducteur épicycloïdal.
- Moteur de commande placé sur le côté de la structure de base, loin de la zone de chute de la matière première
- . Adaptation au groupe réducteur central par arbre et joint de cardan. Actuellement, on utilise souvent ce type de broyeur pour l'extraction d'huile d'olive

. Cette machine universelle est celle qui offre le plus grand rendement pour la préparation de matériaux par voie humide. Sa conception est fondée sur un système d'alimentation centrale et d'actionnement inférieur, ce qui la dote des avantages suivants par rapport à d'autres types :

- Distribution parfaite
- Faible consommation

- Fonctionnement silencieux
- Uniformité du broyage
- Haut niveau d'homogénéisation du matériau broyé
- Facile à entretenir

Sécurité totale d'utilisation. Par contre, l'inconvénient de ce matériel se focalise sur la nécessité d'un démontage quasi-complet pour assurer un bon nettoyage.

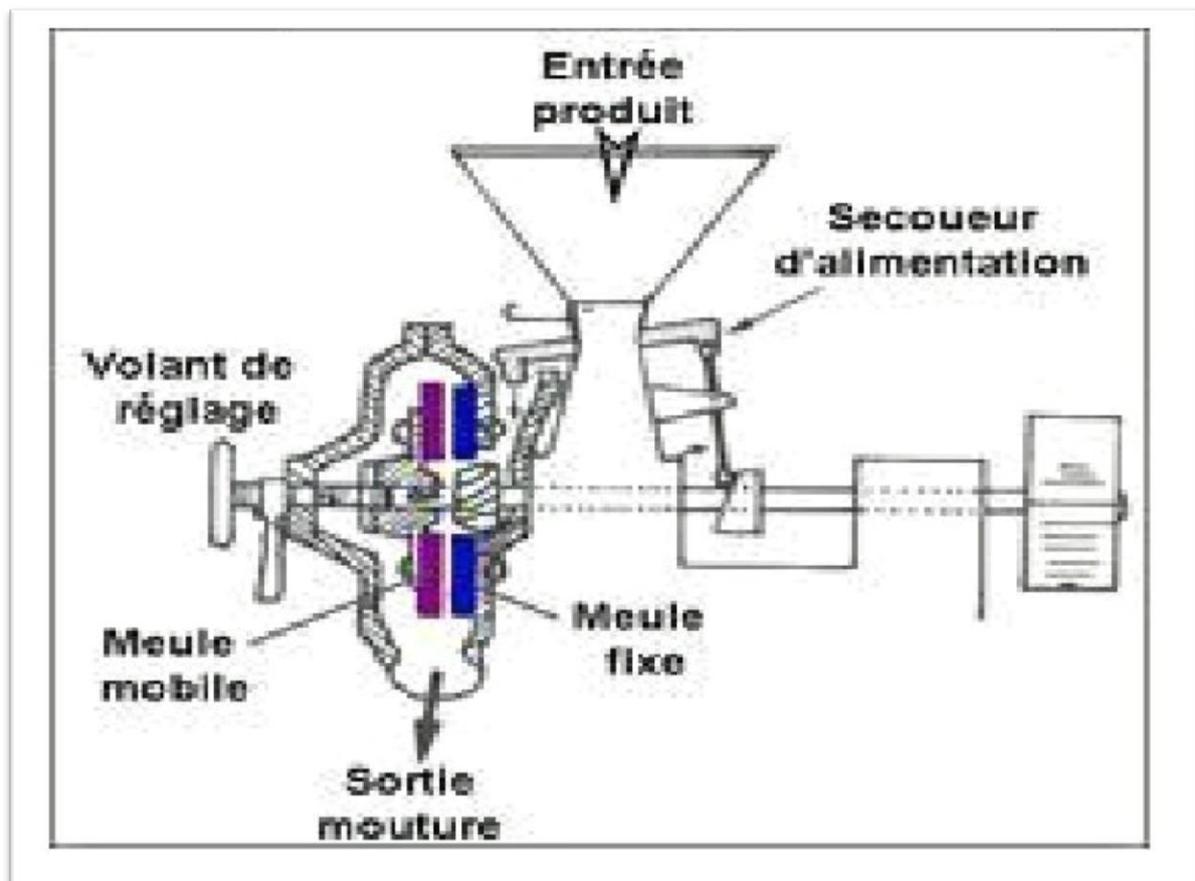


Figure N° 5. Schéma d'un broyeur à meule [5]

4.1 I.4.Définition des machines tournantes

Les machines tournantes sont des équipements mécaniques dont les éléments principaux effectuent un mouvement de rotation autour d'un axe. Elles sont omniprésentes dans les systèmes industriels, notamment dans les domaines de la production, du transport, de l'énergie et du traitement.[1]

4.2 I.5 Classification des machines tournantes

Les machines tournantes peuvent être classées selon plusieurs critères :[6]

- Selon la fonction :
 - ✓ Machines motrices (moteurs, turbines)
 - ✓ Machines réceptrices (pompes, compresseurs, broyeurs)
- Selon le type de mouvement :
 - ✓ Rotation continue (ex. moteurs électriques)
 - ✓ Rotation alternative (ex. pompes à piston)
- Selon le type d'énergie utilisée :
 - ✓ Électriques
 - ✓ Hydrauliques
 - ✓ Thermiques

4.3 I.6 Exemple d'application : Le détacheur DS306

Parmi les machines tournantes utilisées dans l'industrie textile, le détacheur DS306 constitue un exemple concret. Il est conçu pour éliminer les taches sur les tissus par l'action d'un cylindre en rotation, entraîné par un moteur électrique. Le schéma cinématique de la machine comprend :

- ✓ Un moteur
- ✓ Un système de transmission
- ✓ Un cylindre rotatif
- ✓ Deux points de mesure des vibrations

Ce type de machine illustre parfaitement les défis liés aux machines tournantes : analyse vibratoire, équilibrage dynamique, maintenance préventive.[7]

Chapitre 2

Généralités de la maintenance industriels

II . 1 introduction

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines ‘manus’ et ‘tenere’, est apparu dans la langue française au XIIe siècle. L’étymologiste « Wace » a trouvé la forme ‘ mainteneur’ (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c’est une forme archaïque de «mainteneur». Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l’époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : «Maintien dans des unités de combat, de l’effectif et du matériel à un niveau constant». Définition intéressante, puisque l’industrie l’a repris à son compte en l’adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique »[8]

II . 2 la Définition de maintenance industrielle :

La maintenance industrielle désigne toutes les actions (techniques, organisationnelles et humaines) qui permettent de maintenir les machines, les équipements et les installations d’une entreprise en bon état de fonctionnement. Cela peut aussi inclure des réparations en cas de panne, des vérifications régulières, ou encore des améliorations.

L’objectif est d’éviter les arrêts de production, d’assurer la sécurité du personnel, de prolonger la durée de vie des machines et de garantir une bonne qualité de production.

II . 3 Objectifs de la maintenance :

- Maîtriser les équipements
- ✓ Connaître les technologies utilisées
- ✓ Connaître les modes de défaillance de chaque équipement
- ✓ Connaître les moyens et outils nécessaires pour leur entretien
- Assurer une disponibilité maximale des moyens de production
- ✓ Réduire le nombre des pannes
- ✓ Réduire les temps d’intervention
- Optimiser les coûts
- ✓ Réduire les coûts des stocks
- ✓ Optimiser les ressources humaines et matérielles
- ✓ Réduire les coûts de gestion
- Contribuer à la qualité et la sécurité dans l’entreprise
- ✓ Faire des interventions « propres » n’affectant pas la qualité des produits
- ✓ Faire des interventions « sûres » respectant la sécurité de tous
- Être un acteur influant pour la pérennité de l’entreprise
- ✓ Coopérer avec les autres services opérationnels de l’entreprise
- ✓ S’intégrer à un processus d’amélioration continue ∞ Préserver l’environnement
- ✓ Lutter contre les pollutions et les nuisances
- ✓ Appliquer une politique pour l’économie d’énergie
- ✓ Gestion des carrières
- ✓ Programmes de formations[8]

II .4 Pourquoi la maintenance est-elle importante ?

- ✓ Pour éviter les pannes qui arrêtent la production.
- ✓ Pour réduire les coûts de réparation en intervenant à temps.
- ✓ Pour améliorer la performance des machines.
- ✓ Pour assurer la sécurité des ouvriers et des techniciens.
- ✓ Pour respecter les normes de qualité et de sécurité.

II.5 Les différentes formes de maintenance :

Il y a deux types de maintenance :

- ✓ Celle que l'on fait après la panne, pour réparer la maintenance corrective
- ✓ Et celle que l'on fait pour éviter la panne. la Maintenance palliative [9]

II .5.1 La maintenance corrective :

C'est une maintenance destinée à rendre la santé aux machines qui l'on perdu. C'est une maintenance peu efficace pour les machines vitales de production mais, qui trouve son application bien adaptée à certains matériels peu coûteuse, et hors production, comme les appareils domestique de confort, par exemple. Dance la maintenance corrective C'est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une reuise au moins provisoirement. Les activités de la maintenance corrective sont:

- ✓ La localisation de la défaillance.
- ✓ Le diagnostic.
- ✓ Le contrôle du bon fonctionnement. [10]

II.5.1.1 Maintenance palliative :

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

II.5.1.2 Maintenance curative :

Activités de la maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permette d'accomplir une fonction requise. Les résultats des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s).

II.5.2 La maintenance préventive :

Selon la norme AFNOR X60-010 « maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminer d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminer significatifs de l'état de dégradation du bien ou service (maintenance conditionnelle) ».

La maintenance préventive est définie à partir :

- ✓ Des historiques de maintenance (voir GMAO)
- ✓ Des données des constructeurs
- ✓ De la connaissance des techniciens.
- ✓ De raisonnements structurés (AMDEC, ingénierie, 5 pourquoi, ...)
- ✓ De façon empirique, par tâtonnements
- ✓ Des redondances d'équipements.

II.5.2.1 La maintenance systématique :

Consiste à opérer des remplacements systématiques de composantes, à intervalles régulier, même si les pièces déposées sont encore en assez bon état. C'est un moyen sûr d'avoir des machines fiables. Mais c'est un moyen coûteux qui ne se justifie que lorsque la machine est vitale dans l'entreprise, qu'elle est inaccessible en cours de fabrication, que la fabrication ne peut être arrêtée sans dégradations majeurs que le coût des pièces remplacées est fiable au regard de ceux des investissements et de la production.

II.5.2.2 La maintenance conditionnelle :

Consiste à n'intervenir pour remplacer les composants, ou faire des opérations de remise à l'état initial, qu'après avoir constaté des dégradations significatives et autant que possible fabrication en marche. L'idéal est que la machine puisse fonctionner le plus longtemps possible pour n'être arrêtée que juste avant que la panne ne survienne, ou que des pertes de fabrication n'apparaissent. Cela implique une surveillance constante et complète, avec des systèmes étalonnés pour déclencher l'alerte quand les limites sont atteintes. Ces systèmes d'alerte peuvent être manuels ou automatiques, extrêmement simples ou très sophistiqués.

La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne pas changer l'élément que lorsqu'il y a des signes de vieillissement ou d'usure de ce dernier. La maintenance conditionnelle (appelée aussi parfois maintenance prédictive suivant l'état de fonctionnement) comporte trois phases :

- ✓ La détection du défaut qui se développe.
- ✓ L'établissement d'un diagnostic.
- ✓ L'analyse de tendance.

Le matériel géré en maintenance préventive conditionnelle est fiable. Les pannes tendent à disparaître, les coûts directe d'intervention sont raisonnables et bien maîtrise, les imprévus sont rares. C'est un bon mode gestion applicable à toutes industries, et à tous les types de machines de production [11]

II.5.2.3 La maintenance prévisionnelle :

Ce mode préventif s'appuie sur la connaissance exacte et rigoureuse des processus de dégradation. En suivent leur évolution on se situe en permanence par rapport à l'échéance fatal. Cela permet de prévoir avec certitude et confiance la date exacte de la défaillance. La fabrication en étant avertie assez tôt, et la maintenance ayant le recul suffisant pour préparer son intervention l'urgence disparaît et chacune des parties, en accord avec l'autre, peut réaliser son programme sans perturbation. Ce mode de préventif doit s'appliquer chaque fois que c'est possible. Une large panoplie de moyen aide au diagnostic : mesure de vibration, analyse des huiles, bilans de rendement, mais leur interprétation exacte nécessite toujours des compétences de spécialiste. [12]

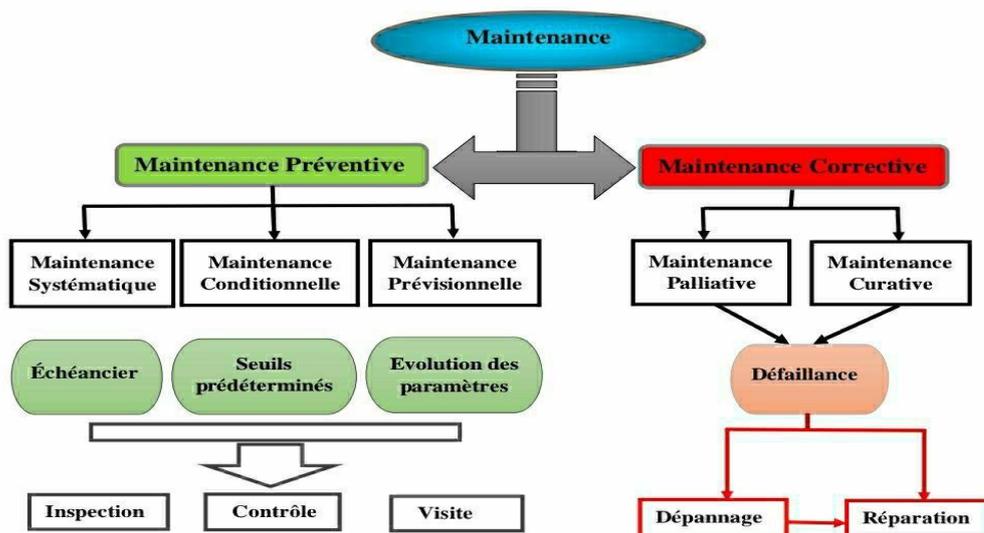


FIGURE 4 Les différents types de la maintenance [12]

II.5.2.4 Maintenance systématique: désigne des opérations effectuées systématiquement, soit selon un calendrier (à périodicité temporelle fixe), soit selon une périodicité d usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc.),

II.6. Maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle est une stratégie de maintenance préventive qui repose sur l'évaluation de l'état réel de l'équipement à l'aide de mesures physiques continues ou périodiques. Contrairement à la maintenance systématique, elle ne suit pas un calendrier fixe, mais intervient uniquement lorsqu'un indicateur de défaillance est détecté. Cette approche permet d'optimiser les coûts et d'améliorer la disponibilité des installations.

II.6.1 Analyse vibratoire

Cette méthode repose sur la surveillance des vibrations générées par les équipements tournants (roulements, moteurs, pompes). Toute variation dans les fréquences vibratoires peut révéler un déséquilibre, un défaut de roulement ou un désalignement.

II.6.2 Analyse acoustique

Elle permet de détecter les bruits anormaux générés par les composants mécaniques. Ces sons (sifflements, cognements, etc.) sont analysés afin de diagnostiquer les anomalies qui ne sont pas visibles à l'œil nu.

II.6.3 Sonorisation

Technique complémentaire à l'acoustique, elle consiste à enregistrer et à interpréter les sons produits par la machine pendant son fonctionnement. Cette approche est utilisée pour établir une signature sonore spécifique de chaque type de panne.

II.6.4 Thermographie

La thermographie infrarouge mesure les variations de température à la surface des équipements. Une élévation de température anormale peut indiquer un frottement excessif, une surcharge électrique ou un défaut mécanique.

II.6.5 Ultrasons

L'analyse ultrasonore permet de capter les sons de très haute fréquence générés par les fuites, les décharges partielles ou les défauts internes. Elle est très utilisée dans les industries gazières et électriques pour sa précision et sa rapidité. **[13]**

II.7. Analyse vibratoire

II.7.1 Définition

Dans les environnements industriels modernes, la fiabilité des machines est un facteur essentiel de productivité. L'analyse vibratoire est une technique de surveillance conditionnelle permettant d'évaluer l'état mécanique des équipements rotatifs sans interrompre leur fonctionnement. Elle est considérée comme une méthode de diagnostic précoce, particulièrement efficace pour détecter les anomalies internes bien avant qu'elles ne deviennent critiques. [14]

II.7.1 Objectifs de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire vise plusieurs objectifs majeurs :

- Anticiper les défaillances mécaniques avant qu'elles n'entraînent des pannes critiques.
- Réduire les arrêts non planifiés et améliorer la disponibilité des machines.
- Diminuer les coûts de maintenance en ciblant précisément les interventions.
- Allonger la durée de vie des équipements et optimiser la performance globale du système de production. [15]

II.7.3 Principe de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire repose sur l'idée que chaque défaut mécanique produit une signature vibratoire spécifique. Les capteurs (accéléromètres, vitesses, déplacements) fixés sur les points stratégiques de la machine captent ces vibrations, qui sont ensuite analysées par logiciel.

Un roulement défectueux, un balourd, ou un désalignement d'arbre génèrent des fréquences anormales dans le spectre vibratoire. En observant les pics de fréquence et d'amplitude, l'opérateur peut identifier la nature du défaut. [16]

II.7.4 Méthodes d'analyse

L'interprétation des signaux vibratoires se fait à travers plusieurs approches :

- Analyse temporelle : enregistrement du signal brut dans le temps.
- Analyse fréquentielle (FFT) : transformation de Fourier permettant de détecter des défauts spécifiques en fréquence.
- Analyse d'enveloppe : utile pour diagnostiquer les défauts de roulements, elle amplifie les faibles signaux dus à des chocs.
- Analyse orbitale : représentation du mouvement du rotor dans l'espace, utilisée dans les grandes turbines.

II.7.5 Applications industrielles

L'analyse vibratoire est appliquée dans une large variété de secteurs industriels :

- Centrales électriques : diagnostic des turbines à vapeur et à gaz.
- Industrie cimentière : suivi des broyeurs rotatifs.
- Industrie agroalimentaire : surveillance des moteurs et convoyeurs.
- Secteur pétrolier : surveillance des compresseurs centrifuges.

Exemple concret : une étude menée à l'usine de production SONATRACH a montré que la mise en place d'une stratégie de maintenance conditionnelle par vibration a permis de

réduire les arrêts non planifiés de 35 % en une année. [17]

II.7.6 Types de défauts détectés

Cette technique permet d'identifier un large éventail de défauts :

- Déséquilibre dynamique : vibration à une seule fréquence liée à la vitesse de rotation.
- Désalignement d'arbres : vibration à fréquence double de la vitesse.
- Défauts de roulements : apparition de fréquences spécifiques liées aux éléments roulants.
- Jeux mécaniques : signaux vibratoires irréguliers.
- Défauts d'engrenage : pics à des multiples de fréquences d'engrènement

II.7.7 Avantages de l'analyse vibratoire

- Intervention précoce avant la panne.
- Réduction des coûts d'entretien.
- Meilleure planification des arrêts.
- Augmentation de la sécurité du personnel.
- Optimisation de la disponibilité des équipements.[18]

II.7.8 Limites

Bien que très efficace, l'analyse vibratoire nécessite :

- Des techniciens bien formés à l'interprétation des signaux.
- Un historique vibratoire fiable pour chaque machine.
- Un investissement initial (capteurs, logiciels, etc.) [19]

Conclusion

L'analyse vibratoire s'impose comme un outil indispensable dans la stratégie de maintenance conditionnelle des industries modernes. Elle permet non seulement de prolonger la durée de vie des équipements mais aussi de réduire significativement les coûts liés aux arrêts imprévus. Sa mise en œuvre demande rigueur, compétence et une bonne connaissance des machines surveillées. (Synthèse basée sur les trois sources)

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3 : Simulation numérique et analyse modale du système rotor

Détacheur DS 306

3-1 Simulation numérique par SolidWorks :

3-1-1 Introduction :

Toute structure a tendance à vibrer à certaines fréquences, appelées fréquences naturelles, ou fréquences de résonance. A chaque fréquence naturelle correspond une déformée, appelée mode propre de vibration. L'analyse modale du système permet de déceler les fréquences de résonance et les modes propres associés de ce système.

En théorie, chaque corps est doté d'un nombre infini de modes propres. En analyse par éléments finis, les modèles comportent autant de modes que de degrés de liberté. Cependant, dans la plupart des cas, seuls quelques modes sont pris en considération. La résonance est la réponse excessive qui se produit lorsqu'un corps est soumis à un chargement dynamique vibrant à l'une de ses fréquences naturelles. Par exemple, un véhicule peut subir des vibrations violentes à une certaine vitesse, causées par la résonance d'une roue déséquilibrée. Les vibrations diminuent ou disparaissent à d'autres vitesses.

L'analyse modale ou fréquentielle aide à éviter toute résonance en calculant les fréquences de résonance. Elle fournit également des informations permettant de résoudre certains problèmes de réponse dynamique.

Le système sur lequel nous allons conduire une analyse de fréquence est constitué de la ligne d'arbre portant le détacheur.

3-1-2 Simulation du système rotor détacheur par le logiciel SolidWorks :

La conception et la simulation numérique du système par SolidWorks, nous permet déterminé les modes et fréquences propres du système (Figure 3-1).

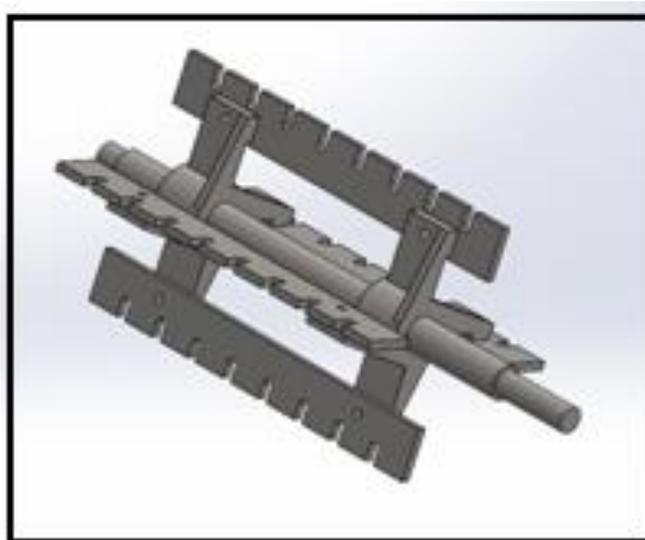


Figure 3-1: Système rotor détacheur

3-1-3 Propriétés de l'étude de la simulation :

Ces propriétés sont indiquées sur le [tableau 3-1](#), et les conditions aux limites ainsi que le type de fixation sont indiquées dans [la figure 3-2](#).

Tableau 3-1 :Propriétés de l'étude de la simulation du rotor ventilateur

Nom d'étude	Fréquence 1
Type d'analyse	Fréquence
Type de maillage	Maillage volumique
Nombre de fréquences	10
Type de solveur	FFEPlus
Faible aideur:	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Option thermique	Inclure des chargements thermiques
Température de déformation nulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SOLIDWORKS Flow Simulation	Désactivé(e)
Dossier de résultats	Document SOLIDWORKS (C:\Users\asus\Downloads\NOVO)

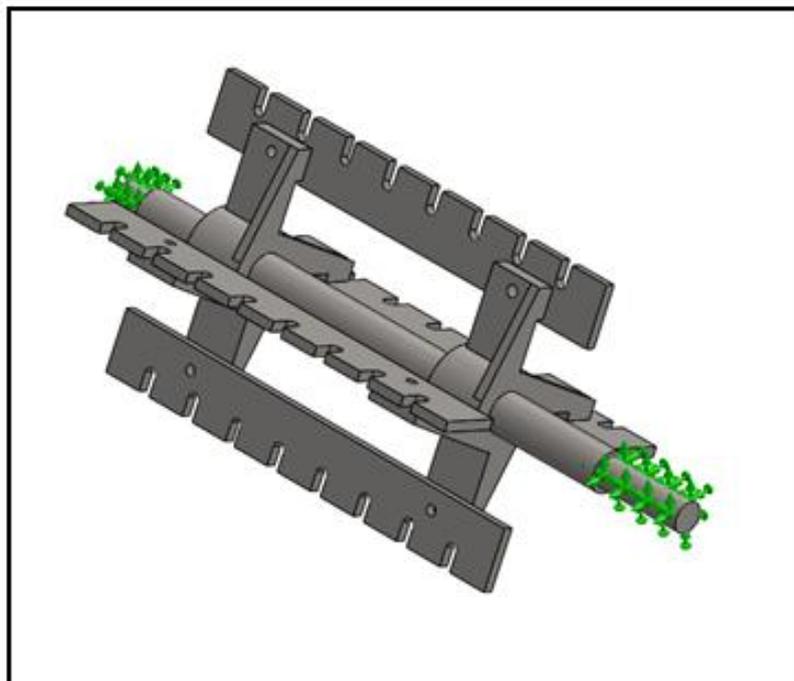


Figure 3-2 :Condition de fixation des paliers.

3-1-4 Informations sur le maillage:

Le maillage établi est représenté dans la [figure 3-3](#) et les informations sur le maillage sont indiquées sur le [tableau 3-2](#).

Tableau3.2 : Informations sur le maillage du modèle établi par SolidWorks

Type de maillage	Maillage volumique
Maillageur utilisé:	Maillage raccordé base sur la courbure
Nombre total d'éléments	19663
Nombre total de noeuds	37778
Points de Jacobien pour un maillage de qualité élevée	16 Points
Taille d'élément maximum	28,5638 mm
Taille d'élément minimum	3,82683 mm
Qualité de maillage	Haute
Remailler les pièces en échec indépendamment	Désactivé(e)

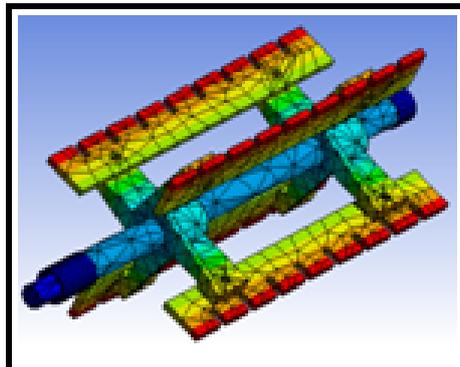


Figure 3-3 : Maillage du système

3-1-5 Résultats de la simulation par SolidWorks:

Les déformées modales du système sont illustrées dans [les figures 3-4](#) au [3-13](#) suivantes :

Nom du modèle: ROTOR DETACHEUR DS 306
Nom de l'étude: Fréquence 1(-Défaut-)
Type de tracé: Fréquence Amplitude1
Mode: 1 Valeur = 233,4 Hz
Echelle de déformation: 0,163068

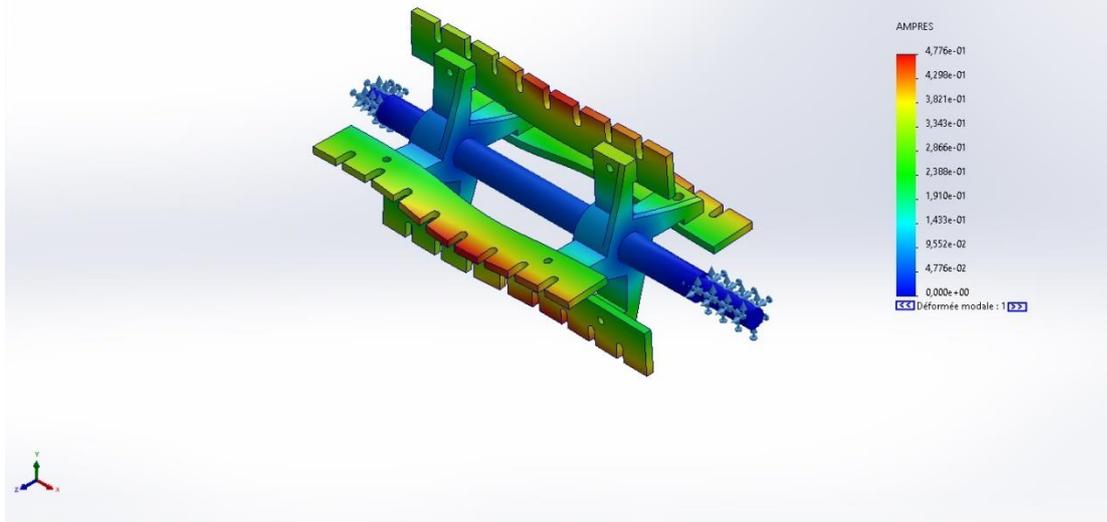


Figure 3-4: Premier mode de vibrations à la fréquence de 233,401 Hz

Nom du modèle: ROTOR DETACHEUR DS 306
Nom de l'étude: Fréquence 1(-Défaut-)
Type de tracé: Fréquence Amplitude2
Mode: 2 Valeur = 384,89 Hz
Echelle de déformation: 0,107485

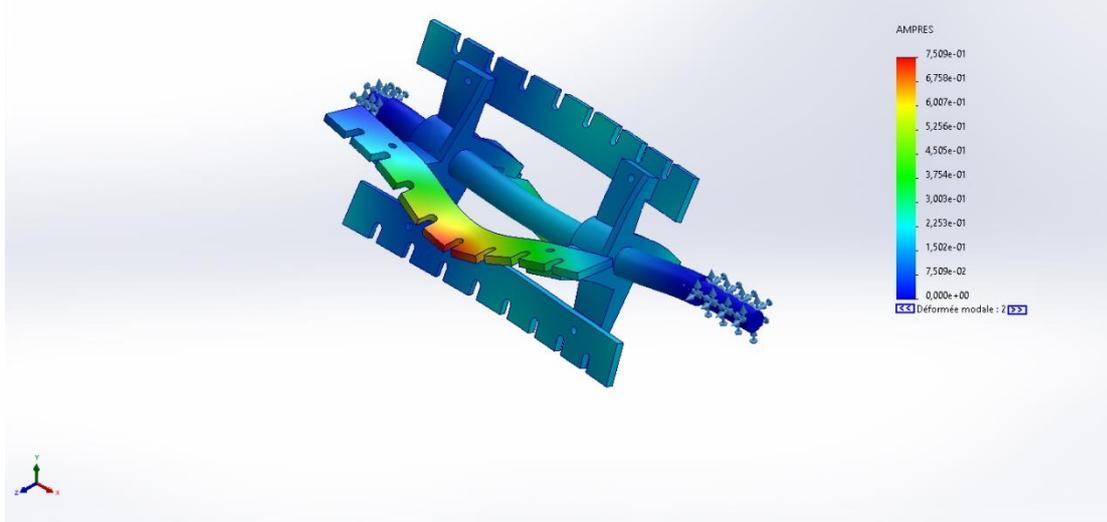


Figure 3-5: Deuxième mode de vibrations à la fréquence de 384,829 Hz

Nom du modèle: ROTOR DETACHEUR DS 306
Nom de l'étude: Fréquence 1(-Défaut-)
Type de tracé: Fréquence Amplitude3
Mode: 3 Valeur = 385,2 Hz
Echelle de déformation: 0,108299

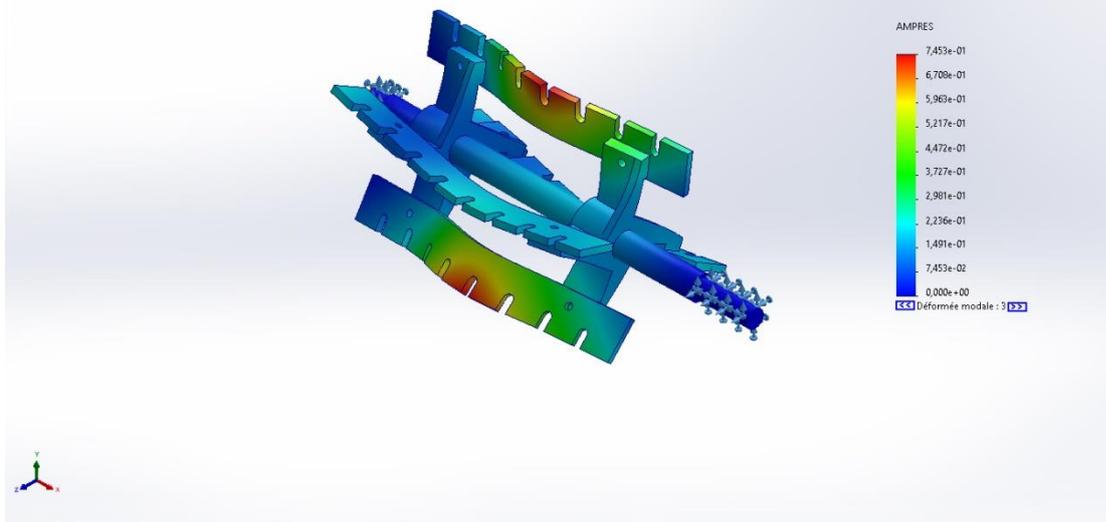


Figure 3-6: Troisième mode de vibrations à la fréquence de 385,203 Hz

Nom du modèle: ROTOR DETACHEUR DS 306
Nom de l'étude: Fréquence 1(-Défaut-)
Type de tracé: Fréquence Amplitude4
Mode: 4 Valeur = 403,14 Hz
Echelle de déformation: 0,117407

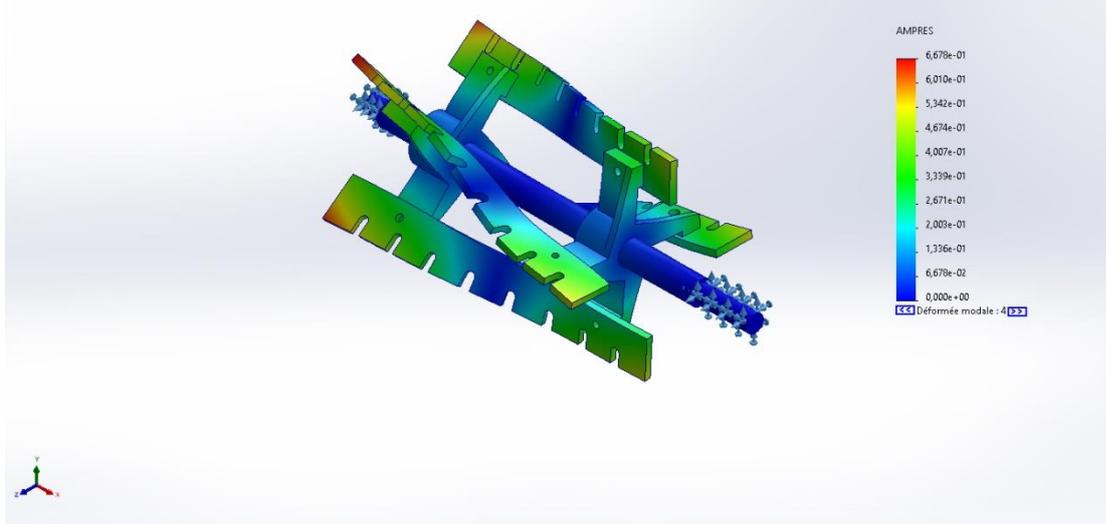


Figure 3-7: Quatrième mode de vibrations à la fréquence de 403,14 Hz

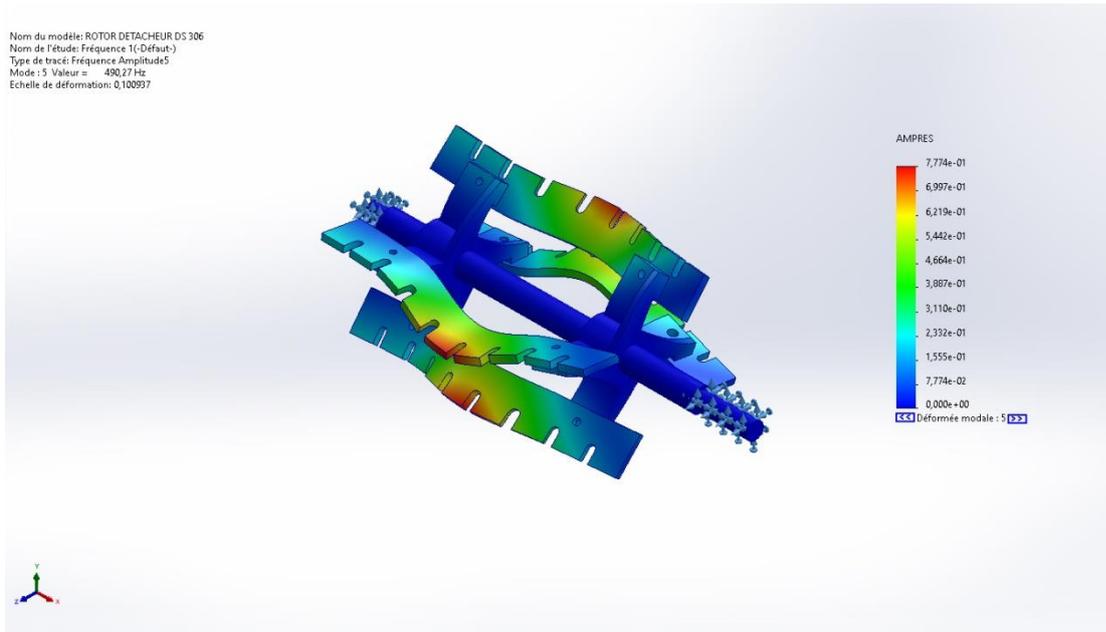


Figure 3-8: Cinquième mode de vibrations à la fréquence de 490,265 Hz

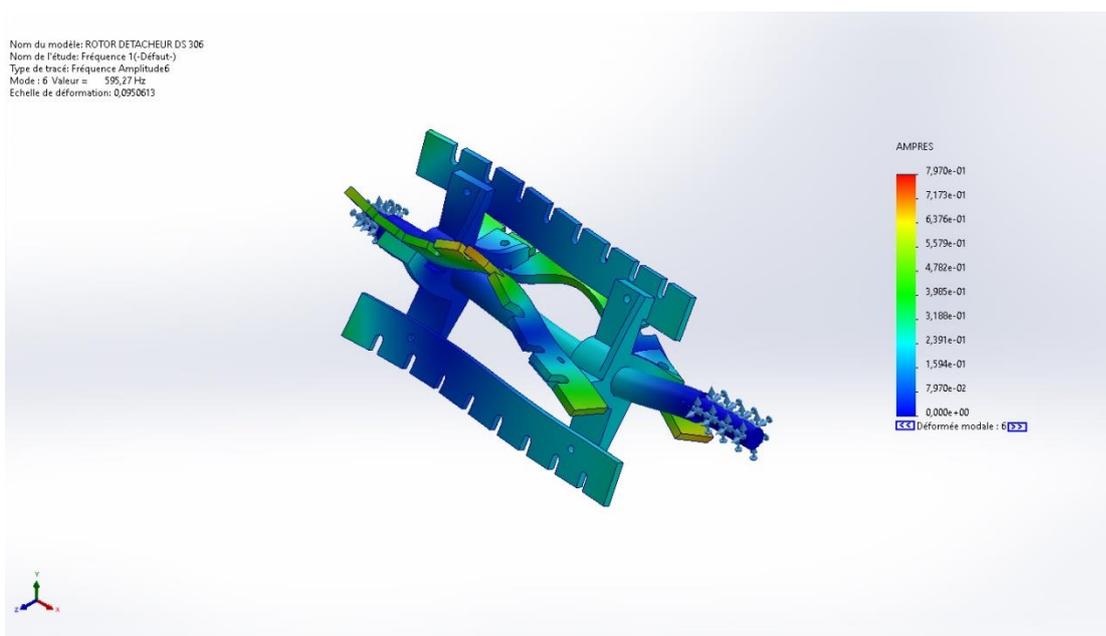


Figure 3-9: Sixième mode de vibrations à la fréquence de 595,267 Hz

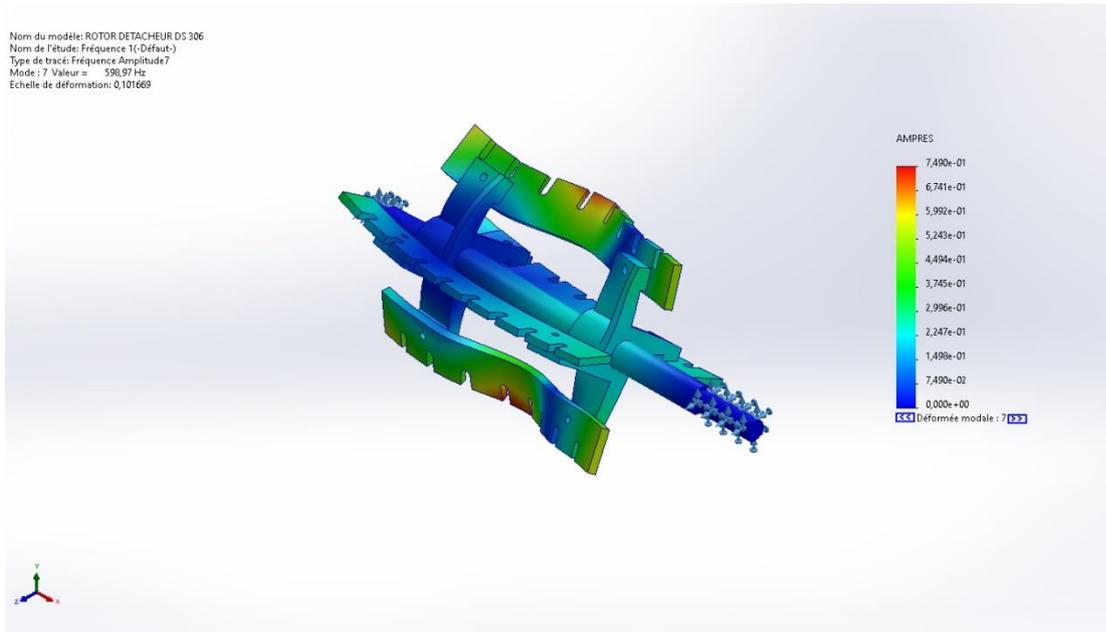


Figure 3-10: Septième mode de vibrations à la fréquence de 598,971 Hz

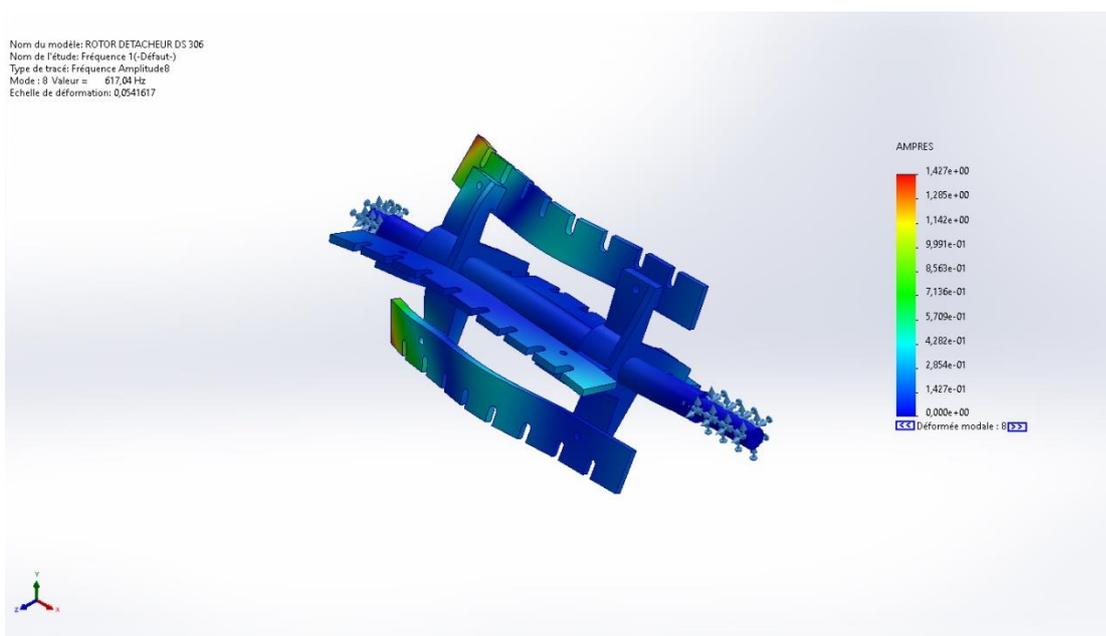


Figure 3-11: Huitième mode de vibrations à la fréquence de 617,038 Hz

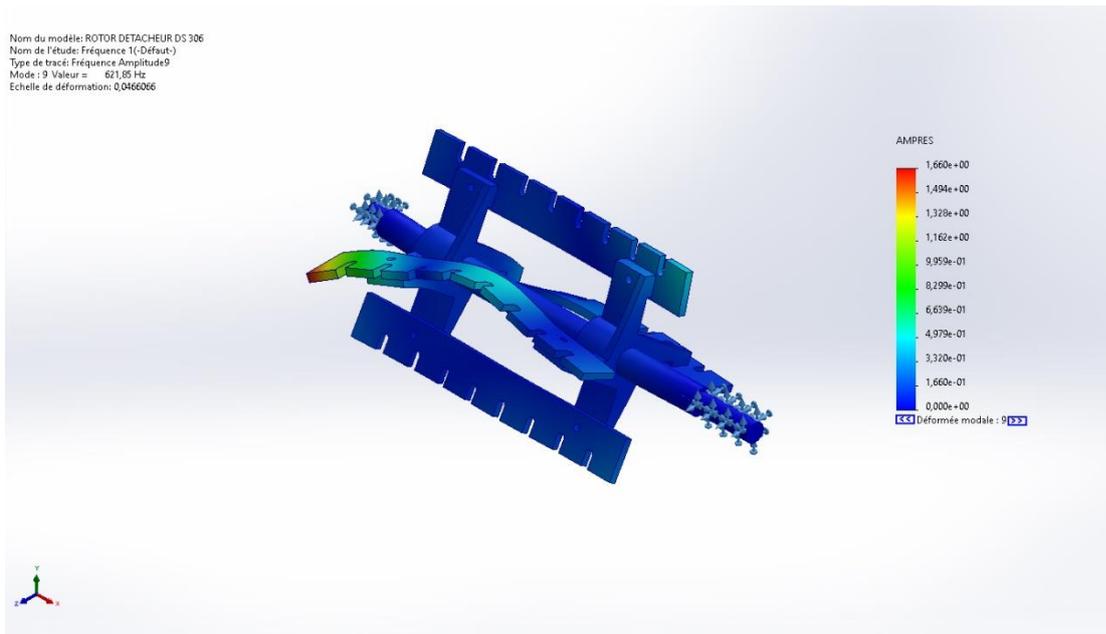


Figure 3-12: Neuvième mode de vibrations à la fréquence de 621,854 Hz

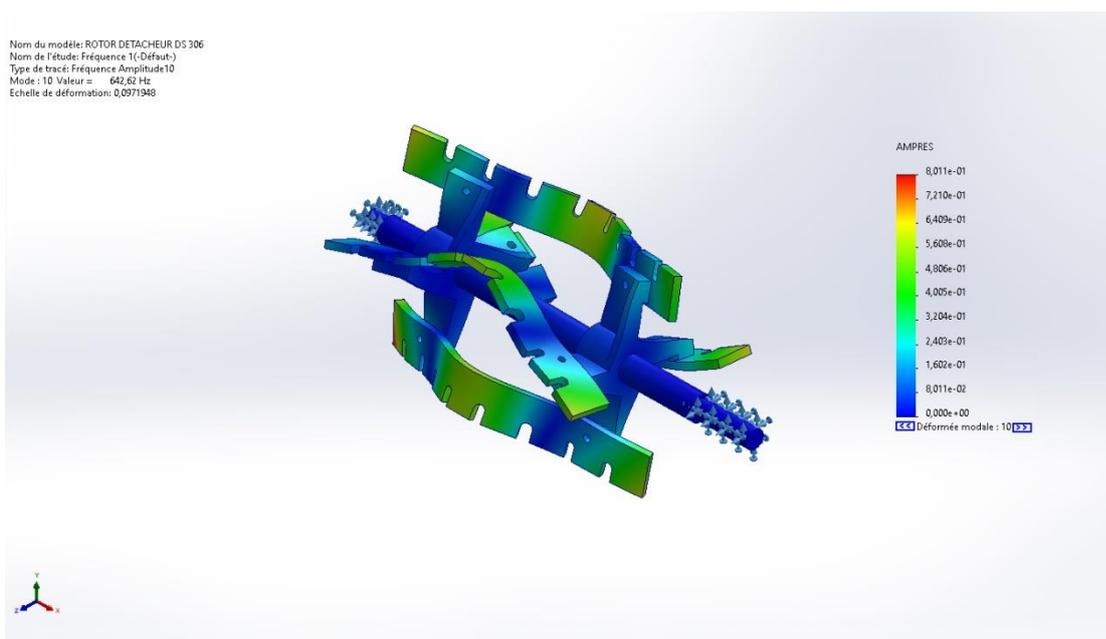


Figure 3-13: Dixième mode de vibrations à la fréquence de 642,617 Hz

3-1-6 Liste des modes :

Tableau 3-3 : Liste des fréquences propres du système étabes par SolidWorks

Fréquence No	Rad/sec	Hertz	Seconds
1	1 466,5	233,4	0,0042845
2	2 418	384,83	0,0025986
3	2 420,3	385,2	0,002596
4	2 533	403,14	0,0024805
5	3 080,4	490,27	0,0020397
6	3 740,2	595,27	0,0016799
7	3 763,4	598,97	0,0016695
8	3 877	617,04	0,0016206
9	3 907,2	621,85	0,0016081
10	4 037,7	642,62	0,0015561

3-1-7 Interprétation des résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation numérique par SolidWorks (analyse modale) du système ont été résumés dans le [tableau 3-3](#). En raison de la symétrie du système, les fréquences propres sont égales et les modes de vibrations associés sont conjugués et symétriques, en accord avec les études fondamentales théoriques. Les modes de vibrations trouvées se manifestent de la façon suivante :

- Le premier mode de vibrations : 233,4 Hz, est un mode de torsion.
- Le deuxième mode de vibrations : 384,83 Hz, est un mode de flexion.
- Le troisième mode de vibrations : 385,20 Hz, est un mode de flexion.
- Le quatrième mode de vibrations : 403,14 Hz, est un mode de torsion.
- Le cinquième mode de vibrations : 490,27 Hz, est un mode de torsion.
- Le sixième mode de vibrations : 595,27 Hz, est un mode de flexion.
- Le septième mode de vibrations : 598,97 Hz, est un mode de flexion.
- Le huitième mode de vibrations : 617,04 Hz, est un mode de torsion.
- Le neuvième mode de vibrations : 621,85 Hz, est un mode de torsion.
- Le Dixième mode de vibrations : 642,62 Hz, est un mode de torsion.

D'après ces résultats, on constate que, sur les dix (10) modes propres de vibrations, nous avons six (06) modes de vibrations de torsion et quatre (04) modes de vibrations de flexion, ceci permet de conclure, que notre système travaille à la torsion plus qu'à la flexion. Aussi, il est à signaler que la plus part des modes de vibrations sont proches aux harmonies de la fréquence de base correspondant à la fréquence de rotation du rotor qui est de 24,95 Hz, en particulier celle de la neuvième harmonie qui est de **224,55 Hz** détecté lors de diagnostic par analyse vibratoire illustré dans le [chapitre 04](#).

Ce problème pourra engendrer une résonance, dans le cas d'apparition d'un défaut de désalignement entre l'arbre moteur et celui du rotor de détacheur. Il est à rappeler que ce type de défaut mécanique, provoque des chocs sous forme d'harmoniques ou des composantes d'amplitudes à la fréquence de base relative à celle de rotation du rotor.

Donc l'apparition de ces harmoniques dans le cas d'un défaut de désalignement ou même un défaut d'usure sur les éléments tournant, suscitera un danger lors de fonctionnement de l'appareil. Ce qui nous permet de dire que le défaut de roulement apparait à maintes reprises sur la machine, est dû à la coïncidence des fréquences propres avec celles de fonctionnement, donc l'apparition des résonances.

3-2 Simulation numérique par Ansys :

3-2-1 Résultat de la simulation du système par Ansys :

Les résultats de la simulation numérique par Ansys (analyse modale) du rotor du détacheur ont été résumés dans le [tableau 3-4](#). Nous avons considéré uniquement les dix (10) premier modes de vibrations, et ce pour pouvoir les confrontés avec ceux déterminés par Solidworks.

Les déformées modales du système sont représentées dans les [figures 3-14](#) jusqu'à [5-13](#), illustrés comme suit :

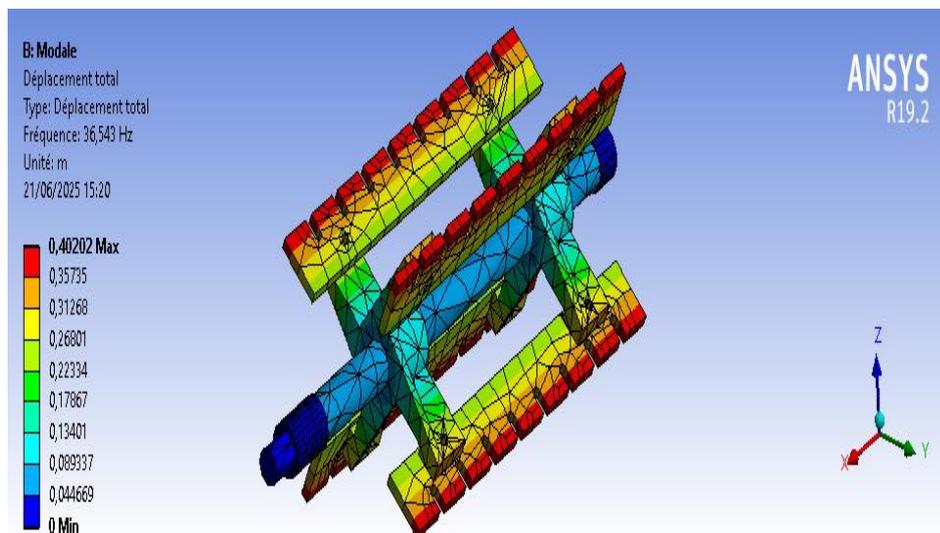


Figure 3-14 : Premier mode de vibrations à la fréquence de 36,543 Hz.

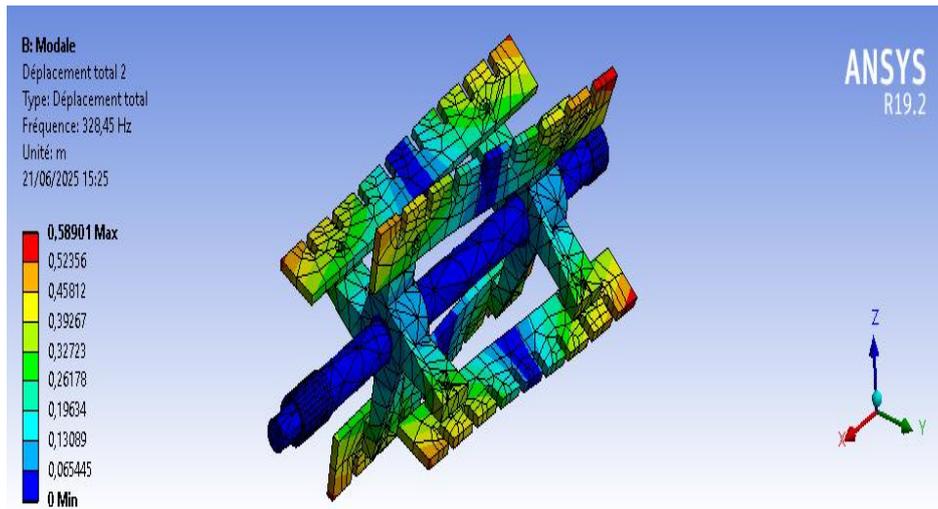


Figure 3-15 : Deuxième mode de vibrations à la fréquence de 328,45 Hz.

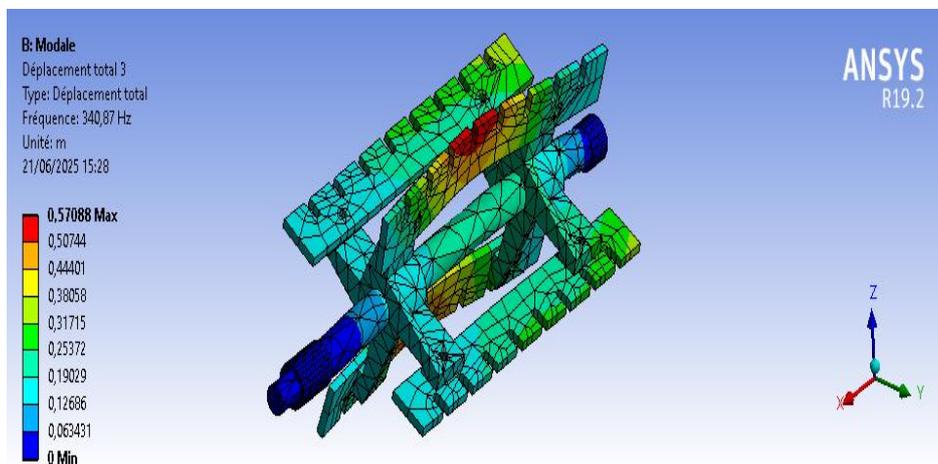


Figure 3-16 : Troisième mode de vibrations à la fréquence de 340,87 Hz.

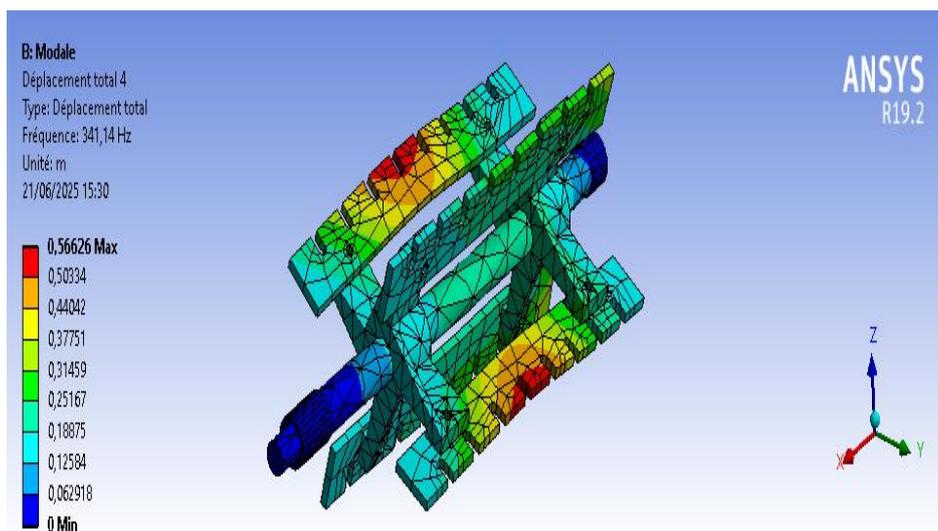


Figure 3-17 : Quatrième mode de vibrations à la fréquence de 341,14Hz.

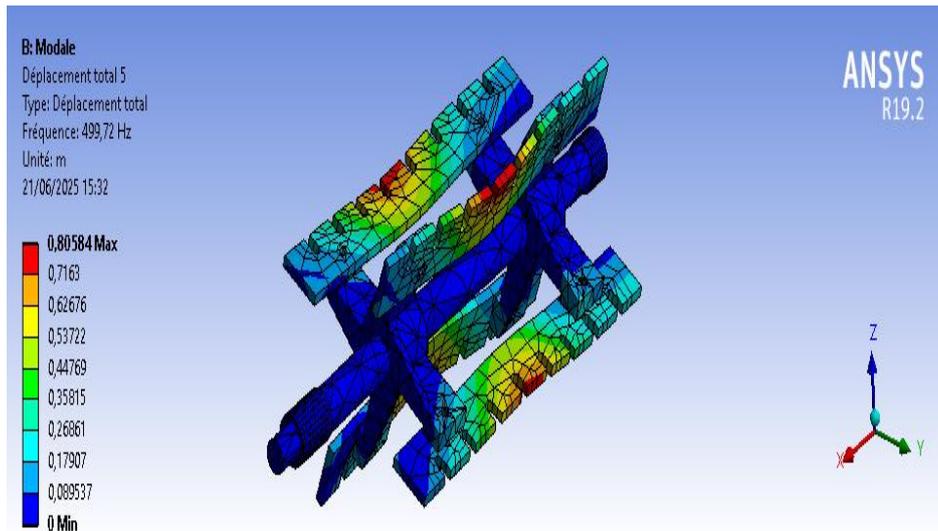


Figure 3-18 : Cinquième mode de vibrations à la fréquence de 499,72Hz.

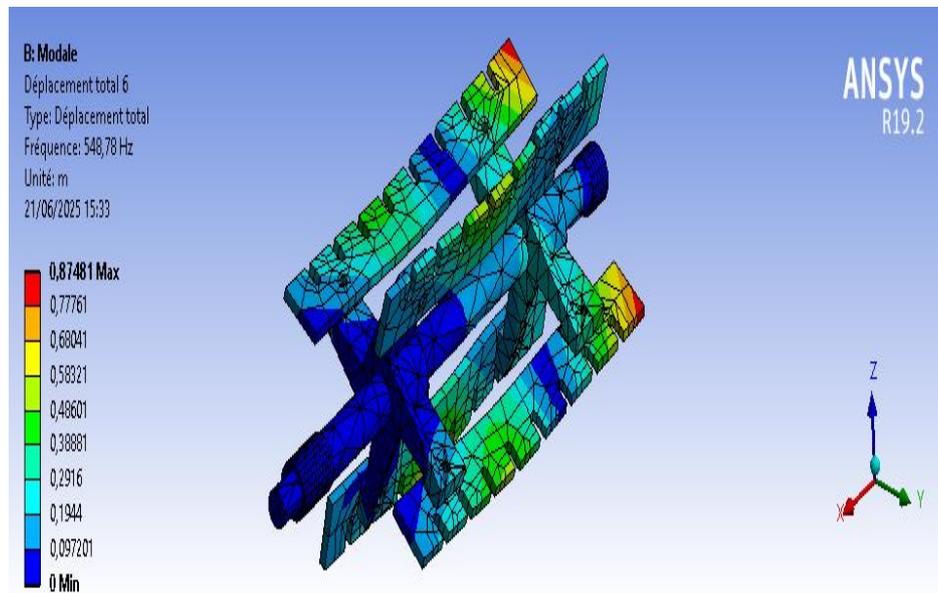


Figure 3-19 : Sixième mode de vibrations à la fréquence de 548,78 Hz.

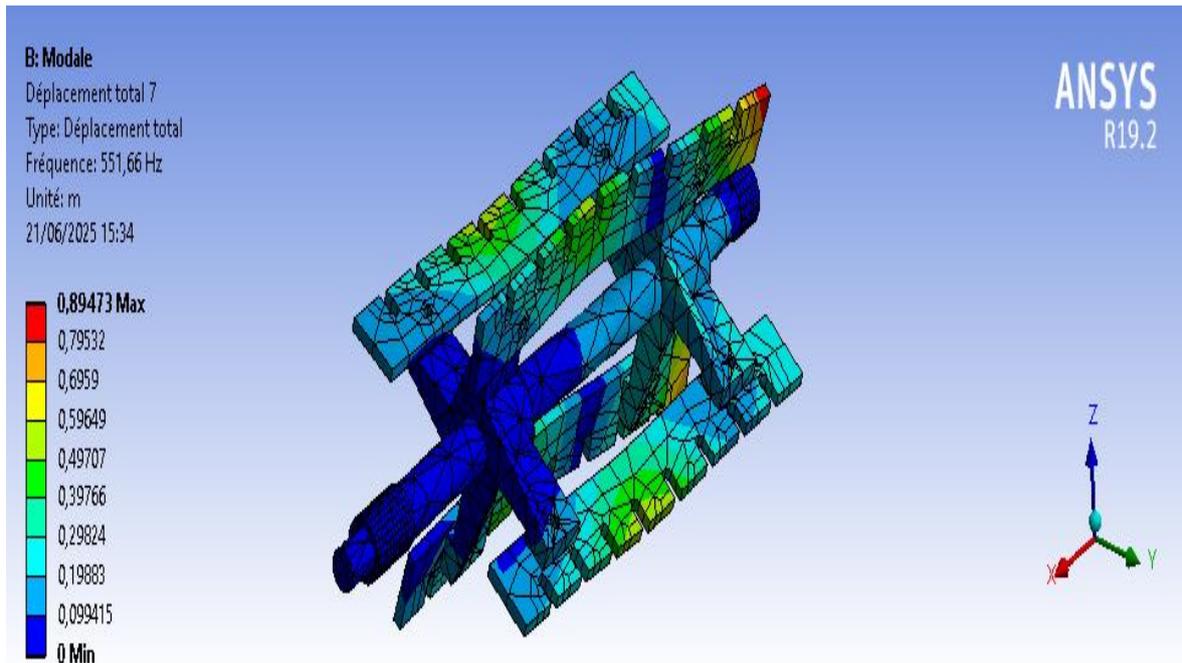


Figure 3-20 : Septième mode de vibrations à la fréquence de 551,66 Hz.

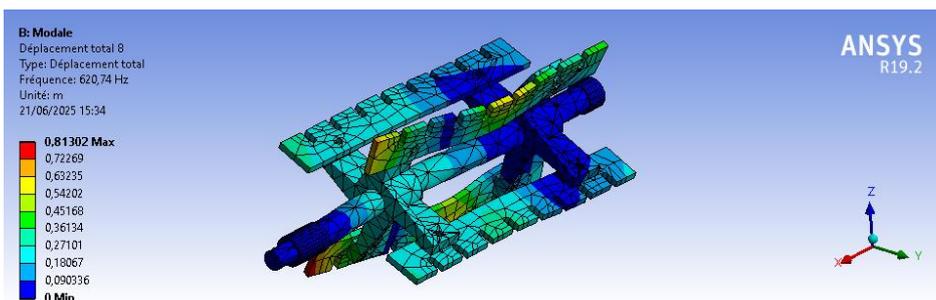


Figure 3-21 : Huitième mode de vibrations à la fréquence de 620,74 Hz.

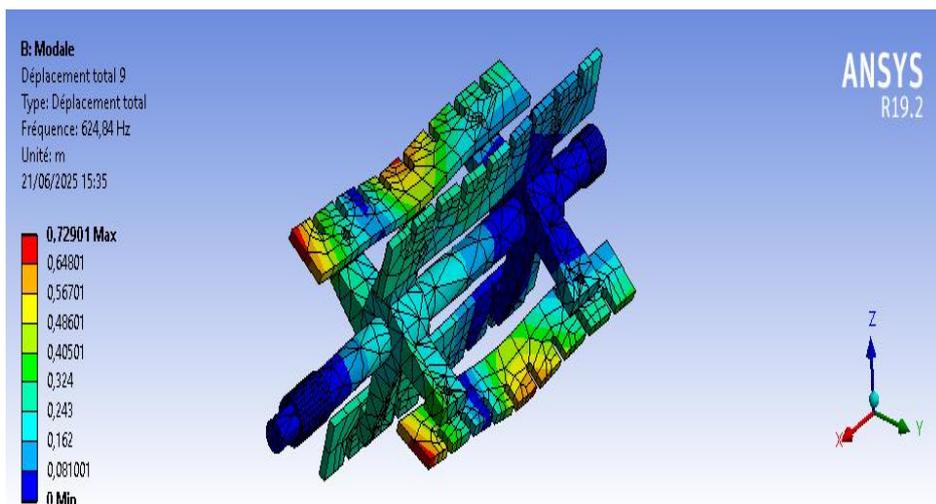


Figure 3-22 : Neuvième mode de vibrations à la fréquence de 624,84 Hz.

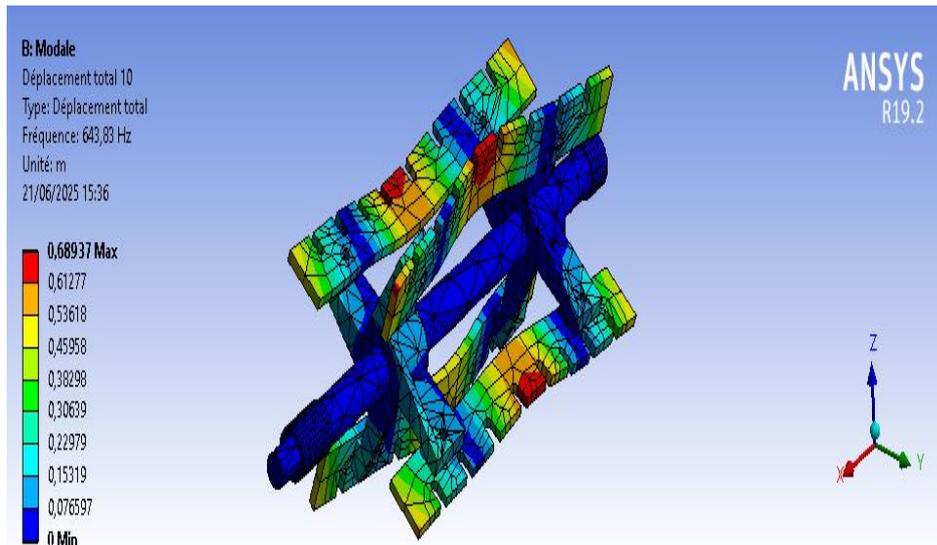


Figure 3-23 : Neuvième mode de vibrations à la fréquence de 643,83 Hz.

N° mode	Pulsation propre en (Rad/s)	Fréquence propre en (Hz)
1	229,49	36,543
2	2062,67	328,45
3	2140,66	340,87
4	2142,36	341,14
5	3138,24	499,72
6	3446,34	548,78
7	3464,43	551,66
8	3898,25	620,74
9	3924	624,84
10	4043,25	643,83

Tableau 3-4 : liste des fréquences propres du système par Ansys.

3-2-2 Interprétation des résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation numérique par Ansys (analyse modale) du système ont été résumés dans le [tableau 3-4](#). On remarque que :

Le premier mode de vibrations (**36,543**) : est un mode de torsion.

Le deuxième mode de vibrations (**328,45**) : est un mode de torsion.

Le troisième et quatrième mode de vibrations, se manifestent respectivement aux fréquences (**340,87 Hz**) et (**341,14**) : sont des modes de flexion.

Le cinquième mode de vibrations (**499,72**) : est un des mode de torsion.

Le sixième et septième mode de vibrations, se manifestent respectivement aux fréquences (**548,78 Hz**) et (**551,66**) : sont des modes de flexion.

Le huitième mode de vibrations (**620,74**) : est un mode de torsion.

Le neuvième mode de vibrations (**624,84**) : est un mode de torsion.

Le dixième mode de vibrations (**643,83**) : est un mode de torsion.

D'après ces résultats, on constate que, sur les dix (10) modes propres de vibrations, nous avons six (06) modes de vibrations de torsion et quatre (04) modes de vibrations de flexion, ceci permet de conclure, que notre système travaille à la torsion plus qu'à la flexion.

3-3 Confrontation et validation des résultats numériques avec ceux de l'expérimentale :

Les défauts mécaniques détectés lors de fonctionnement du détacheur sont principalement le défaut de déséquilibre sur le rotor du détacheur, en provoquant des défauts de roulement dans les deux paliers portant ce rotor et défaut de jeu sur les portées de roulements. Ce jeu est interprété par la présence des harmoniques, sous formes de composante à la fréquence de base de 16,25 Hz (voir [figure 4-5](#)), celle de la vitesse de rotation du rotor du détacheur.

De ce fait, nous allons illustrer ces différents résultats dans le [tableau 3-5](#) ci après et nous allons représenter à titre indicatif les deux premier modes de vibrations :

N° de la fréquence propre (mode propre)	Déterminé par solidworks (Hz)	Déterminé par ANSYS (Hz)	La fréquence détectée expérimentalement en Hz	
			Fréquence de base du rotor du détacheur (16,25 Hz) Fréquence de base du moteur électrique (24,75Hz)	Fréquence de défaut de roulement (138,75) (figure 4-6)
1	233,4	36,543	32,5 Hz deuxième harmonie de la fréquence de base du rotor du détacheur. 224,55 Hz Neuvième harmonie de la fréquence de base du moteur électrique.	
2	384,83	328,45	325 Hz Vingtième harmonie de la fréquence de base du détacheur (16,25 Hz). 390 Hz Vingt quatrième harmonie de la	416,25 Hz Troisième harmonie de la fréquence liée à la cage du roulement. (138,75 Hz)

			fréquence de base du détacheur (16,25 Hz).	
--	--	--	--	--

Tableau 3-5 : Confrontation des résultats de la simulation numérique avec ceux de L'expérimentale.

Commentaire :

Les résultats de la simulation numérique se concordent avec les fréquences détectés par l'expérimentation relative à ceux générés par le défaut de jeu sur les portées de roulement et ses chocs et leurs harmonies. On remarque que les fréquences générées par le défaut de roulement se manifestent à hautes fréquences, ce qui nous permet de dire que ces derniers ont une forte probabilité de se coïncider avec les fréquences propres liées aux modes propres supérieur ou égale à 04 (tableau 3-5).

D'après les deux simulations numériques par Solidworks et Ansys, les modes de vibrations commencent par les modes de torsion, ou nous avons remarqué que sur les dix (10) modes propres de vibrations, nous avons six (06) modes de vibrations de torsion et quatre (04) modes de vibrations de flexion. Ce qui permet de conclure, que notre système travaille à la torsion plus qu'à la flexion.

5-5 Conclusion :

L'examen de tous ces modes propres, nous permet de conclure que les fréquences propres du système et celles du fonctionnement de l'installation sont proches, en général sur presque tous les modes propres de vibrations. Ces fréquences propres pourront coïncider dans le cas d'une défaillance mécanique dans le système, qui constitue un risque lors du fonctionnement de la machine.

Grâce à l'étude et à la simulation numérique, nous pouvons réduire le pourcentage de pannes mécaniques et éventuellement leur trouver des solutions.

CHAPITRE 04

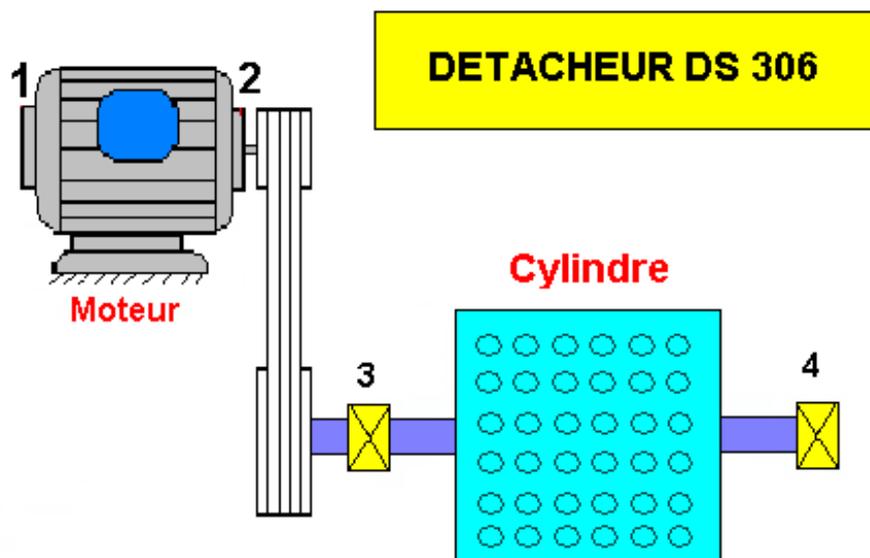
CHAPITRE 04 :ETUDE EXPERIMENTAL Analyse vibratoire d'une machine tournante cas d'un Détacheur DS 306

4.1 Introduction

Dans ce travail, on se propose d'étudier une machine tournante stratégique dans une semoulerie, afin de procéder à l'application de l'analyse vibratoire tant sur le plan théorique que sur le plan pratique. C'est le cas du Détacheur DS 306, présentant des défauts mécaniques et de déséquilibre au niveau de l'arbre portant les lames du détacheur. Concernant les défauts mécaniques, nous avons enregistré l'apparition de défaut de roulement, et échauffement des paliers et usure des portées de roulement. Ces défaillances ont suscité des arrêts intempestifs à maintes reprises.

L'interprétation spectrale des mesures de vibrations prises, s'avère délicate, car ces défauts sont associés et génèrent les mêmes images spectrales.

4.2 Application : Exemple d'un Cas vécu, celui du Détacheur DS 306.



Schema cinématique et points de mesures de vibrations

Figure 4-1 Schéma cinématique et points de mesures de vibrations.

Nomenclature :

Moteur électrique : Marque : SIEMENS

Puissance : 2,55Kw

Vitesse de rotation : 1485 Tr/min équivalent à 24,75 Hz

Poulie motrice : diamètre : 80 mm

Largeur : 115 mm

Nombre de gorges : 02

Poulie réceptrice : diamètre : 120 mm

Largeur : 115 mm

Nombre de gorges : 02

Roulement : Référence : 21307-E

Courroies : Trapézoïdales C-120

Palettes: $\varnothing = 500 \text{ mm}$

Nombre : 04.



Photo 4-1 : Machine détacheur DS 306

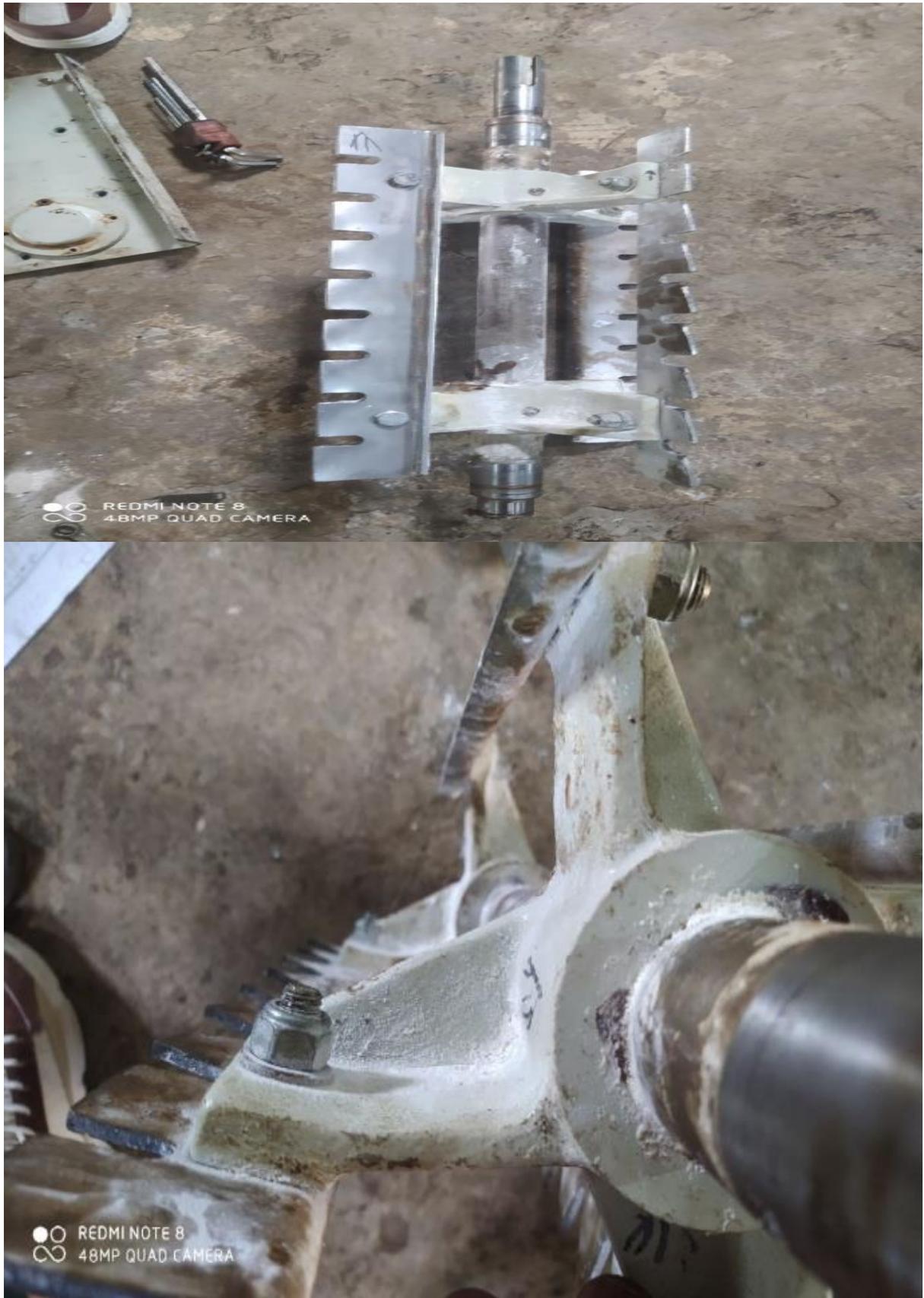


Photo 4-2 : Rotor détacheur DS 306



Photo4-3 : Roulement et courroie de transmission du détacheur



Photo 4-4 : Contrôle des portées de roulement et déformation du rotor détacheur DS 306

4-3 Machine Détacheur DS 306 :

4-3-1 Description de la machine :

Le Détacheur DS 306, est un équipement stratégique dans une Semoulerie industrielle, situé dans la zone expédition son rôle est la décomposition du produit jusqu'à l'étape farine provenant des appareils cylindres comme l'indique la [Figure4-2](#). L'installation est composée d'un moteur électrique de puissance de 2,55 Kw, tournant à 1485 tr/min, entraînant un arbre horizontal portant les lames du détacheur, de diamètre 500 mm, et de largeur de 600 mm ([photo 4-1](#)).

4-3 Choix des points de mesures de vibrations :

Les points de mesures de vibrations sont choisis de manière à obtenir avec précision de l'information dont on a besoin. Notre objectif dans ce cas, est d'essayer de connaître l'état général de la machine. Il est donc nécessaire de connaître l'état des roulements du système, est le comportement de la ligne d'arbre horizontal portant laturbinefaisant l'objet de notre étude. La [figure 4-1](#) permet d'étudier la machine et de choisir les points de mesure de vibrations sur les paliers qui serviront à détecter toutes les défaillances qui peuvent surgir sur la machine lors de son fonctionnement. La programmation des points de mesure est établie d'une manière qui permet de capter toutes les fréquences d'intérêt et de suivre leurs évolutions dans les deux (02) directions horizontale et verticale.

4-4 Historique de la machine :

Le suivi par la méthode de l'analyse vibratoire de la machine est commencé le : 03 Juin 2021, ou l'interprétation spectrale ne révèle pas d'anomalies susceptible d'être citée, à l'exception d'un léger désalignement entre l'arbre moteur et celui de l'arbre portant le détacheur, générant des vibrations d'un niveau globale de 02,95 mm/s sur le palier moteur dans le sens horizontal, comme l'indique la courbe de [tendance 4-2](#). Le [tableau 4-1](#) résume les interventions réalisées sur la machine. Nous remarquons que le 10 Août 2023, le niveau de vibrations enregistré à pris une tendance haussière de 08,02 mm/s sur le palier moteur dans le sens horizontal , jugé Alarmant en se référant aux critères du jugement des vibrations, d'après les normes internationales VDI 2056. Cette évolution du niveau vibratoire est dû à la présence d'un défaut de déséquilibresur le rotor portant le détacheur.

Date de mesure	Niveau de vibrations globale en (mm/s) sur le palier N°02, sens horizontal	Niveau de vibrations globale en (mm/s) sur le palier N°03, sens horizontal	Niveau de vibrations globale en (mm/s) sur le palier N°04, sens horizontal	Commentaires
03 Juin 2021	02,95	01,12	01,10	
22 Mai 2023	05,27	02,99	01,26	Equilibrage du rotor portant le détacheur.
10Août 2023	08,02	02,68	01,95	Changement des roulements moteur et des deux roulements du détacheur. Nettoyage du détacheur.
15Mai 2024	05,20	02,22	02,06	Changement des roulements dans les

				paliers du détacheur.
20 Novembre 2024	04,74	01,68	01,56	
21 Mai 2025	06,12	01,70	01,77	Changement des roulements dans les paliers du détacheur.

Tableau 4-1 : Etat récapitulatif des mesures de vibrations sur le palier N°02 du détacheur DS 306, ainsi que les interventions.

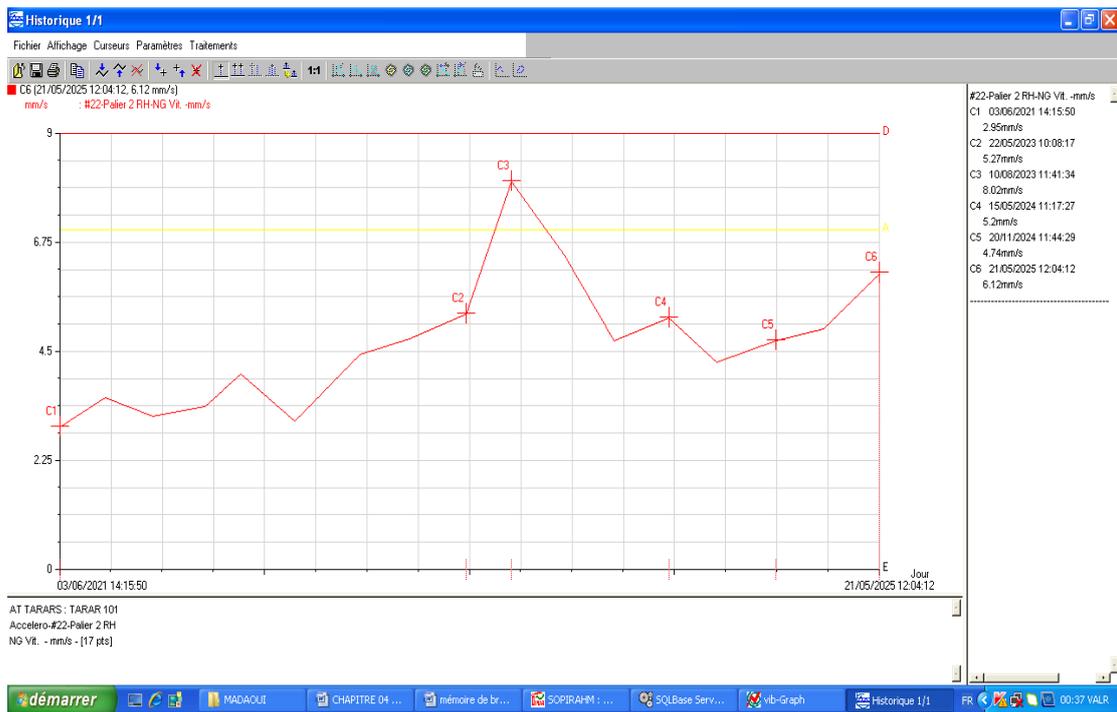


Figure 4-2 : tendance vibratoire du détacheur DS 306 sur le palier N°02 dans le sens horizontal.

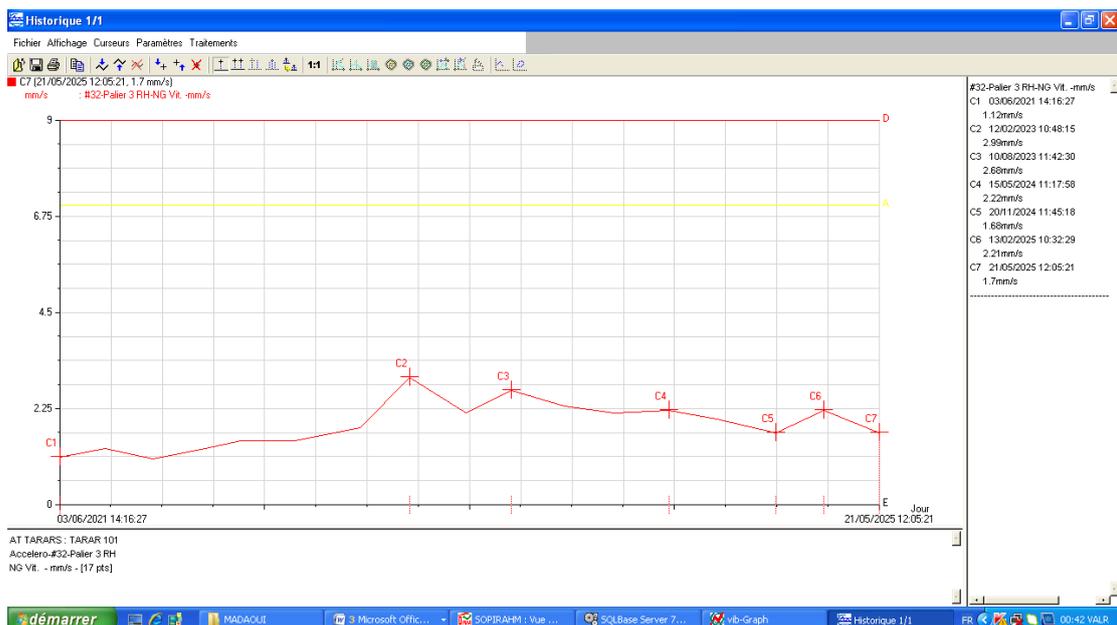


Figure 4-3 : tendance vibratoire du détacheur DS 306 sur le palier N°03 dans le sens horizontal.

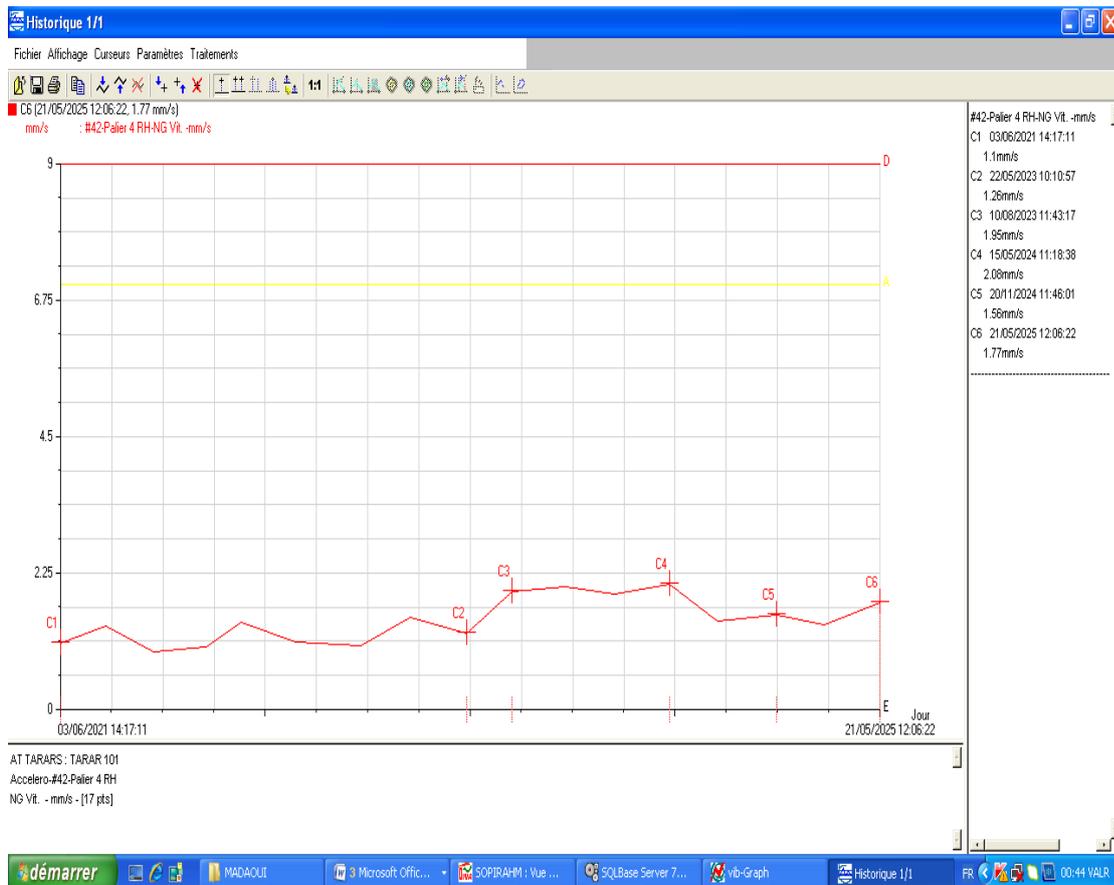


Figure 4-4 : tendance vibratoire du détacheur DS 306 sur le palier N°04 dans le sens horizontal.

4.5 Diagnostic vibratoire et analyse des résultats :

4-5-1 L'interprétation spectrale des mesures prises sur toute la chaîne cinématique machine, nous a permis de conclure la présence des anomalies suivantes :

- Détection d'un défaut de roulement dans le palier moteur et dans les deux paliers N°03 & 04 portant le détacheur, générant des vibrations d'un niveau globale de 08,02 mm/s, jugé Alarmant d'après les normes internationales VDI 2056, comme l'indique le spectre représenté dans la figure 4-5, pris sur le palier moteur N°02, dans la direction verticale, et ce le : 08 Juillet 2024.
- Détection d'un choc sur la ligne d'arbre portant le rotor du détacheur, il s'agit d'un jeu fonctionnel entre les éléments roulant et les deux bagues intérieur et extérieur des deux roulements dans les deux paliers N°03 et 04, comme l'indique les deux spectres vibratoires représentés respectivement dans les figures 4-6 & 4-7.

La figure 4-8 donne une fenêtre concernant les points de mesures de vibrations de la machine pompe finisseur en terme de vitesse et accélération vibratoire.

4-6 Travaux réalisés : ces travaux sont illustrés dans le [tableau 4-1](#) :

- Changement des roulements de référence 21307-Edans lesdeux paliers N°03 et 04 (à plusieurs reprises).
- Contrôle de l’alignement entre les deux arbres moteur et celui du détacheur.
- Contrôle de l’équilibrage du rotor portant le détacheur.

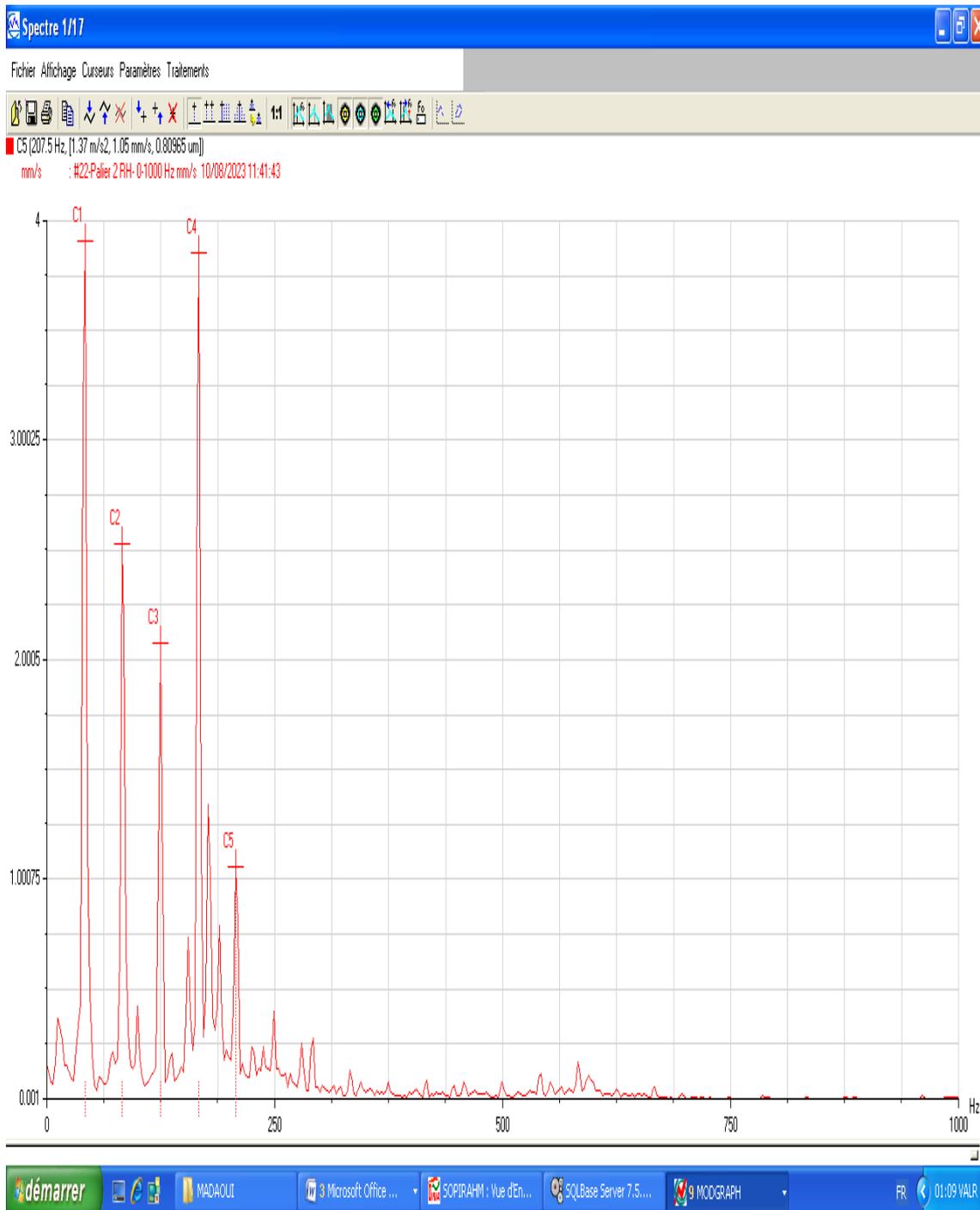


Figure 4-5 : Spectre pris sur le palier moteur N°02 dans la direction horizontale, le : 10Aout 2023. Révèle la présence d’un défaut de roulement dans les deux paliers du détacheur.

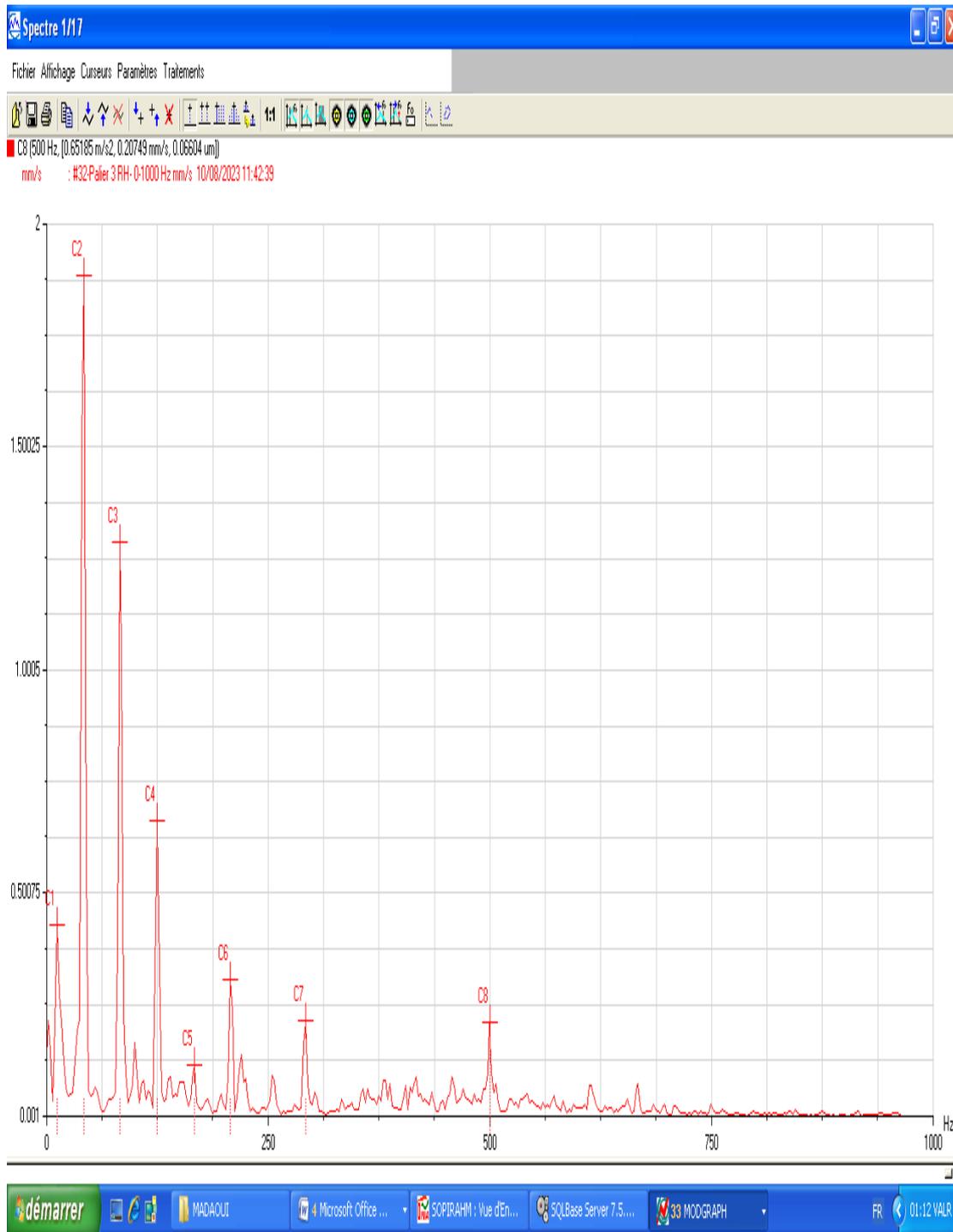


Figure 4-6 : Spectre pris sur le palier N°03 dans la direction horizontale, le : 10Aout 2023. Révèle la présence d'un défaut de roulement dans les deux paliers du détacheur.

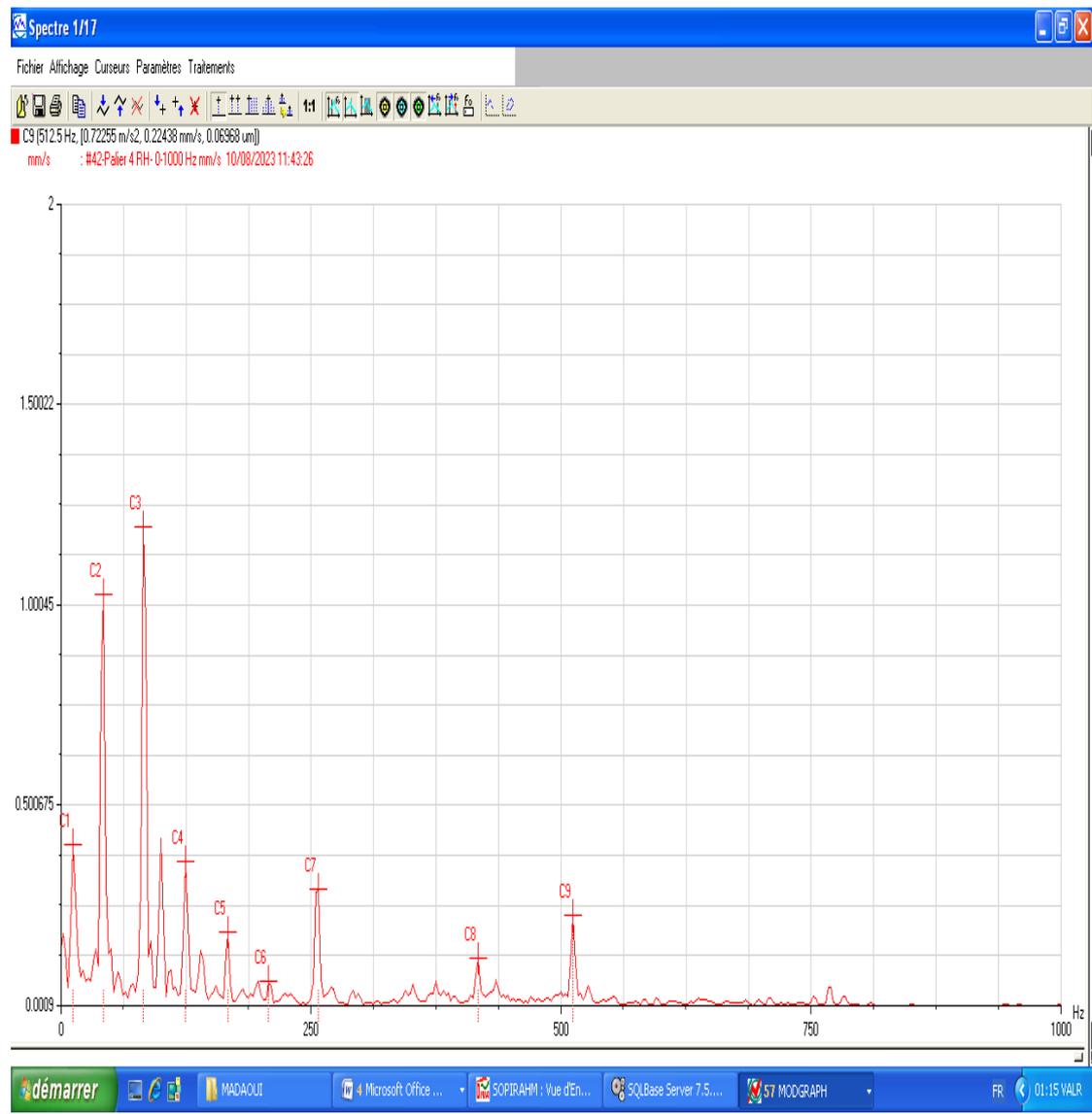


Figure 4-7 : Spectre pris sur le palier N°04 dans la direction horizontale, le : 10Aout 2023. Révèle la présence d'un défaut de roulement dans les deux paliers du détacheur.

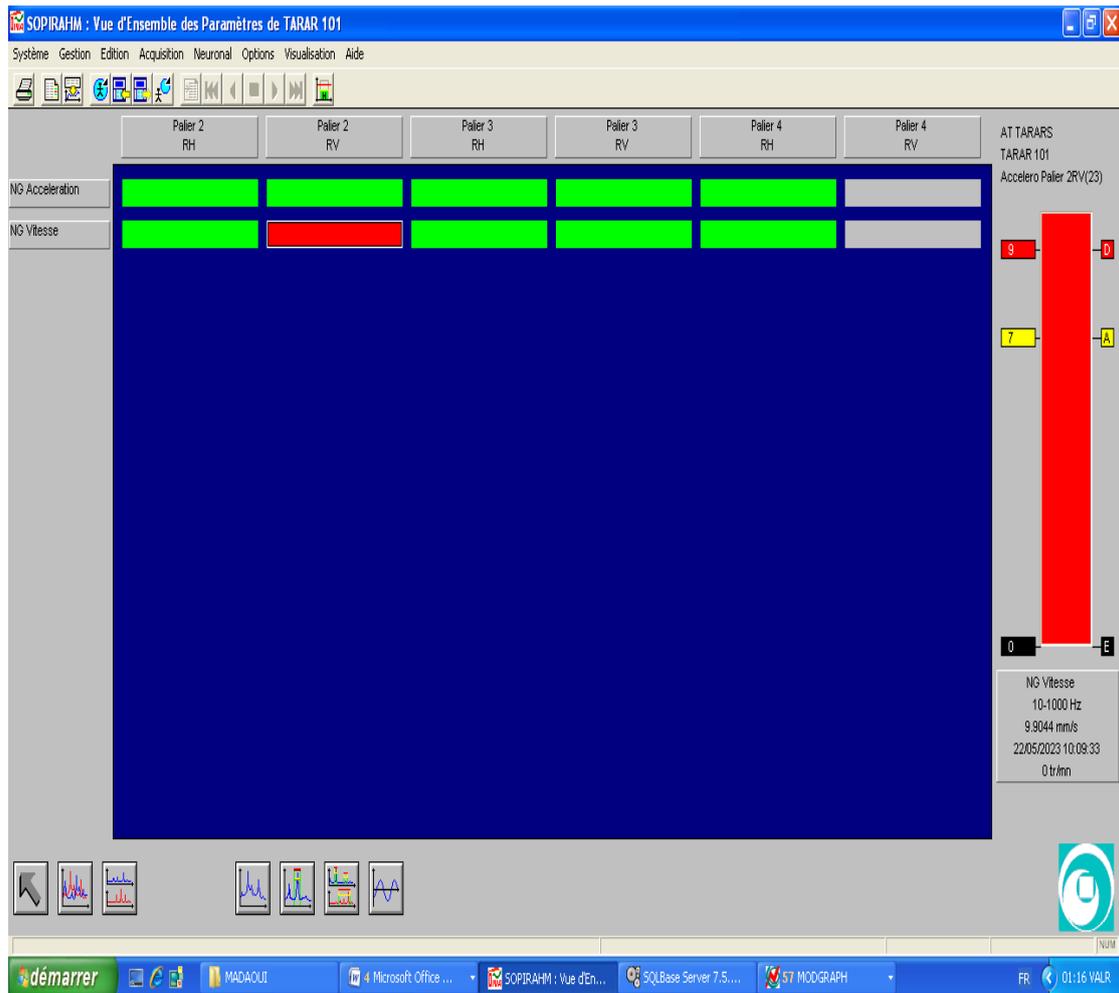


Figure 4-8 : Présentation de la fenêtre du suivi vibratoire sur toute la chaîne cinématique de machine Détacheur DS 306.

4.7 Solutions proposées :

- Revoir le changement du type de palier portant le rotor du détacheur et les remplacer par type SNH ou SN.
- Revoir le dimensionnement des roulements et choisir un bon type de ces dernier.
- Utilisation des plots d'amortissement aux points de fixation de la machine, afin d'amortir les chocs générés par les vibrations propagés dans la structure de la machine.

4-8 Conclusion :

Les machines du type traité nécessitent un contrôle vibratoire. Cela augmente leur disponibilité. Nous avons pu planifier des interventions de réparation et équilibrage. L'installation avait plusieurs défauts mécaniques, notamment le défaut déséquilibre relatif au désalignement des deux poulie motrice et réceptrice et le balourd sur le rotor portant le détacheur. Aussi, des défauts de roulement dans le palier moteur et dans les deux paliers de l'arbre portant le détacheur. Le changement de ces roulement à été réalisé à maintes reprises qui nous a obligé de revoir le dimensionnement de ces roulements objet de notre étude.

Ces résultats pratiques enregistrés seront confrontés avec ceux trouvés numériquement.

Conclusion Générale

Ce travail de fin d'études a permis de mener une démarche complète de conception, de modélisation, de simulation et d'analyse vibratoire appliquée à un broyeur de type détacheur DS 306, un équipement industriel largement utilisé dans les semouleries et minoteries pour le décorticage de la semoule et la farine de blé alimentaire.

Dans un premier temps, une supervision approfondie a été réalisée afin de comprendre les différents types de broyeurs, leur fonctionnement, et les contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis. Cette base de connaissances a servi de fondement solide pour le choix du modèle étudié.

Ensuite, une attention particulière a été portée à la maintenance industrielle, en mettant en évidence les stratégies correctives et préventives modernes.

Sur le plan numérique, deux logiciels de simulation – SolidWorks et Ansys – ont été utilisés pour effectuer une analyse modale du système rotor du détacheur DS306. Les résultats obtenus ont été confrontés avec des résultats expérimentaux issues de mesures vibratoires réelles, confirmant ainsi la validité de la modélisation et mettant en lumière des phénomènes de résonance potentiellement critiques.

Enfin, des solutions techniques ont été proposées afin de remédier aux défauts identifiés, comme le désalignement ou l'usure des roulements. Ces recommandations visent à améliorer la stabilité dynamique de l'installation et à renforcer sa robustesse opérationnelle.

Finalement, cette étude illustre l'importance d'une approche pluridisciplinaire alliant connaissance théorique, compétences numériques et expertise terrain pour résoudre des problématiques industrielles concrètes. Elle ouvre également la voie à des perspectives futures telles que l'intégration de la maintenance prédictive via l'intelligence artificielle ou encore l'optimisation énergétique des systèmes de broyage.

[1]. Université Badji Mokhtar-Annaba. Conception d'un broyeur à double rouleaux dentés HGHHGHPour ferro-alliages.

[2]. Université Badji Mokhtar-Annaba. Conception d'un broyeur à double rouleaux dentés Pour ferro-alliages

[3] P 32 Procédés et machines de traitement des minéraux utiles : le manuel/ P.I. Pilov, O.V. Petrova. – D. : Université Nationale des Mines, Ukraine 2013. – 114 p

[4] IES-AV, Conception d'un broyeur laboratoire, rapport technique, France, 2018. Disponible sur : <https://ies-avignon.fr>(consulté le 16 juin 2025).

[5] Broyeur a marteaux Appareils Dragon. .

[6] Leblanc A., Les Machines Tournantes : Théorie et Applications, Éditions Techniques de l'Ingénieur, Paris, 2015.

[7] Pony S.p.A, Fiche technique du détacheur DS306, Document interne, 2020.

[8] Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance Année Universitaire : 2019 / 2020

[9] UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABALES MOEYNS ORGANISATIONNELS ET LOGISTIQUE D'UN SERVICE DE MAINTENANCE Année : 2015 /2016

[10] Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Khider - Biskra, Département de Génie Mécanique, 2020.

[11](Source : Khaldi, A., Université de Laghouat, 2021)

[12] Djafer, Yacine. Application de l'analyse vibratoire dans la maintenance conditionnelle d'un moteur industriel. Mémoire de fin d'études, Université de Bejaïa, Département de Génie Mécanique, 2019. <http://dspace.univ-bejaia.dz>

[12] Boussaada, Mohamed. Surveillance vibratoire des machines tournantes : Cas des compresseurs industriels. Mémoire de Master, Université de M'sila, 2020. <http://dspace.univ-msila.dz>

[13] Khaldi, Ahmed. Étude de l'analyse vibratoire dans la maintenance prévisionnelle – Application dans l'industrie du ciment. Université de Laghouat, Département de Génie Industriel, 2021. <http://dspace.lagh-univ.dz>

[14] Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER – Algérie), "Panorama des pratiques de maintenance dans le secteur industriel algérien", CDER, 2020. Site web : www.cder.dz.

[15] Boulenger, A. & Pachaud, C. (2009) Surveillance des machines par analyse des vibrations Éditions Dunod classique dans l'analyse vibratoire

[16] Techniques de l'Ingénieur (2022) Outils de diagnostic : Analyse vibratoire des machines tournantes Article technique – Base documentaire professionnelle techniques-ingenieur.fr

[17] Bisu, C.-F., Darnis, P., K'Nevez, J.-Y., et al. (2007) Nouvelle analyse des phénomènes vibratoires en tournage Étude expérimentale et modélisation 3D arxiv.org/abs/0710.2805

[18] Rigaud, E. & Barday, D. (2007) Modélisation et analyse de l'erreur statique de transmission d'un engrenage Simulation vibratoire par éléments finis arxiv.org/abs/physics/0701043

[19] Auteur anonyme (2023-2024) Étude de simulation numérique de vibration d'une machine tournante Projet de fin d'études, Université de Témouchent dspace.univ-temouchent.edu.dz