



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة  
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des Mines  
قسم الإلكتروميكانيك  
Département Electromécanique



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Maintenance Industrielle

### Détection et diagnostic des défaillances du concasseur par l'analyse vibratoire (cas de la Cimenterie d'Elmalubiod)

Par

Abbad Lina Douaa et Mayouf Oumnia

Devant le jury :

Louafi Messaoud	Pr	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
Taleb Mounia	MCA	Encadreur	Université Larbi Tebessi Tébessa
Soudani Mouhamed Salah	MAA	Examineur	Université Larbi Tebessi Tébessa

Promotion 2022-2023



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le :

### Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1- Abbad Lina Douaa

2- Maayouf Oumnia

Niveau : -----Master-----

Option : Maintenance industrielle-----

Thème :- **Détection et diagnostic des défaillances du concasseur par l'analyse vibratoire ( cas de la Cimenterie d'Elmalabiod**

Nom et prénom de l'encadreur : -----Taleb Mounia-----

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Tous les chapitres	



Année universitaire : 2022-2023

Tébessa le :

## Fiche de critique

Noms et prénoms des étudiants :

- 1-----
- 2-----
- 3-----

Niveau : ----- Option : -- -----

Thème :-----  
-----  
-----

Concernant la forme :-----  
-----  
-----

Concernant le fond :-----  
-----  
-----  
-----

Décision :-----  
-----  
-----

Signature de l'enseignant-----

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) صبيح لينا دحمان ..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالبة .....

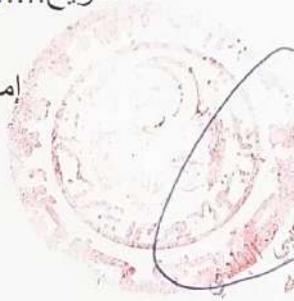
الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 121220194 ..... و الصادرة بتاريخ 2021/09/02  
المسجل بمعهد المختار ..... قسم الإحصاء و جغرافية  
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :  
مذكرة ماجستير : détection et diagnostic des défaillances du condensateur par analyse vibratoire .....

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه. 07 جوان 2023

التاريخ : 2023.06.17

امضاء المعني (ة)





عن رئيس المجلس الشعبي  
و يتفق بيض منه  
إمضاء العون: قوسم نواردة

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي  
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) ..... معيون أمينة ..... الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : ..... جامعة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : ..... 1.1.7.12.4683 ..... و الصادرة بتاريخ ..... 2020.10.13 .....  
المسجل بمعهد ..... الكتاب ..... قسم ..... الإطروحة دكتوراه .....  
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :  
"Détection et diagnostics des défaillances  
de l'acier au feu par analyse vibratoire"

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ : ..... 2023/06/07 .....

إمضاء المعني (ة)



07 جوان 2023



عن رئيس المجلس الشعبي البلدي  
ويتفق بعض مناه  
إمضاء العون. قوسم نواردة



## *Remerciements*

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Dr. **Taleb Mounia** .pour tout le temps qu'elle nous a consacré, ses directives précieuses, et pour la qualité de son suivi durant toute la période de notre encadrement.

Nous tenons à remercier les membres de jury Pr **Louafi Messaoud** et Dr **Soudani Med Salah** pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance.

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions durant l'élaboration de ce mémoire en particulier le personnel de la Cimenterie d'Elmalabiod ; F. Fayçal, R. Siaf, K.Chokri, D.Amer.



# Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père Larbi

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Sabah

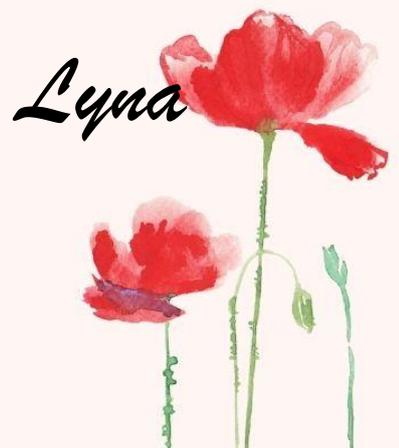
A ma chère sœur Hiba et cher frère Yasser qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A ma grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

Sans oublier mon binôme Oumnia pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.



# Dédicace

Je dédie ce mémoire

A ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant

A la mémoire de mon père qui nous a quitté voilà deux  
mois

A mes frères : YOUSRI , MOHAMMED ALI

Ma sœur : ALLA

A ma famille, mes chers amis et mes camarades

Une spéciale dédicace à madame TALEB MONIA

Ce travail est le votre

Sans oublier mon binôme LYNA DOUAA pour son  
soutien moral, sa patience et sa compréhension  
tout au long de cette mémoire

*Oumnia*



## Résumé :

Grâce aux techniques avancées de traitement du signal, le diagnostic des défauts mécaniques dans les machines tournantes par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années. Ces technologies permettent désormais une détection précoce des défauts, une identification de leur nature, une détermination de leur gravité et un suivi de leur progression. Dans ce travail, nous étudierons les techniques utilisées pour mesurer les vibrations dans ces machines tournantes afin de surveiller et détecter les défauts qui en découlent, ainsi que les interventions possibles qui peuvent être effectuées. Cela sera réalisé en menant une étude des points de mesure des vibrations pour l'ensemble du groupe motopropulseur des machines tournantes, suivie d'une interprétation et d'une comparaison des résultats obtenus de manière expérimentale, ce qui nous permettra d'obtenir des conclusions nécessaires et utiles.

**Mots clés :** Vibration, Machine tournante, Indicateur scalaire.

## Abstract :

The advanced signal processing techniques, the diagnosis of mechanical faults in rotating machinery through vibration analysis has significantly developed in recent years. These technologies now allow for early detection of defects, identification of their nature, determination of their severity, and monitoring of their progression. In this work, we will study the techniques used to measure vibrations in these rotating machines to monitor and detect resulting faults, along with the possible interventions that can be taken. This will be done by conducting a study of vibration measurement points for the entire powertrain of the rotating machines, followed by interpretation and comparison of the obtained results experimentally, enabling us to reach necessary and useful conclusions.

**Key words:** Vibration, Rotating machinery, Scalar indicators.

## ملخص

بفضل تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة، تطورت تشخيص الأعطال الميكانيكية في الآلات الدوارة من خلال تحليل الاهتزاز بشكل كبير في السنوات الأخيرة. تتيح هذه التقنيات الآن الكشف المبكر عن العيوب، وتحديد طبيعتها، وتحديد درجتها الخطورة، ومتابعة تطورها. حيث سندرس في هذا العمل التقنية المستخدمة لقياس الاهتزازات لهذه الآلات الدوارة لمراقبة و اكتشاف الاعطال الناتجة مع التدخلات التي يمكن اتخاذها و ذلك باجراء دراسة نقاط القياس الاهتزازي لجميع السلسلة الحركية للآلات الدوارة ، ثم نقوم بتفسيرها و مقارنة النتائج التي تحصلنا عليها تجريبيا مما يجعل من الممكن الوصول الى الاستنتاجات الضرورية و المفيدة تندرج هذه الأبحاث ضمن مجال مراقبة وتشخيص أعطال المعدات.

**الكلمات المفتاحية:** الاهتزازات، الآلات الدوارة، المؤشرات العددية.

Résumé

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **PARTIE THÉORIQUE**

### **Chapitre 1 : Généralités sur la maintenance**

I. Introduction.....	3
II. Historique.....	3
III. Définitions De La Maintenance.....	4
IV. Le Rôle De La Maintenance.....	4
V. Les Objectifs De La Maintenance.....	5
V.1.Les Objectifs De Cout.....	5
V.2. Les Objectifs Opérationnels.....	5
VI. Les Types De Maintenance.....	6
VI.1. Maintenance Préventive.....	6
VI.1.1. Les objectifs de maintenance préventive.....	6
VI.1.2. Les Différents Types De Maintenance Préventive.....	7
VI.1.3. But De La Maintenance Préventive.....	11
VI.2. Maintenance Corrective.....	11
VI.3. La Maintenance Proactive.....	12
VI.4. La Maintenance Méliorative.....	12
VII. Les Operations De La Maintenance.....	12
VII.1. Les Operations De Maintenance Corrective.....	12
VII.2. Les Operations De Maintenance Préventive.....	13
VIII. Niveaux Maintenance.....	13

IX. Choix D'une Politique De Maintenance.....	15
X. Conclusion.....	16

## **Chapitre 2 : Généralités sur les concasseurs**

I. Introduction.....	18
II. Rappel sur la notion de fragmentation.....	18
II.1. Définition.....	18
II.2. But de la fragmentation.....	19
II.3. Principe de la fragmentation.....	19
II.4. Les principaux appareils de la fragmentation.....	20
II.5. Différentes opérations mécaniques utilisées pour la fragmentation des solides	20
III. Généralités sur les concasseurs.....	21
III.1. Historique.....	21
III.2. Définition de concassage.....	21
III.3. Les différents types des concasseurs.....	22
III.3.1. Les concasseurs a machoires.....	22
III.3.2. concasseurs giratoires.....	24
III.3. 3. concasseurs à percussion .....	28
III.3. 4. concasseurs a marteaux .....	29
III.4. DOMAINE D'UTILISATION DES CONCASSEURS.....	33
III.5. LES DIFFERENTES ETAPES DU CONCASSAGE.....	33
III.5.1 Concassages primaires.....	33
III.5.2 Concassage secondaires/tertiaires.....	33
IV. Conclusion.....	34

## **CHAPITRE 03 : PRESENTATION DE L'ANALYSE VIBRATOIRE**

I. Introduction.....	37
II. Généralités sur les vibrations.....	37
II.1. Définition de vibration (norme AFNOR 90.001).....	37

II.2. Caractéristiques d'une vibration.....	38
II.2.1. Amplitude.....	38
II.2.2. La fréquence.....	39
II.2.3. La phase.....	39
II.3. Différentes formes de vibrations .....	39
II.3.1. Vibrations harmoniques .....	39
II.3.2. Vibrations périodiques .....	40
II.3.3. Vibrations apériodiques.....	40
II.4. La transformée de Fourier.....	41
II.5. Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique .....	42
II.5.1. Déplacement .....	42
II.5.2. Vitesse .....	43
II.5.3. Accélération .....	43
III. Diagnostique et surveillance des machines tournantes .....	44
III.1. L'analyse des huiles .....	44
III.2. Thermographie infrarouge.....	45
III.2.1. Définition.....	45
III.2.2. Matériels de mesure.....	46
III.3. L'analyse acoustique.....	47
III.4. Le contrôle ultrasonore.....	47
III.5. L'analyse vibratoire.....	47
IV. Choix d'une technique d'analyse.....	47
V. Vibrations des machines tournantes.....	49
VI. Défauts des machines tournantes.....	50
VI.1. Balourd.....	50
VI.2. Le désalignement.....	51
VI.3. Les engrenages.....	53

VI.4. Les courroies.....	55
VI.4. 1.Courroie en mauvais état.....	56
VI.5. Les roulement.....	58
VII. Analyse vibratoire.....	60
VII.1. Principe.....	60
VII.2. Objectifs de l’analyse vibratoire.....	60
VII.3. Les avantages.....	60
VII.4. Les inconvénients.....	61
VII.5. Champs d’application privilégiée.....	61
VII.6. Les méthodes d'analyse des vibrations.....	61
VII.7. Surveillance.....	65
VII.7.1. Méthode de niveau global.....	65
VII.7.2. Spectre PBC (pourcentage de bande constant).....	66
VII.8. Diagnostic.....	67
VII.9. Chaîne de mesure.....	67
VII.10. Capteurs de vibration.....	69
VII.10.1. Prosimètres.....	70
VII.10.2. Vélocimétrie.....	71
VII.10.3. Accéléromètres.....	72
VII.10.4. Choix d’emplacement de capteurs.....	73
VII.10.5. Les appareils de mesure.....	74
VII.11. Détermination des seuils.....	75
VII.11.1. Méthode du relevé global.....	75
VII.11.2. Méthode de l'analyse spectrale.....	75
VII.11.3. Seuils de jugement.....	76
VII.12. Dommages causés par des vibrations excessives.....	76
II. Conclusion.....	78

## CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

I. Introduction.....	81
II. Application de l'analyse vibratoire au concasseur calcaire rotor A1M01 (cas de la Cimenterie d'Elmalabiod).....	82
II.1. Suivi vibratoire du concasseur A1M01.....	83
II.2. Comportement vibratoire de l'équipement.....	84
II.2.1. Points de mesure sur moteur (Analyse en niveau global).....	84
II.2.2. Points de mesure sur le réducteur.....	85
II.2.3. Les paliers du concasseur.....	86
II.2.4. Analyse en niveau global du réducteur.....	87
II.2.5. Analyse spectrale du réducteur.....	88
II.2.6. Analyse en niveau global des paliers du concasseur.....	88
II.2.7. Analyse spectrale des paliers du concasseur.....	88
II.3. Mesure sur les composants du concasseur 2022.....	89
II.3.1. Moteur.....	89
II.3.2. Réducteur.....	90
II.3.3. Les paliers concasseur.....	91
II.4. Discussion des résultats.....	92
III. CONCLUSION.....	94
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERENCE.....</b>	<b>98</b>
<b>LES ANNEXES</b>	

## Chapitre 1 : Généralités sur la maintenance

Figure 1.1. Classification des types de la maintenance	6
Figure 1.2. Répartition de la maintenance systématique	7
Figure 1.3. Structure de la maintenance conditionnelle	8
Figure 1.4. Principe de la maintenance conditionnelle	9
Figure 1.5. Paramètres de la maintenance conditionnelle	10
Figure 1.6. Processus de déroulement d'une maintenance corrective	12

## Chapitre 2 : Généralités sur les concasseurs

Figure 2.1. Solide avant fragmentation	19
figure 2.2. Solide pendant fragmentation	19
Figure 2.3. Concasseurs à mâchoires	23
Figure 2.4. Concasseurs à mâchoires	24
Figure 2.5. Concasseur giratoire	25
Figure 2.6. Concasseurs giratoires primaire	26
Figure 2.7. Concasseurs giratoires secondaires	27
Figure 2.8. Concasseurs à percussion	28
Figure 2.9. Principe d'un concasseur à percuteurs rigides	29
Figure 2.10. Concasseurs à marteaux	30
Figure 2.11. Corps du concasseur	31
Figure 2.12. Contrôleur de vitesse	32

## Chapitre 3 : Présentation de l'analyse vibratoire

Figure 3.1. Systèmes oscillants	37
---------------------------------	----

## Liste des figures

Figure 3.2. La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale)	38
Figure 3.3. La représentation d'un signal harmonique (vibration sinusoïdale)	40
Figure 3.4. vibration périodique	40
Figure 3.5. Vibration aléatoire	41
Figure 3.6. Vibration transitoire	41
Figure 3.7. Grandeurs associés à un signal vibratoire	43
Figure 3.8. les vibrations et les modes de détections.	44
Figure 3.9. Images thermographiques	46
Figure 3.10. thermomètre infrarouge	46
Figure 3.11. thermomètre infrarouge	46
Figure 3.12. Mesure par ultrason	47
Figure 3.13. Défaut de balourd.	50
Figure 3.14. Spectres fréquentiels du défaut de balourd.	51
Figure 3.15. Désalignement angulaire	52
Figure 3.16. Désalignement parallèle	52
Figure 3.17. Comportement des paliers pour un désalignement parallèle	52
Figure 3.18. Spectre du défaut de délignage.	53
Figure 3.19. Dégradation des dents d'une roue dentée	54
Figure 3.20. Spectre RC et peigne de raies du défaut d'engrenages	55
Figure 3.21. Spectre du défaut d'engrenages	56
Figure 3.22. Transmission par courroie	56
Figure 3.23. Défaut de courroie	57

## Liste des figures

Figure 3.24. Défauts de roulements	59
Figure 3.25. Mise en évidence d'un défaut de roulement par un spectre PBC et par un spectre d'enveloppe	60
Figure 3.26. La représentation spectrale d'un signal sinusoïdal	65
Figure 3.27. Exemple de spectre PBC	68
Figure 3.28. schéma présente, de façon simplifiée, l'analyse vibratoire réalisée à partir de mesures effectuées sur les parties fixes des machines surveillées.	69
Figure 3.29. la chaine de mesure analogique	70
Figure 3.30. la chaine de mesure numérique	71
Figure 3.31. Capteurs de vibration	71
Figure 3.32. proximètres et leur driver	72
Figure 3.33. Principe du capteur inductif à courants de Foucault	72
Figure 3.34. schéma de principe d'une vélocimétrie	73
Figure 3.35. Schéma de principe d'un accéléromètre	74
Figure 3.36. Fixation du capteur sur palier	75
Figure 3.37. Choix directionnel pour la prise de mesure	75
Figure 3.38. Les différentes directions des mesures	76
Figure 3.39. Détermination des seuils par la méthode du relevé global	77

### Chapitre 4 :Etude de cas

Figure 4.1 Principe d'un diagnostic	81
Figure 4.2. Les activités de l'analyse vibratoire	82
Figure 4.3 : Equipements de commande du concasseur	82
Figure 4.4. Schéma synoptique du concasseur calcaire rotor A1MO1	84

## Liste des figures

Figure 4.5. Courbe de tendance du NG accélération et vitesse du moteur	84
Figure 4.6. Analyse spectrale du moteur	85
Figure 4.7. Courbes de tendance du NG vitesse à l'entrée et à la sortie réducteur	86
Figure 4.8. Courbe de tendance du NG vitesse en axial des paliers cylindre	86
Figure 4.9. Courbe de tendance en niveau global vitesse.	87
Figure 4.10. Analyse spectrale octobre 2019	87
Figure 4.11. Analyse spectrale du réducteur octobre 2019	88
Figure 4.12. Analyse spectrale des paliers du concasseur 2019.	88
Figure 4.13 : Analyse spectrale novembre 2019.	89
Figure 4.14: Courbe de tendance en niveau global vitesse 2022.	89
Figure 4.15. Analyse spectrale moteur 2022.	90
Figure 4.16. Courbe de tendance en niveau global vitesse 2022.	90
Figure 4.17. Analyse spectrale réducteur 2022	91
Figure 4.18: Courbe de tendance en niveau global 2022	91
Figure 4.19. Analyse spectrale paliers concasseur 2022.	92

## **Chapitre 1 : Généralités sur la maintenance**

Tableau I.1 Tableau 1.1. Les cinq niveaux de maintenance	14
--	----

## **Chapitre 3 :Présentation de l'analyse vibratoire**

Tableau 3.1. Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante	48
---	----

Tableau 3.2. Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements	59
--	----

Tableau 3.3. Nature des vibrations et facteur de crête	62
--	----

Tableau 3.4. Défauts et fréquences correspondants	77
---	----

## **Chapitre 4 :Etude de cas**

Tableau 4.1. Mesures sur moteur (21 /11/2018)	84
---	----

Tableau 4.2. Mesures sur réducteur (21 /11/2018)	85
--	----

Tableau 4.3. Mesures sur paliers du concasseur	86
--	----

Tableau 4.4. Mesures sur moteur(2022)	89
---------------------------------------	----

Tableau 4.5. Mesures sur réducteur(2022)	90
--	----

Tableau 4.6. Mesures sur paliers du concasseur(2022)	91
--	----

## Liste des figures

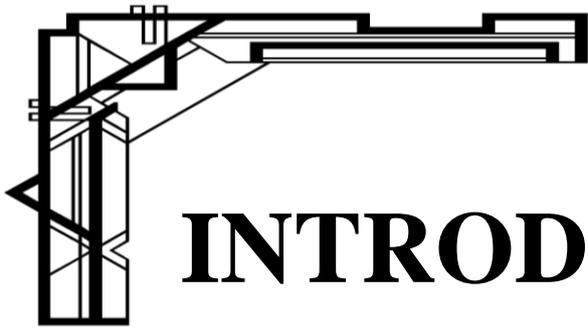
<b>Figure I.1</b> : Les différents biocarburants produits à partir de biomasse.	<b>7</b>
<b>Figure I.2</b> : Production globale de biocarburants.	<b>11</b>
<b>Figure I.3</b> : Schémas de procédés pour les deux grandes filières de production mettant en évidence matières premières, produits et coproduits.	<b>12</b>
<b>Figure I.4</b> : diagramme d'émission de CO <sub>2</sub> de différents types de carburants.	<b>14</b>
<b>Figure I.5</b> le schéma générique du procédé de production d'éthanol cellulosique.	<b>15</b>
<b>Figure I.6</b> . Le schéma générique du procédé de production d'éthanol 2ème génération.	<b>15</b>
<b>Figure I.7</b> . Schéma de procédé de BtL (biomasse to liquide).	<b>16</b>
<b>Figure I.8</b> : Schémas de procédés pour les deux filières de production de biocarburants de seconde génération pour moteurs Essence et Diesel.	<b>16</b>
<b>Figure I.9</b> : Procédé global d'utilisation des microalgues à des fins de productions	<b>18</b>
<b>Figure II.1</b> : Structure 3D de la molécule d'alcool éthylique.	<b>24</b>
<b>Figure II.2</b> : Types des procédés de fermentation ( <b>Adapté de Queinnec, 2000</b> ).	<b>29</b>
<b>Figure II.3</b> : distillation au niveau de laboratoire.	<b>32</b>
<b>Figure II.4</b> : mélange azéotropique eau-éthanol	<b>33</b>
<b>Figure II.5</b> : Les solutions technologiques de production bioéthanol.	<b>35</b>
<b>Figure III.1</b> . Matières premières utilisées pour la production du bioéthanol	<b>38</b>
<b>Figure III.2</b> . Etapes de prétraitement de la peau d'orange	<b>39</b>
<b>Figure III.3</b> . Montage expérimental pour l'extraction du jus de la peau d'orange.	<b>40</b>
<b>Figure III.4</b> . Dispositif expérimental de la fermentation alcoolique.	<b>41</b>
<b>Figure III.5</b> : Photo d'évaporateur rotatif pour la distillation du mélange	<b>42</b>

## Liste des figures

<b>Figure IV.1.</b> Courbe d'étalonnage du glucose obtenu à une longueur d'onde $\lambda=488$ nm.	<b>46</b>
<b>Figure IV.2.</b> Effet de traitement de peaux d'orange sur le volume du moût	<b>47</b>
<b>Figure IV.3.</b> Effet de l'agitation sur le volume du moût	<b>48</b>
<b>Figure IV.4.</b> Variation du volume de CO <sub>2</sub> dégagée lors de la fermentation alcoolique	<b>49</b>
<b>La figure IV.5.</b> Variation de pH au cours de la fermentation alcoolique	<b>50</b>
<b>Figure IV.6.</b> Fermentation du moût (récipient de droite) au bioéthanol (récipient de gauche)	<b>51</b>
<b>Figure IV.7.</b> Représentation de la matière sèche après centrifugation	<b>53</b>

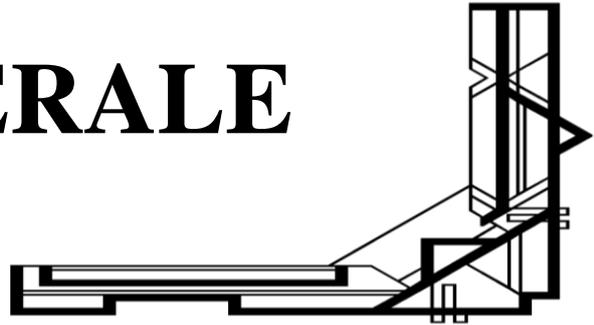
## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération.	<b>8</b>
<b>Tableau I.2.</b> Propriétés physico-chimiques de l'éthanol.	<b>9</b>
<b>Tableau I.3 :</b> Productivité en agro carburants en fonction du type de matières premières des filières Essence et Diesel.	<b>13</b>
<b>Tableau I.4:</b> Comparaison des différentes sources de biodiesel (à 70% d'huile (en poids) dans la biomasse – b 30 % d'huile (en poids) dans la biomasse, c pour couvrir 50% des besoins en carburants pour le transport au USA).	<b>19</b>
<b>Tableau I.5 :</b> Propriétés de biodiesel de 1ère et 3ème génération et comparaison avec le biodiesel.	<b>21</b>
<b>Tableau II.1 :</b> Propriétés physiques de l'éthanol.	<b>25</b>
<b>Tableau II.2:</b> Principales voies de traitement de l'éthanol (Kacimi, 2008).	<b>27</b>
<b>Tableau III.1 :</b> Matériels et appareils utilisés pour l'élaboration du procédé de production du bioéthanol.	<b>37</b>
<b>Tableau III.2 :</b> Conditions de croissance de la levure <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> .	<b>38</b>
<b>Tableau IV.1.</b> Illustre les différents paramètres de caractérisation physicochimique.	<b>46</b>
<b>Tableau IV.2:</b> Variation du volume total du moût par rapport aux tailles de peaux d'orange.	<b>47</b>
<b>Tableau IV.3.</b> Variation du volume total du moût en fonction de la vitesse d'agitation.	<b>48</b>
<b>Tableau IV.5 :</b> Tableau d'indice de refractomètre.	<b>51</b>



# INTRODUCTION

# GENERALE



Au cours des deux dernières décennies, les activités de maintenance dans les installations industrielles ont fait appel à des techniques de diagnostic de plus en plus sophistiquées. Les ingénieurs de maintenance ont désormais accès à une variété de techniques de détection de pannes.

Les machines tournantes sont couramment utilisées dans l'ingénierie moderne pour produire de l'énergie et de la production. Le fonctionnement continu des machines tournantes produit des vibrations par sa nature. Les phénomènes de vibrations affectent les performances des machines et conduisent à une défaillance des composants. La demande croissante de produits nécessite un fonctionnement durable des machines qui produit un résultat optimal avec moins d'entretien. Des vibrations excessives sur les machines dégradent leur performance. Réduire les vibrations excessives capables de minimiser les coûts de réparation et d'entretien.

Par conséquent, l'analyse des vibrations de la machine est nécessaire pour déterminer la source de vibrations excessives. Il existe plusieurs techniques pour mettre en œuvre les outils classiques de traitement du signal, tels que la transformée de Fourier (pour le tracé et l'analyse du spectre), ainsi que le calcul d'indicateurs scalaires tels que, le facteur de crête et kérauses, valeur efficace.

L'objectif de cette étude est de mettre en œuvre des analyses vibratoires à des fins de maintenance industrielle, notamment pour diagnostiquer et identifier les défauts pouvant impacter les différents composants du système.

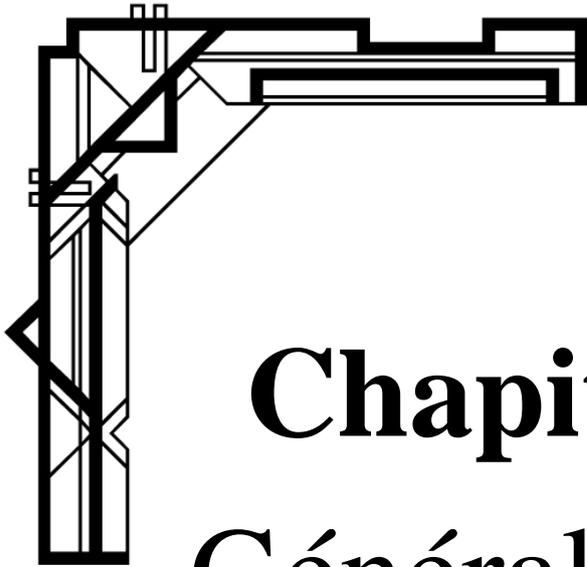
Ce mémoire est structuré en 4 parties :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique de la maintenance en présentant ses types, ses objectifs, ses niveaux et le choix d'une politique de maintenance.

Dans le deuxième chapitre on va faire une présentation générale sur la fragmentation du ciment, en introduisant après une description sur les concasseurs, le principe de leur fonctionnement, les différents types et leurs principaux composants.

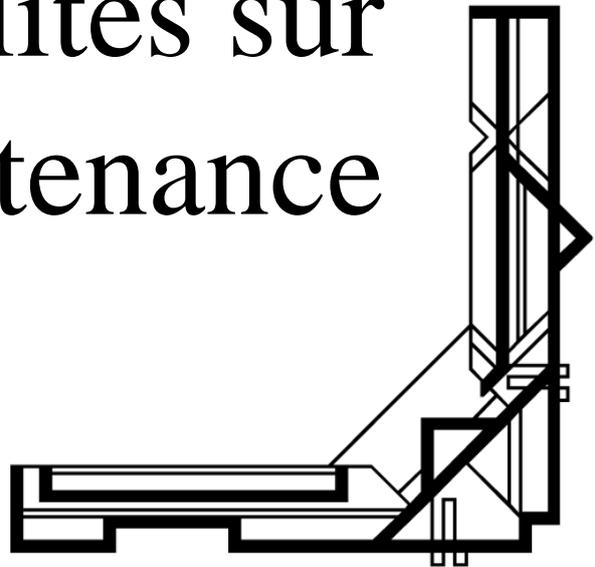
Le troisième chapitre présente l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et techniques utilisées et celle toujours en voie de développement pour l'analyse vibratoire.

Enfin une étude de cas sur le concasseur calcaire A1M01 de la chaîne technologique de la cimenterie d'Elmalabiod est menée.



# Chapitre 1 :

## Généralités sur la maintenance



## **I. Introduction**

La maintenance industrielle consiste à maintenir les machines, équipements et autres systèmes industriels en bon état de fonctionnement. Cela implique un large éventail d'activités telles que l'inspection et le test des machines pour détecter d'éventuels problèmes.

Une maintenance efficace nécessite aujourd'hui des systèmes de surveillance sophistiqués, Permet de prendre la bonne décision au bon moment, en évitant les pannes, ainsi arrêt imprévu. C'est pourquoi l'industrie a besoin des méthodes et des outils de plus en plus efficaces pour diagnostiquer et évaluer les problèmes de santé machine. De plus, il s'agit d'optimiser la maintenance et donc de réduire les coûts de production.

Dans ce chapitre, un aperçu général de la maintenance industrielle est présenté, citant son historique, les différents types et le but de la maintenance.

## **II. Historique**

Jusqu'à la fin des années 70, l'entretien était souvent le parent pauvre des services de l'entreprise. Les dirigeants le considéraient uniquement comme un poste de dépenses et ne pensaient qu'à réduire ses coûts. L'entretien se contentait d'intervenir sur un système défaillant pour relancer la production et effectuait les opérations courantes préconisées par le constructeur. Il n'y avait donc pas de prise en compte des caractéristiques spécifiques et des conditions de fonctionnement (cadence, ancienneté, température ambiante, etc.) des matériels. On pouvait donc être conduit à effectuer (sans évaluation à priori ou à posteriori) trop ou pas assez d'entretien. Les choses ont évolué : la part du coût machine dans le coût de production ne cesse d'augmenter aux dépens de celui de la main-d'œuvre. Ceci est dû à l'automatisation presque systématique des procédés, et à leurs coûts croissants. Ainsi les arrêts inopinés coûtent cher. Dans ces conditions, la fonction maintenance est devenue stratégique. Entretien, c'est subir alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper. Les coûts directs de maintenance sont devenus secondaires voire négligeables par rapport aux coûts indirects (non production, conséquences de la panne). Pour le gestionnaire, la disponibilité des machines est devenue l'indicateur clé. Parallèlement à cette évolution, la maintenance s'est dotée de méthodes de gestion, d'organisation, d'aide au diagnostic des pannes, de stratégies. Des techniques d'auscultation sophistiquées se sont développées (analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographie IR, etc.). La qualification des techniciens s'est accrue. La gestion de la

maintenance requiert aujourd'hui une spécialisation professionnelle (STS, IUT, écoles d'ingénieurs). [1]

### **III. Définitions de la maintenance**

On définit la maintenance selon des normes telle que :

- La norme (AFNOR X60-010) qui définit la maintenance par « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Au sens strict du terme, la maintenance agit sur les biens et considère l'ensemble des opérations d'entretien destinées à accroître la fiabilité ou pallier des défaillances » [2].

- La norme (AFNOR NF EN 13306) offre une vision plus précise de la maintenance en indiquant que : « la maintenance intègre l'ensemble des activités techniques, administratives ou de management qui ont pour but de maintenir ou de rétablir un équipement dans un état ou des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise » Généralement, elle fait partie d'un ensemble d'actions effectuées pour que l'entreprise Plus puisse prospérer. En effet, les installations industrielles sont perturbées, tout au long de leur exploitation, par des dysfonctionnements qui affectent les coûts de production, la qualité des produits et des services, la disponibilité, la sûreté, la sécurité des personnes... [3]

- Selon la norme française (NF EN 13306 X 60-319), la maintenance peut-être définie par : « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

### **IV. Le rôle de la maintenance**

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations. La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées : [2]

• Prévisions à long terme : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise. •Prévisions à moyen terme :la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.

•Prévisions à courts termes : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures. Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation. [2]

### **V. Les objectifs de la maintenance [4]**

#### **V.1.Les objectifs de coût :**

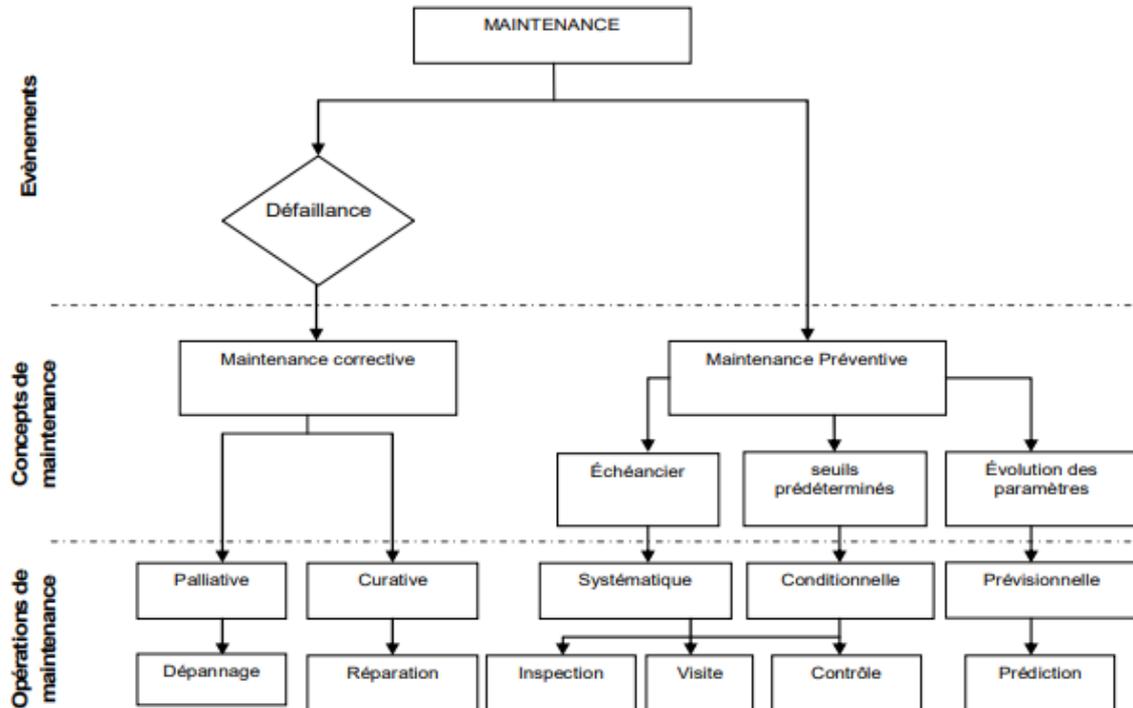
- Minimiser les dépenses de maintenance ;
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget ;
- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation ;
- Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue.

#### **V.2.Les objectifs opérationnels :**

- Maintenir le bien durable :
  - Dans un état acceptable ;
  - Dans des meilleures conditions.
- Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable ;
- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût ;
- Maximiser la durée de vie de bien ;
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées ;
- Assurer au bien des performances de haute qualité ;
- Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace ;
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum ;
- Garder au bien une présentation suffisamment satisfaisante ;
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue.

## VI. Les types de maintenance

Les types, ou stratégies, de maintenance sont classés par la norme AFNOR, 2001 comme suite :



**Figure 1.1.** Classification des types de la maintenance [5].

### VI.1. Maintenance préventive

D'après la norme AFNOR (X-60-010), on peut définir la maintenance préventive comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

#### VI.1.1. Les objectifs de maintenance préventive

Les objectifs visés par la maintenance préventive sont les suivants :

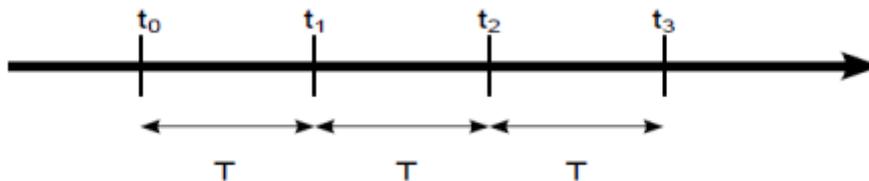
- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service : réduction des coûts de défaillance, amélioration de la disponibilité ;
- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement ;
- Améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production ;
- Réduire et régulariser la charge de travail ;
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues) ;
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses) ;

- Plus globalement, en réduisant la part « d'imprévu », améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours source de tension) La mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive implique le développement d'un service « méthodes de maintenance » efficace. En effet, on ne peut faire de préventif sans un service méthodes qui va alourdir à court terme les coûts directs de maintenance, mais qui va permettre : La gestion de la documentation technique, des dossiers machines, des historiques ;
- Les analyses techniques du comportement du matériel ;
- La préparation des interventions préventives ;
- La concertation avec la production [4].

## VI.1.2. Les différents types de maintenance préventive

### a. Maintenance préventive systématique

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien .Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle. [4]



**Figure 1.2.** Répartition de la maintenance systématique.[6]

#### 1. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive systématique

- **Avantage :**
  - Réduction des coûts et des durées de maintenance par rapport à l'entretien curatif ;
  - Bonne planification des opérations et des ressources ;
  - Contrôle du niveau de stockage des pièces de rechange ;
  - Généralement, peu de catastrophes ;
  - Sécurité accrue.

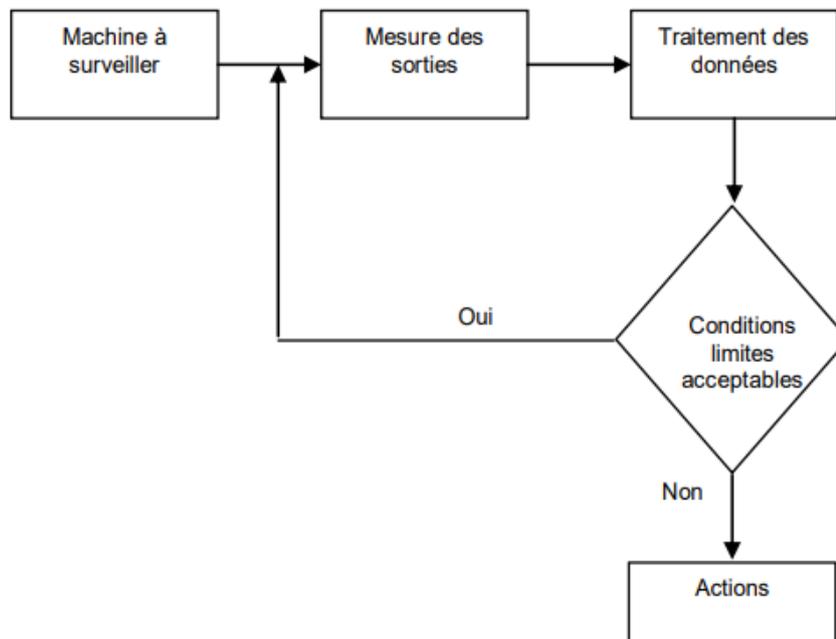
➤ **Inconvénient :**

- Révisions non nécessaires (l'entretien n'est pas fonction de l'état de la machine, mais plutôt de la durée d'utilisation) ;
- Remplacement de pièces en bon état ;
- Création de défauts lors des remontages (si les procédures ne sont pas claires et contrôlées).[7]

**b. La maintenance préventive conditionnelle**

Selon la norme AFNOR X-60-010, on définit la maintenance conditionnelle comme étant une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé révélateur de l'état du bien [2] et la maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence de la partie faible de l'équipement.

- Mesure des vibrations des bruits ;
- Mesure de température ;
- Mesure de pression dans les différents organes ;
- Analyse des vibrations : Il se fait généralement dans les ateliers de réparation située à la base industrielle ;
- Analyse des huiles.[8]



**Figure 1.3.** Structure de la maintenance conditionnelle.[9]

## 1. Principe de la maintenance conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est définie comme étant celle que l'on réalise uniquement lorsque l'état du bien le nécessite [10]. La conséquence immédiate est qu'il est nécessaire de savoir mettre en place des techniques de surveillance de l'état du bien (fiabilité technique et économique) et surtout d'être capable de qualifier de façon précise l'état de ce bien. Cette opération nécessite de procéder au préalable au choix d'un certain nombre d'indicateurs de surveillance, issus d'un paramètre ou d'une grandeur plus ou moins élaborée dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. La (figure1.4) illustre le principe de ce type de maintenance conditionnelle [11].

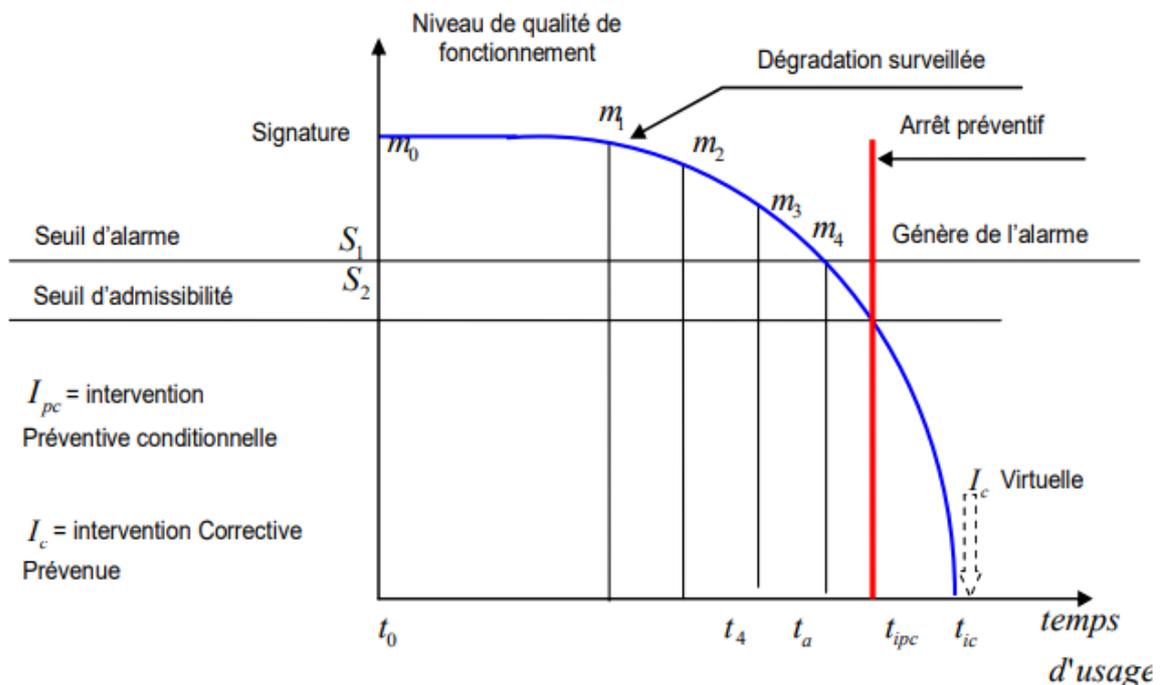
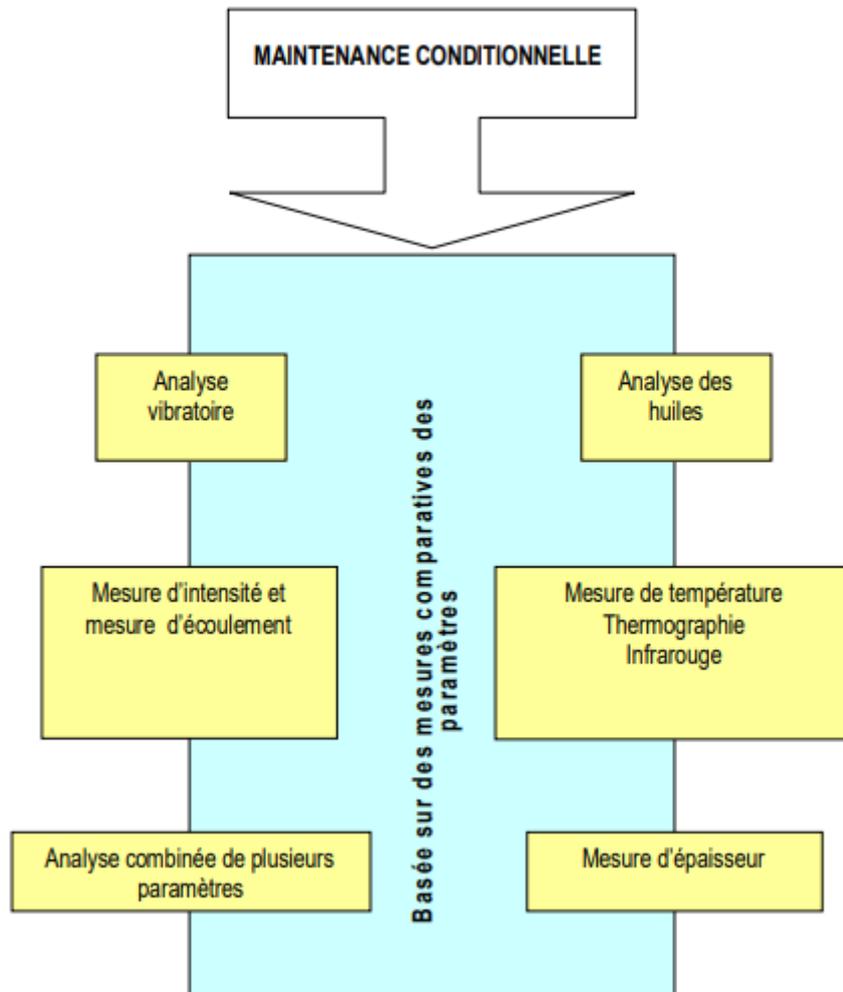


Figure 1.4. Principe de la maintenance conditionnelle.

## 2. Outils de la maintenance préventive conditionnelle

Une variété de technologies peut être utilisée en tant qu'éléments d'un programme de maintenance préventive. Puisque les systèmes où les machines mécaniques occupent la plupart d'équipement d'usine, la surveillance de vibration est généralement la composante clé de la plupart des programmes d'entretien prédictif. Cependant, la surveillance de vibration ne peut pas fournir toutes les informations exigées pour un programme de maintenance préventif réussi [12]. Le suivi de l'évolution des paramètres permet de préciser la nature et la date des interventions, dans ce cas on peut utiliser une des trois méthodes suivantes voir la (figure1.5) :

- Analyse des lubrifiants ;
- Thermographie ;
- Analyse vibratoire.



**Figure 1.5.** Paramètres de la maintenance conditionnelle [12].

### 3. Avantages et inconvénients de la maintenance préventive conditionnelle

#### ➤ Avantages

- Réduction de coût d'environ et de la durée de réparation par rapport à l'entretien préventif ;
- L'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique. Remplacement des pièces défectueuses uniquement ;
- La suppression des défauts de jeunesse lors de remise en route après un entretien systématique.

➤ **Inconvénients**

- Nécessite une équipe de maintenance formée en analyse vibratoire et en essais non destructifs ;
- Niveau technologique plus élevé. [7]

**c. La maintenance préventive prévisionnelle**

La norme AFNOR X60-010 la définit comme suit : « maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ». [13]

**VI.1.3. But de la maintenance préventive**

- Augmenter la durée de vie des matériels ;
- Diminuer la probabilité des défaillances en service ;
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective ;
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc. ;
- Améliorer les conditions de travail du personnel de production ;
- Diminuer le budget de maintenance ;
- Supprimer les causes d'accidents graves. [4]

**VI.2. Maintenance corrective**

Elle est appelée aussi maintenance fortuite, accidentelle ou curative. L'opération de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches : la maintenance palliative et la maintenance curative.

- Maintenance palliative : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieure au niveau optimal.
- Maintenance curative : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel [14].

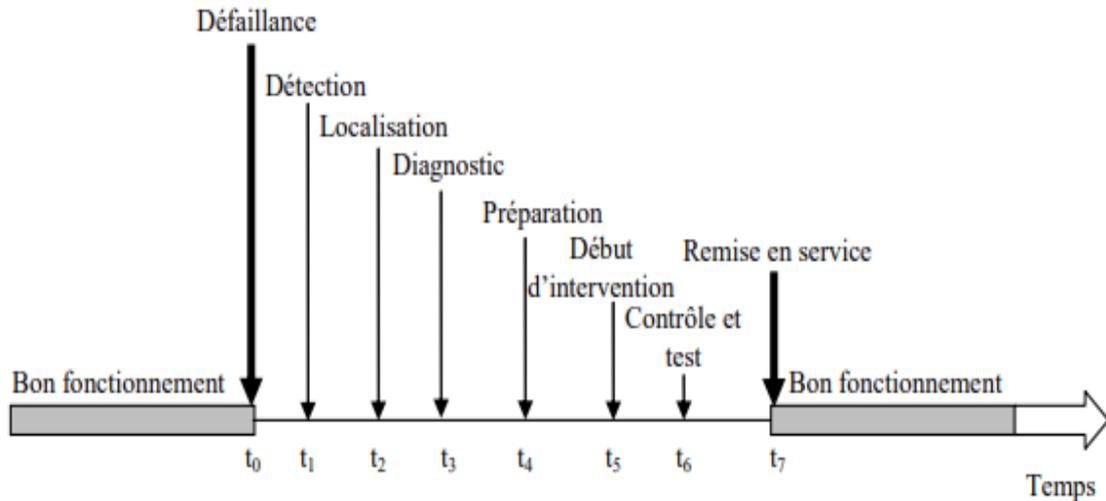


Figure 1.6. Processus de déroulement d'une maintenance corrective[15].

### VI.3. La maintenance proactive

C'est un terme émergent, elle « repose sur l'exploitation du retour d'expérience et sur l'analyse approfondie des phénomènes pathologiques à l'origine des défaillances ». Elle est basée sur la maintenance conditionnelle et prévisionnelle et s'enrichit du diagnostic des causes de pannes et défaillances.

### VI.4. La maintenance améliorative

C'est l'ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion destinée à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise [16].

## VII. Les opérations de la maintenance

### VII.1. Les opérations de maintenance corrective

- **Dépannage :**

Il est une action exécutée pour permettre à un bien défaillant d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

- **Réparation :**

Elle est une action exécutée pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident

ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

- **Révisions :**

Ensemble des actions et examens de contrôle et d'intervention effectuée en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour nombre d'unités d'usage donnée.

## **VII.2. Les opérations de maintenance préventive**

- **Inspection :**

C'est l'activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies, et d'exécution de réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni l'arrêt des équipements.

- **Contrôle :**

Il correspond à des vérifications de conformité par rapport à des données prédéterminées suivies d'un jugement. Le contrôle peut comporter une activité d'information, inclure une décision, acceptation, rejet.....

- **Visite :**

C'est l'opération de surveillance de maintenance préventive systématique qui s'opère selon une périodicité prédéterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'organes et une immobilisation Du matériel. [17].

## **VIII. Niveaux maintenance**

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des tâches, en natures comme en durées. D'où l'utilité de jeter les bases de son organisation à partir d'une mise en familles à cinq niveaux, suivant la norme AFNOR X 60 – 015.

**Tableau 1.1.** Les cinq niveaux de maintenance [18].

<b>Niveau</b>	<b>Caractéristique</b>	<b>Personnel d'intervention</b>	<b>Moyens</b>
1	Réglages simples sans démontage, rondes et surveillance pendant la marche.	Exploitant sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2	Dépannage par échange standard d'élément prévus à cet effet et opérations mineures.	Technicien habilité sur place.	Idem, plus pièce de rechange trouvées à proximité sans délai.
3	Identification et diagnostic de panne, réparation ou remplacement d'élément fonctionnels.	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure , banc d'essai, contrôle,...etc
4	Travaux de maintenance corrective ou préventive nécessitant des démontages importants.	Equipe encadrées par un technicien spécialisé ou en atelier central.	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essais, de contrôle, etc
5	Rénovation, reconstruction, modification importante faisant appel à une main d'œuvre qualifiée.	Equipe encadrées par un technicien spécialisé ou en atelier central.	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

## **IX. Choix d'une politique de maintenance**

Les paramètres dont il faut tenir compte pour adopter telle ou telle politique de maintenance sont principalement d'ordre économique et humain. Avec l'objectif de trouver une politique capable de réduire les coûts de maintenance, une méthode de suivi de l'état de fonctionnement d'un organe d'une machine doit être trouvée pour améliorer la disponibilité et pour estimer de façon plus précise le risque de panne. A cet effet, l'idéal serait de trouver des indicateurs externes, facilement accessibles et réaliser un système de mesures qui consiste à limiter le nombre de paramètres et de mesures à réaliser. Pour cela, il faut d'abord déterminer quelles sont les pannes les plus fréquentes par analyse statistique et les composants les plus problématiques par analyse technologique (étude faite par deux fabricants français des machines UGV, PCI et COMAU et deux laboratoires de recherche, le LSIS et le LARAMA ) [19].

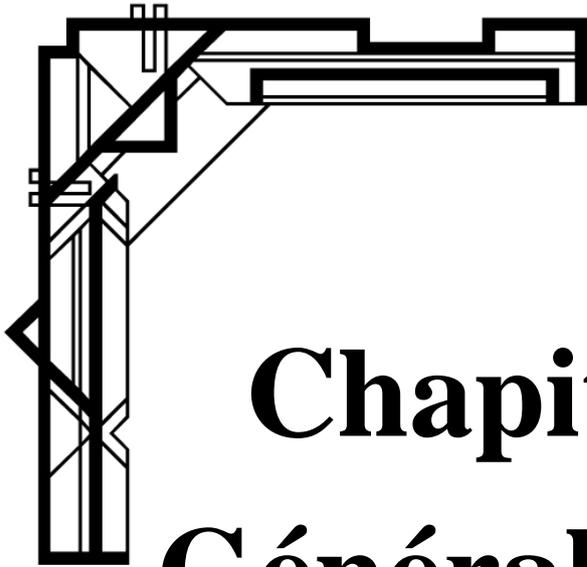
Turbines, pompes, moteurs, compresseurs, alternateurs, centrifugeuses, ventilateurs... toutes ces machines que l'on dit tournantes, ont un point commun ; elles comprennent des organes en rotation. Ce qui caractérise ces machines, c'est qu'elles sont composées d'organes fragiles (roulements, engrenages etc...) soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles. Les sources de défaillances sont donc multiples :

- Écaillage d'un roulement ;
- Rupture d'une dent d'un engrenage ;
- Désalignement d'un des axes, etc....

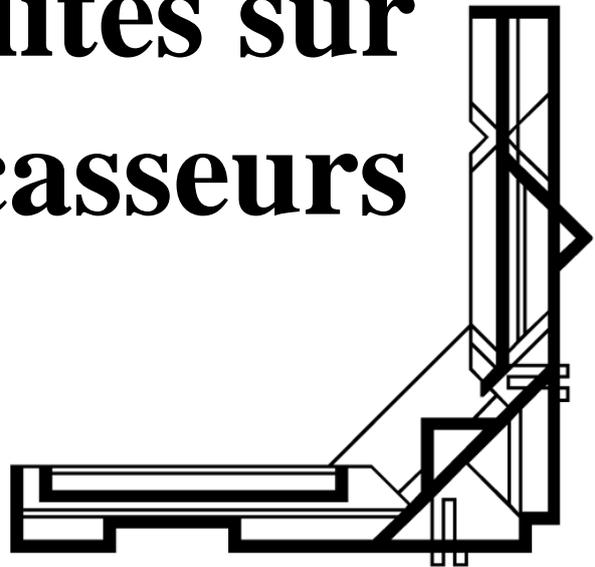
Pour certaines machines vitales d'un processus de production, ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences. Pour éviter des arrêts de production imprévus et les pertes économiques qui en découlent, il faut surveiller en permanence ces équipements et traquer tous les signes précurseurs de défauts avant qu'il ne soit trop tard. Pour cela il existe une variété de techniques.

## **X. Conclusion**

La maintenance industrielle est un élément essentiel d'une organisation performante . Cela implique l'utilisation de processus, de professionnels et d'outils pour s'assurer que la machine fonctionne correctement et à la hauteur de sa capacité. Il est important pour les organisations d'investir dans la maintenance de leurs actifs afin de maximiser leur efficacité opérationnelle et de réduire les pannes.



# **Chapitre 2 :** **Généralités sur** **les concasseurs**



## I. Introduction

Les technologies utilisées par les dispositifs de fragmentation varient en fonction de la zone d'application car elles sont adaptées aux besoins industriels spécifiques. Ainsi, il est impossible d'imaginer un seul dispositif qui puisse à la fois diviser le matériau en gros morceaux et le réduire à des grains fins.

La valeur de l'utilisation du matériau fragmenté sera une préoccupation commune pour tous les secteurs aux quels le dispositif de fragmentation et son intégration dans un ensemble de production doivent répondre.

Quand on parle de concassage dans l'industrie cimentière, on pense généralement à :

- ✓ Réduire la taille des matériaux de la carrière au besoin pour prochaine ligne de production.
- ✓ Le concassage de la matière première du ciment est généralement un processus simple Ce qu'il ne faut pas inclure un problème d'usure particulier ; et qui n'exige pas de granulométrie spéciale autre que la taille maximale.

## II. Rappel sur la notion de fragmentation

### II.1. Définition

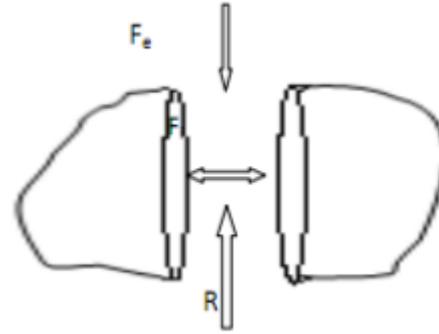
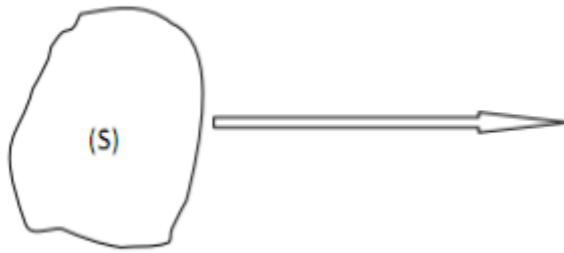
La fragmentation mécanique des solides peut être définie comme étant l'ensemble des opérations (concassage, broyage, etc) ayant pour but de réaliser, grâce à l'application des contraintes mécaniques externes soit :

- La division d'une masse en fragmentation de dimension maximale déterminée,
- La réduction d'un solide déjà fragmenté en éléments plus petits.

Les principaux champs d'application des engins de fragmentation sont extrêmement vastes et étendus en raison de l'infinie variété des applications industrielles dans les domaines de l'industrie des carrières, des combustibles solides, de la métallurgie, de la chimie, etc...

La fragmentation s'obtient donc par la rupture de la cohésion des corps solides sous l'action des forces extérieures qui peuvent être appliquées sous l'une ou l'autre. Considérons un corps solide de dimension moyenne quelconque soumise à une force extérieure de module supérieur à sa résistance à la fragmentation.

Il y a écrasement de ce corps par rupture de sa forme de liaison interne, entraînant la formation d'autres nouveaux corps solides de forme réduite. [20]



**Figure 2.1.** Solide avant fragmentation [20]

**Figure 2.2.** Solide pendant fragmentation [20]

Avec :

(S) : solide ;

$F_e$  = force extérieure ;

$F_i$  = force intérieure de cohésion ;

$R$  = résistance à la fragmentation.

Ces trois forces s'appliquent sur le solide afin de le fragmenter en morceaux plus petits.

## II.2. But de la fragmentation

La fragmentation des solides groupe un ensemble de technique ayant pour but de réduire par action mécanique extérieure, un solide de volume donné en plusieurs éléments de volume plus petit. En préparation mécanique des minerais, les objectifs de la fragmentation sont :

- De libérer dans les matériaux hétérogènes, qui constituent généralement une roche ou un minerai, les éléments valorisables tout en évitant autant que possible de la production des surfines (d'une très grande qualité) aux opérations ultérieures de concentration ;
- De réduire la matière minérale à des dimensions dictées par l'utilisation. [21]

## II.3. Principe de la fragmentation

La fragmentation s'obtient par rupture de la cohésion des corps solides sous l'action de forces externes qui peuvent être appliquées sous l'une des formes suivantes :

- Compression lente (écrasement sous vitesse de compression  $V = 0,1$  à  $0,8\text{m/s}$ ) ;
- Cisaillement ( $V = 4$  à  $8\text{m/s}$ ) ;
- Attrition et cisaillement combinés ( $V = 4$  à  $8\text{m/s}$ ) ;
- Attrition (usure) ( $V = 2$  à  $30\text{ m/s}$ ) ;
- Percussion par projection sur paroi fixe ( $V = 15$  à  $200\text{ m/s}$ ) ;

- Percussion au moyen d'organes mobiles : marteaux ou fléaux, boulets ( $V = 8$  à  $200\text{m/s}$ ) ;
- Percussion entre particules ; auto broyage ( $V$  relative =  $100$  à  $300\text{ m/s}$ ) ;
- Explosion sous l'action de forces internes [22].

#### **II.4. Les principaux appareils de la fragmentation**

Les appareils de fragmentation peuvent être divisés en catégories distinctes suivant la dimension du produit

- Appareil à écrasement alternatif (concasseur à mâchoires et giratoires) et écrasement continu (broyeur à cylindres) ;
- Appareils à frottement (broyeur à meules et broyeurs vibrants) ; ∞ Appareils à percussion (concasseur à impact, broyeurs à marteaux articulés, broyeurs à tuyères) ;
- Appareils mixtes opérants par écrasement, frottement et percussion (broyeurs à boulets et à barres, broyeurs autogènes). [23]

#### **II.5. Différentes opérations mécaniques utilisées pour la fragmentation des solides**

- Percussion par projection des grains sur des surfaces fixes ( $100\text{ m.s-1}$ ) ;
- Percussion des particules fixes par un corps broyant se déplaçant à des vitesses  $> 100\text{ m.s-1}$  ;
- Percussion entre particules ;
- Cisaillement ;
- Attrition, abrasion, usure par frottements entre deux corps rigides entre lesquels sont placées les particules solides.

On classe en général les appareils de fragmentation en fonction des dimensions des solides qu'ils traitent :

- Concasseurs pour l'obtention de gros fragments ;
- Broyeurs pour la production de poudre ;
- Pulvérisateurs, super-broyeurs pour la préparation de poudres très fines ;
- Désintégrateurs pour fragmenter les matières fibreuses. [24]

### III. Généralités sur les concasseurs

#### III.1. Historique

La première machine à concassage est apparue en 1830. Une idée a été postulée au sujet d'un marteau à chute libre, qui plus tard a été employé dans des bocards (broyeur ou concasseur). Vers les années 1840, un deuxième brevet a été publié, une boîte en bois et un tambour cylindrique en bois qui tournait à 350 [révolutions par minute]. Ni l'un ni l'autre dispositif n'a été assez développé pour avoir un impact sur l'industrie de tassement. Bien qu'il n'ait jamais développé une gamme des broyeurs manufacturés, Thomas EDSON a aidé à développer un broyeur primaire quand il essayait de réduire le magnétique « Oregon ». Il a découvert que l'écrasement des roches serait économique que d'utiliser des explosifs. Eli Whitney BLAKE a produit le premier concasseur à mâchoire réussi en 1858, un prototype que tous les broyeurs suivants suivaient. Philters W. GATES a breveté le broyeur giratoire, une autre machine de broyage primaire, en 1883. Les modèles de BLAKE et GATES ont été engagés dans un concours pour mesurer quelle machine était la plus réussie et productive. Le premier broyeur produit par SMITH et POST était le « Symons », le « Pillar Shft » comme broyeur giratoire, en 1910, ils produisaient également des broyeurs à mâchoires comme « Dodge ». [25]

#### III.2. Définition de concassage

Le concassage est la première étape de fragmentation. C'est l'opération qui permet la réduction granulométrique des matériaux, autrement dit la diminution de la taille des éléments qui constituent les matériaux en cours d'élaboration. Il s'agit d'un procédé purement mécanique qui consiste, le plus souvent, à placer les matériaux entre deux plaques métalliques dont l'une est fixe et l'autre est mobile et se rapproche de la plaque fixe. En fonction de la vitesse de rapprochement, on parlera d'écrasement ou de percussion [26]. Cette tâche s'effectue en deux ou trois stades (concassage primaire, secondaire et tertiaire), essentiellement en voie sèche. Les concasseurs industriels réduisent la matière depuis de très gros morceaux ou blocs jusqu'à environ 10 mm. Ils fonctionnent selon des principes différents selon les caractéristiques de la matière (résistance mécanique, abrasivité, humidité): par compression/écrasement ( concasseur à mâchoires, giratoire, à cône ou à cylindres) ou par choc/percussion ( concasseur à impact ou à marteaux) [27].

Le broyeur est défini à partir de :

- Sa capacité d'admission fixe la taille du plus gros bloc à scinder ;
- Le rapport de réduction optimal déterminé en fonction du rapport de taille ;

- Distribution granulométrique du produit en sortie ;
- Le rapport d'aspect moyen des fragments obtenus ;
- Coût d'entretien et facilité d'entretien.

### **III.3. Les différents types des concasseurs**

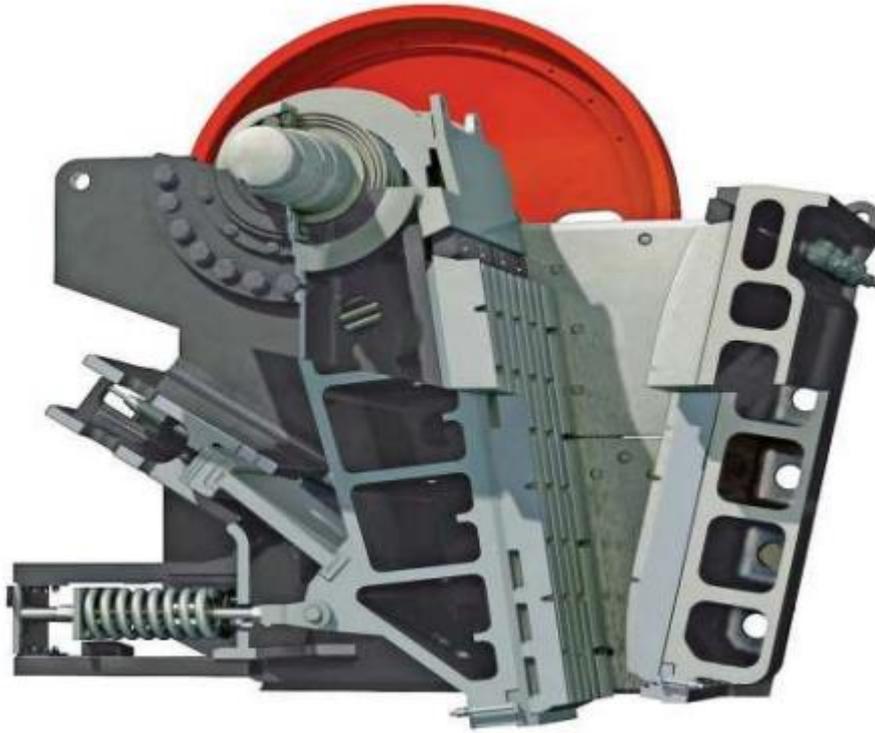
Sur le niveau industriel, la station de concassage peut être fixe ou mobile. Si elle est fixe, on doit exiger une installation en béton armé pour éviter la vibration et pour diminuer ainsi le bruit. D'autre part, si la station est mobile faudrait exiger le transport à l'aide du camion ou par la grue mobile. Elle doit monter à l'aide des patins pour réduire la vibration. [20].

#### **III.3.1. Les concasseurs à mâchoires**

Les concasseurs à mâchoires reposent sur un principe assez simple qui consiste à compresser la roche pour réduire sa taille. Il est constitué généralement d'une paroi mobile et d'un autre fixe et muni d'un blindage (simple effet). La partie mobile est mise en mouvement grâce à un système rotatif externe relié par un arbre de transmission. Ce concasseur associe deux mouvements : un mouvement de compression (de gauche à droite) qui permet de concasser la roche et un léger mouvement de friction (du haut vers le bas) qui permet de faire descendre les matières solides vers le convoyeur de réception des matériaux concassés. Ce type de concasseur est sans doute le plus populaire au monde de par sa conception rudimentaire, sa fiabilité et sa maintenance peu coûteuse. Il présente l'avantage de pouvoir concasser des matériaux très résistants et de grande taille. Son inconvénient majeur est que la granulométrie de sortie n'est pas garantie et qu'il peut y avoir des aiguilles familièrement appelées « poisons » qui échappent au concassage. Celles-ci peuvent être très gênantes car elles peuvent bloquer en aval l'extraction d'un silo, bloquer le fond d'une goulotte, cet inconvénient n'existe pas pour un concasseur giratoire. Les concasseurs à mâchoires sont utilisés pour le concassage grossier et le pré-broyage rapides et soigneux de matériaux mi-durs, durs et cassants. La variété des matériaux proposés, leur efficacité et leur grande sécurité les rendent idéaux pour la préparation d'échantillons en laboratoire et dans l'industrie.

Il est constitué par une mâchoire fixe et une mâchoire mobile animée d'un mouvement de va-et-vient autour d'un axe horizontal. Le produit à traiter est introduit à la partie supérieure de l'appareil. Lorsque la mâchoire mobile se rapproche de la mâchoire fixe elle écrase les fragments solides. Lorsqu'elle s'écarte ceux-ci descendent dans une partie plus étroite ou ils sont à nouveau écrasés et ainsi de suite jusqu'à ce qu'ils atteignent l'orifice de sortie [28].

Ces appareils permettent la réduction de solides durs jusqu'à 0,5 à 5 mm. Le plus simple est le concasseur à mâchoires, dont le mouvement est alternatif (Figure 2.3).



**Figure 2.3.** Concasseurs à mâchoires. [29]

Les types les plus répandus de concasseurs à mâchoires verticales sont le concasseur à simple effet (ou plutôt simple volet) et le concasseur à double effet (ou plutôt à double volet). Mais actuellement dans l'industrie minière, seuls, sont utilisés les concasseurs à simple effet qui sont moins lourds (et donc moins chers) que les concasseurs à double effet. [30]

#### **a) Le concasseur a simple effet**

Le concasseur a simple effet la mâchoire mobile est liée à sa partie supérieure a un arbre excentrique, cependant que sa partie inférieure repose sur un volet articulé, qui lui confère un mouvement alternatif d'amplitude limitée , mais qui provoque , en plus du mouvement horizontale ,une friction de la mâchoire cantre les matériaux .on peut dire que la mâchoire mobile glisse alternativement de base en haut pendant la phase d'ouverture , puis de haut en bas pendant la phase de fermeture d'un quantité voisine de double l'excentricité de l'arbre . [30]

### b) Le concasseur à double effet

Le concasseur à double effet dérivé de l'appareil Blake : la mâchoire mobile est portée par un balancier qui pivote autour d'un axe fixe situé à sa partie supérieure. Derrière ce balancier, une bielle est animée à sa partie supérieure d'un mouvement circulaire uniforme par un arbre excentrique à quatre paliers. Un système à deux volets entre les parties inférieures du balancier et de la bielle, d'une part, une bielle est bâtie d'autre part, permet de transformer le mouvement de la bielle en un mouvement alternatif périodique de la base du balancier. [30]

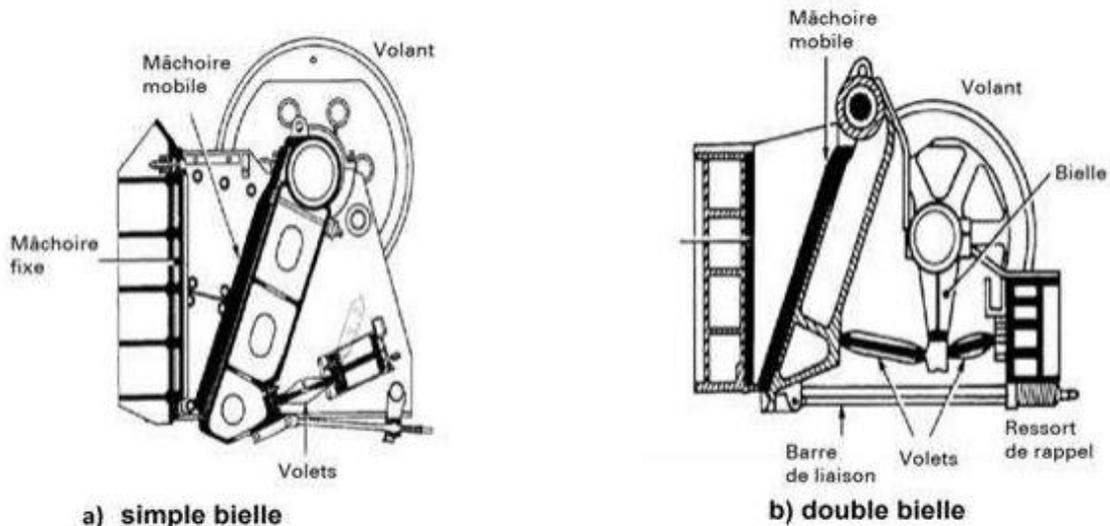


Figure 2.4. Concasseurs à mâchoires [30]

### c) Utilisations et caractéristiques des concasseurs à mâchoires

Les appareils à mâchoires sont essentiellement utilisés en concasseurs primaires dans les carrières de roches massives et dures ou dans les mines, soit en installations fixes, soit en installations mobiles et semi mobiles. Dans tous les cas, ils doivent être alimentés au moyen d'une trémie, d'un distributeur et éventuellement d'un crible pour court-circuiter les produits dont la dimension est inférieure au réglage.[31]

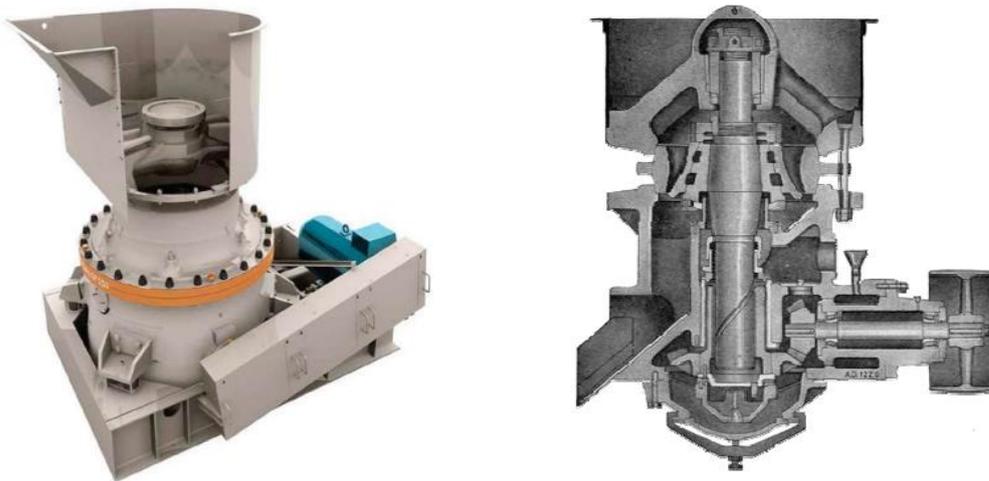
#### III.3.2. Concasseurs giratoires

Les concasseurs giratoires représentent les appareils les plus répandus dans les diverses étapes de préparation des minerais et des matériaux. Ces machines, qui ont fait l'objet d'incessantes recherches durant ces dernières décennies, sont pour l'heure les plus modernes et les plus performants par :

- Leur débit en fonctionnement continue ;
- L'importance des coefficients de réduction possible ;
- Leur aptitude à résoudre la quasi-totalité des problèmes de concassage ;
- Leur réglage évoluant vers des télécommandes ou automates programmables.

Ce sont des appareils toujours alimentés par gravité qui procèdent par écrasement, tout comme les concasseurs à mâchoire. Tous les concasseurs giratoires sont construits autour d'un même principe :

- Une partie externe fixe de révolutions porte une mâchoire « bol » ;
- Une partie interne, également de révolutions mais mobiles, porte une mâchoire, dite « noix », oscillant libre autour d'une arabe dans l'axe sécant à l'axe vertical de la machine au niveau supérieur de la chambre de broyage excentré en partie inférieure dans une chambre tournante formant excentrique. [28]



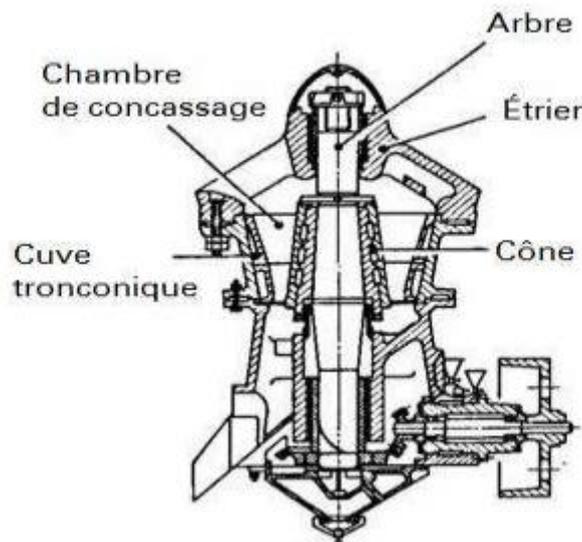
**Figure 2.5.** Concasseur giratoire. [28] [29]

On étudiera chacune de ces machines en fonction de leurs applications

- Concasseurs giratoires primaires ;
- Concasseurs giratoires secondaires ;
- Concasseurs giratoires tertiaires.

**a) Concasseurs giratoires primaires**

Ils sont tous à arbre guidé et porté. L'arbre est guidé en tête, dans un étrier, au niveau de l'intersection des axes de l'arbre et du bâti de la machine, et porté en pied par un vérin permettant le réglage et la compensation de l'usure. L'entraînement se fait en pied par l'excentrique monté le plus souvent sur bague bronze, et parfois sur roulement. Le mouvement y est transmis directement par l'intermédiaire d'un couple d'engrenages coniques formant à la fois réduction et renvoi d'angle (ou anciennement par poulie à axe vertical). La chambre de broyage, largement ouverte, a pour bissectrice une génératrice quasi verticale.



**Figure 2.6.** Concasseurs giratoires primaire [28].

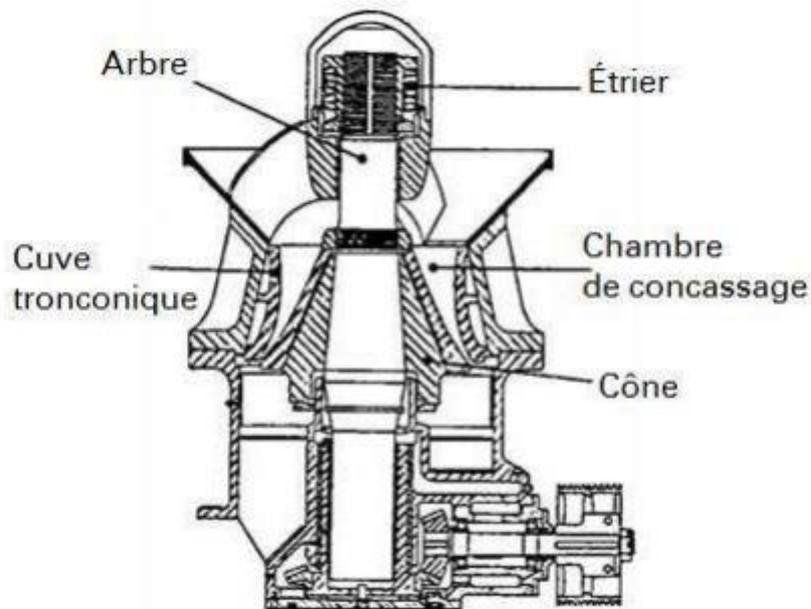
L'évacuation des matériaux concassés s'effectue en sortie inférieure par décharge annulaire (ou par deux couloirs si entraînement direct par poulie à axe vertical). Pour les anciens appareils à tête suspendue, le réglage était réalisé par un écrou en partie supérieur de l'arbre. L'arbre est supporté par un vérin qui permet un réglage quasi-instantané.

Les facteurs déterminant pour la production et le rendement des concasseurs sont, bien évidemment, le choix de la dimension, suivi

- La vitesse de rotation ;
- L'angle de prise des matériaux entre les pièces bruyantes qui ne doit pas dépasser 280 sous peine de voir les blocs sauter dans la cuve de broyage.

**b) Concasseurs giratoires secondaires**

Ce sont des appareils destinés à reprendre les matériaux préconcassés à l'étage primaire afin de les ramener à une dimension admissible pour les appareils, La plupart du temps, ils ne sont pas utilisés pour fabriquer des matériaux fins, sauf les ballasts.



**Figure 2.7.** Concasseurs giratoires secondaires [28]

Le concassage secondaire assure un grand rapport de réduction 4 à 5 les contraintes suivent les mêmes critères comme le concasseur primaire tel que

- Admission et dégagement des produits à concasser très libre ;
- Angle de pincement dans la chambre de broyage déterminé à la limite de la préhension des matériaux à traiter.

Les concasseurs giratoires secondaires, sont des appareils « à tête sur arbre en porte à faux » ce dernier système, présente plusieurs avantages :

- Maintien d'un circuit fermé ;
- Retour rapide au réglage établi de la mâchoire ;
- Raideur des ressorts oléopneumatiques plus faible que les traditionnels ressorts mécaniques.

### c) **Concasseurs giratoires tertiaires**

Ils ne diffèrent des concasseurs secondaires que par la géométrie de la chambre de concassage. Il s'agit donc de machine déterminante dans la chaîne de production de granulat routier ou de béton, qui nécessite par ailleurs une qualité intrinsèque de grande dureté et une grande résistance à l'abrasion. Les efforts des différents constructeurs, au cours des dernières décennies, ont porté sur la mise en évidence et la bonne application des conditions idéales d'exploitation, afin d'améliorer

- Le coefficient de réduction ;
- Le coefficient d'aplatissement ;

- Le coût des pièces d'usure ramené à la tonne des produits finis ;
- Le rapport puissance absorbée/tonnage produit.

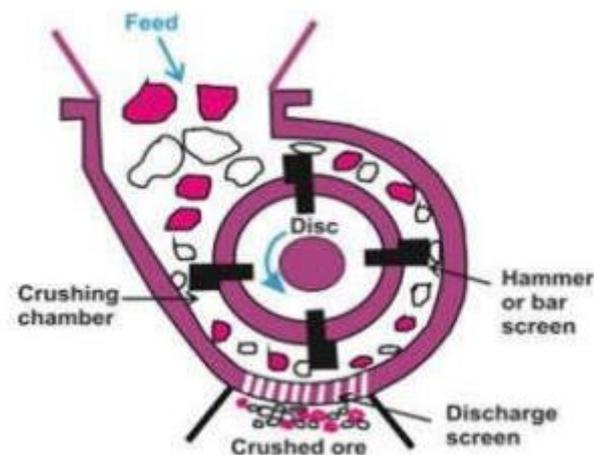
Toutes ces conditions sont déterminées par :

- La forme de la chambre de concassage ;
- La vitesse d'excitation de la tête ;
- L'inclinaison de la tête par rapport au bol.

On recherchera dans les concasseurs giratoires tertiaires, des chambres très faiblement décroissantes en volume, pour assurer une bonne compacité des produits en cours de concassage.

### III.3.3. Concasseurs à percussion

Sont le plus couramment utilisés dans l'industrie des carrières de pierre pour la fabrication pierres à grain fin utilisées dans les matériaux routiers et de construction. Le concasseur à percussion comme illustré à la (Figure 2.8 ) alimentent le matériau dans la chambre de broyage où un disque rotatif contenant marteau fonctionne. L'action rotative du marteau applique un coup violent sur l'alimentation et casser les pierres à une taille uniforme. L'écran de décharge de type maille est présent au bas de la machine qui sépare les pierres fines des pierres surdimensionnées l'un est. Les pierres non qualifiées sont balayées pour un broyage supplémentaire jusqu'à ce qu'elles soient fines suffisamment pour répondre aux spécifications requises et sortir de la porte de décharge. Cet les concasseurs sont normalement utilisés pour le concassage secondaire ou tertiaire. [32]



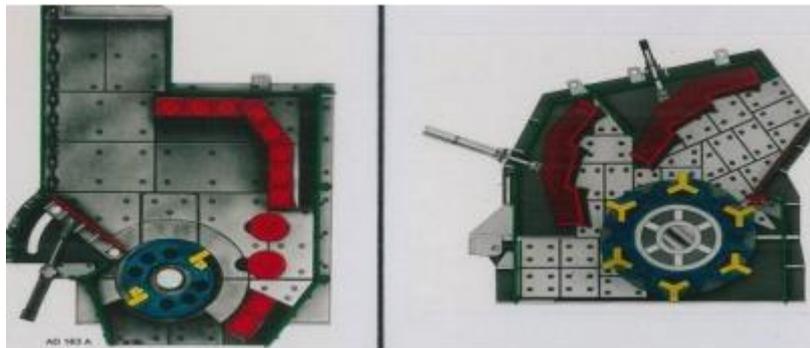
**Figure 2.8.** Concasseurs à percussion.[32]

❖ **Concasseurs à percussion à axe horizontal**

Cette famille est elle-même divisée en deux groupes : Les appareils à percuteurs rigides et ceux qui ont des percuteurs articulés.

➤ **Concasseurs à percuteurs rigides**

Ils sont constitués d'un rotor cylindrique à vitesse variable muni de percuteurs et d'un bâti avec des plaques de choc. Constituant un, deux ou trois écrans réglables en position, en fonction du nombre d'étages de concassage recherché et du coefficient de réduction. Tous les paramètres de ces appareils sont réglables à distance, permettant ainsi leur intégration dans un ensemble automatisé. Ils ne possèdent pas de grille de sortie. [33].



**Figure 2.9.** Principe d'un concasseur à percuteurs rigides. [34].

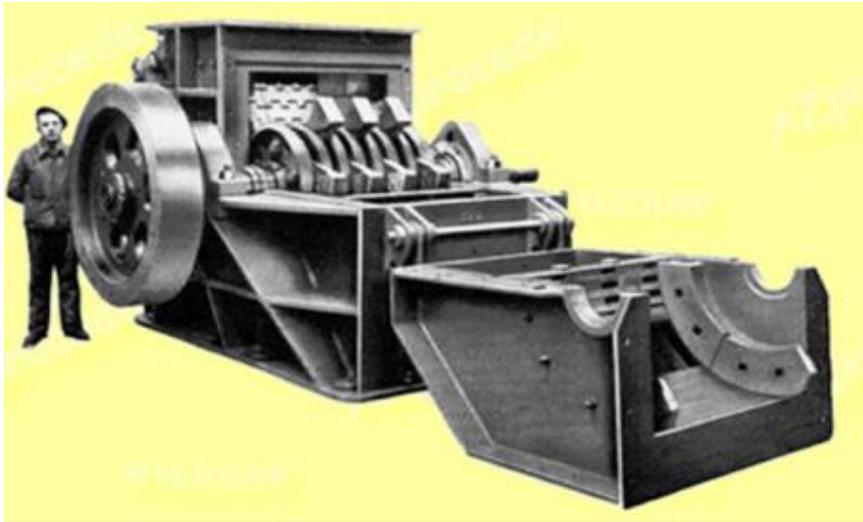
**Caractéristiques des concasseurs à percuteurs rigides :**

- Le nombre d'écrans est généralement de 2. Cela permet de tirer parti de la machine en mettant deux étages de concassage, quelques machines sont de trois écrans pour augmenter encore le coefficient de réduction.
- Il est possible de régler la machine en agissant sur les écartements des écrans. Cela permet de "translater" la courbe granulométrique vers les dimensions plus importantes.
- Il existe un deuxième paramètre sur lequel il est possible d'intervenir, la vitesse de rotation du rotor. Il s'agit d'un point très important. En effet, la vitesse de percussion. Qui peut varier de 25 à 55 m/s par exemple en position secondaire ou tertiaire. A une influence directe sur la composition granulométrique. C'est à dire pouvoir faire varier la production granulométrique intermédiaire en fonction du marché. La courbe granulométrique n'est pas donc translatée (déplacement parallèle ou par affinité). [33].

**III.3.4. Concasseurs à marteaux**

Le concasseur ou broyeur à marteaux est constitué d'une cuve dont la paroi est épaisse et résistante. Dans cette paroi sont pratiquées des ouvertures à travers lesquelles passe le produit

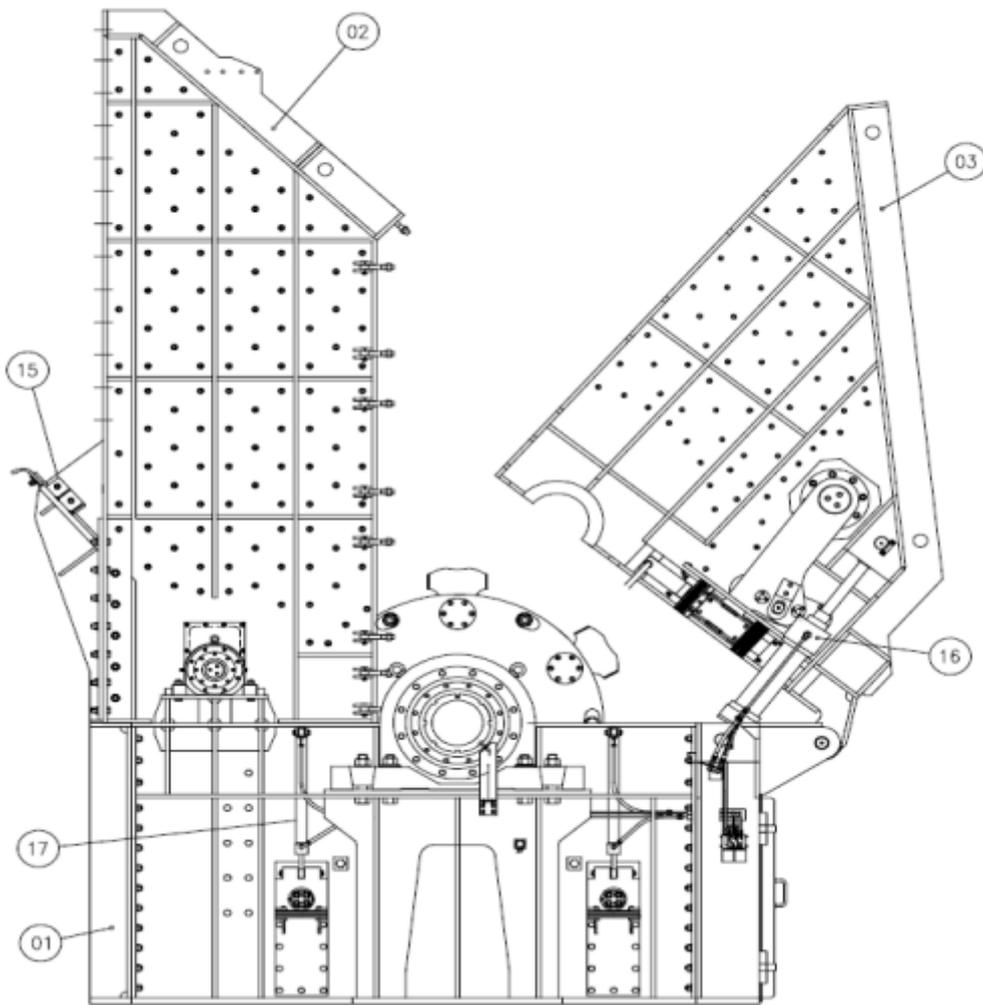
broyé. A l'intérieur de la cuve tourne un rotor muni de marteaux. La vitesse de rotation est élevée pour assurer une vitesse périphérique des marteaux allant de 20 à 100 m.s-1. Ce type de broyeur n'est pas utilisé pour des matériaux durs et abrasifs, qui provoqueraient une usure trop importante (figure 2.10) [35]



**Figure 2.10.** Concasseurs à marteaux.[35]

**a. Corps du concasseur**

Le corps du concasseur à marteaux est une construction hélicoïdale divisée en un certain nombre de sections assemblées sur le site (cf. annexes 1, 2 et 3). Le corps est également muni de plusieurs portes d'inspection permettant d'observer et d'accéder rapidement à l'intérieur du concasseur. La matière pénètre dans la section supérieure fixe (02) du corps via l'orifice d'admission. La moitié de la section supérieure du corps peut être basculée pour accéder à l'intérieur du concasseur. Le plateau de concassage (06) est logé dans la section supérieure basculante (03). L'intérieur des parois de la section supérieure est recouvert de plaques d'usure (18). La section supérieure basculante s'ouvre à l'aide de deux cylindres hydrauliques (16) alimentés en huile depuis une station de pompage hydraulique et contrôlés au moyen de soupapes - manuelles. Ces soupapes peuvent être verrouillées à l'aide d'un cadenas afin d'éviter toute utilisation fortuite. La section inférieure du corps repose sur une fondation et constitue la sortie de la matière sous les cylindres d'admission et le rotor à marteaux. La section inférieure porte le palier des cylindres d'admission et du rotor à marteaux du concasseur et forme un support pour les montants de la grille de sortie ainsi que toute la section supérieure du corps. [36]



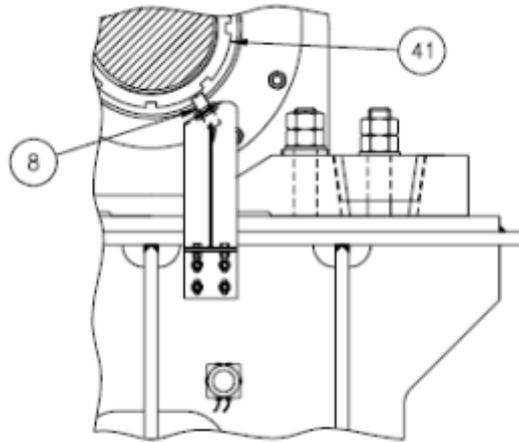
**Figure 2.11.** Corps du concasseur [36]

### **b. Fonctionnement**

La matière introduite dans le concasseur à marteaux commence par tomber sur le cylindre d'admission qui, d'une part, amène la matière vers le rotor à marteaux et, d'autre part, amortit la chute des grosses pierres sur le rotor. Le concassage par percussion a lieu dans la zone où la matière quitte le cylindre d'admission pour être directement frappés par les marteaux qui viennent broyer les pierres par le bas. Pour le reste des opérations de concassage, les marteaux emportent les pierres vers la section supérieure du corps où elles sont broyées tandis qu'elles sont percutées les unes contre les autres. Il est procédé au concassage final lorsque les pierres viennent porter sur le plateau de concassage où elles sont frappées par les marteaux un certain nombre de fois. Lorsque les pierres sont suffisamment broyées pour pouvoir passer dans la zone de la grille, la finition du concassage peut enfin

avoir lieu pour donner aux morceaux de pierres leur taille de produits finis en les broyant entre les barreaux de la grille à l'aide des marteaux

Vu la vitesse de rotation élevée des marteaux, la finesse de la matière varie de l'état de poussières à celui de petits morceaux dont la taille maximale correspond à la fente de la grille de sortie. Néanmoins, seul un pourcentage relativement bas de morceaux présente des dimensions supérieures aux  $2/3$  de la largeur de la fente.



**Figure 2.12.** Contrôleur de vitesse.[36]

Le concasseur à marteaux est équipé d'un contrôleur de vitesse (08) qui explore l'écrou de palier (41) de l'arbre du rotor. Le moteur du rotor s'arrête si la vitesse de rotation est réduite à un niveau inférieur à celui autorisé. La raison peut en être, par exemple, que les goupilles de cisaillement de l'accouplement de sécurité (35) se sont brisées à la suite d'une surcharge. Le reste du matériel est alors arrêté en suivant le tableau de verrouillage. Avant de remettre le concasseur à marteaux en marche après son arrêt, il est recommandé de vérifier si l'arrêt est dû à une rupture des goupilles de cisaillement. Le cas échéant, les remplacer. Lors de l'entretien et de réparations, le concasseur peut être ouvert et la grille de sortie relevée grâce au dispositif hydraulique. En outre, la machine est livrée avec un extracteur hydraulique servant à remplacer les marteaux [36].

**c. Avantages**

- Structure simple ;
- Facile à utiliser et à entretenir ;
- Rentabilité financière (Economie et à moindre cout) ;
- Avec une grande taille d'alimentation à l'entrée comme à la sortie.[24]

### **III.4. Domaine d'utilisation des concasseurs**

Le concasseur est utilisé dans le ciment, la construction, la métallurgie, le marteau réfractaire, la céramique et d'autres domaines industriels pour le concassage secondaire ou tertiaire de roches et de minerais durs. Compte tenu de ses caractéristiques, le concasseur à mâchoires se classe au premier rang des concasseurs et c'est la machine la plus appropriée pour le concassage de roches et de scories avec une résistance à la compression ne dépassant pas 280MPa et une taille maximale ne dépassant pas les paramètres techniques.

### **III.5. Les différentes étapes du concassage**

Dans le concassage, il existe les étapes suivantes :

#### **III.5.1 Concassages primaires**

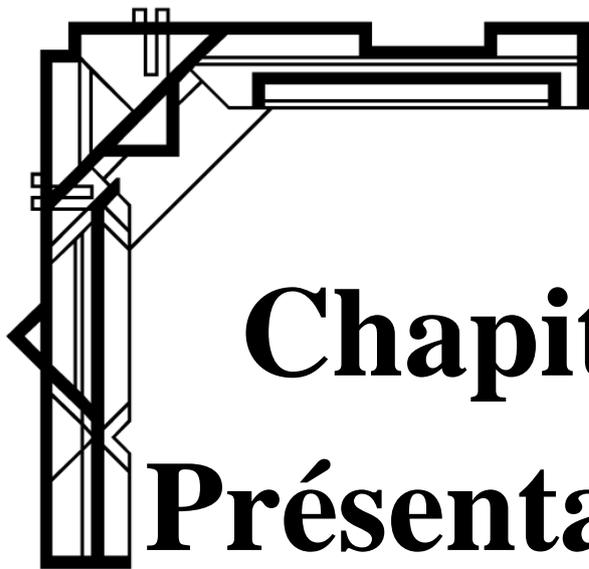
Le concasseur à ce stade est une machinerie lourde utilisée pour réduire le minerai Taille maximale de la ROM adaptée au transport et à l'alimentation du concasseur secondaire ou Broyeurs AG/SAG. Ces appareils fonctionnent toujours en circuit ouvert, avec ou sans écran de scalpage amélioré (Grizzlies). Il existe deux principaux types de concasseurs principalement pour les opérations métallurgiques : concasseurs à mâchoires et concasseurs giratoires, bien que l'utilisation de concasseurs à percussion comme amorces est limitée et sera revue respectivement. Les scalpeurs sont souvent associés à des circuits de concasseurs à mâchoires et peuvent est inclus pour maximiser le débit.

#### **III.5.2 Concassage secondaires/tertiaires**

Les concasseurs secondaires sont plus légers que les concasseurs primaires fort et robuste. Pointes finement broyées dans du minerai métallique Fabriqué par concasseur à cône. Puisqu'ils utilisent du minerai concassé primaire comme alimentation, taille maximale de l'alimentation généralement inférieure à 15 cm de diamètre de plus, étant donné que la plupart des composants nocifs du minerai, tels que les impuretés métalliques, le bois, l'argile et les boues ont été enlevés, ce qui facilite grandement l'élimination. De même, les moyens de transport et d'alimentation du broyeur ne nécessitent pas aussi robuste que l'étage primaire. Concasseur secondaire/tertiaire convient également aux aliments secs, ils sont conçus pour réduire le minerai à une certaine taille adapté au ponçage.

#### **IV. Conclusion**

Dans ce chapitre une recherche bibliographique a été effectuée sur la fragmentation en introduisant leur but, leur principe et les différents appareils utilisés dans cette opération, puis on a donné une description sur les concasseurs, le principe de leur fonctionnement, les différents types et leurs principaux composants.

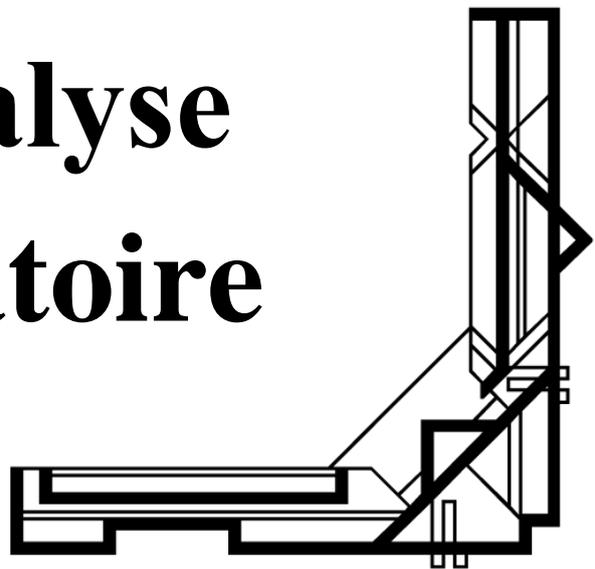


# **Chapitre 3 :**

## **Présentation de**

### **l'analyse**

### **vibratoire**



## I. Introduction

Les mesures vibratoires sont des paramètres intéressants pour la maintenance des machines tournantes. Basées sur la détection de divers défauts pouvant affecter la machine et sur le suivi de leurs modifications. Ces défauts peuvent provenir de nombreuses sources, notamment mécaniques, hydrauliques, magnétiques ou électriques.

Les principes de l'analyse vibratoire reposent sur l'idée que les structures des machines excitées par des forces dynamiques émettent des signaux vibratoires à la même fréquence que les forces qui les provoquent ; la mesure globale en un point est la réponse de la structure aux différentes forces excitatrices. Ainsi, grâce à des capteurs placés en des points précis, des vibrations recueillies régulièrement sur les machines tournantes, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels défauts et à suivre leur évolution afin de planifier ou reporter des interventions mécaniques.

## II. Généralités sur les vibrations

### II.1. Définition de vibration (norme AFNOR 90.001)

La vibration est une variation dans le temps de la valeur d'une grandeur donnée, propre au mouvement, voire de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur dont il est question est soit plus grande soit plus petite que la valeur moyenne connue comme valeur de référence [37]. Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement autour de la position d'équilibre stable (Figure 3.1.).



**Figure 3.1.** Systèmes oscillants [37].

Les vibrations ont des formes et des comportements très variables.

## II.2. Caractéristiques d'une vibration

Une vibration est caractérisée par trois paramètres : L'amplitude, La fréquence, La phase.

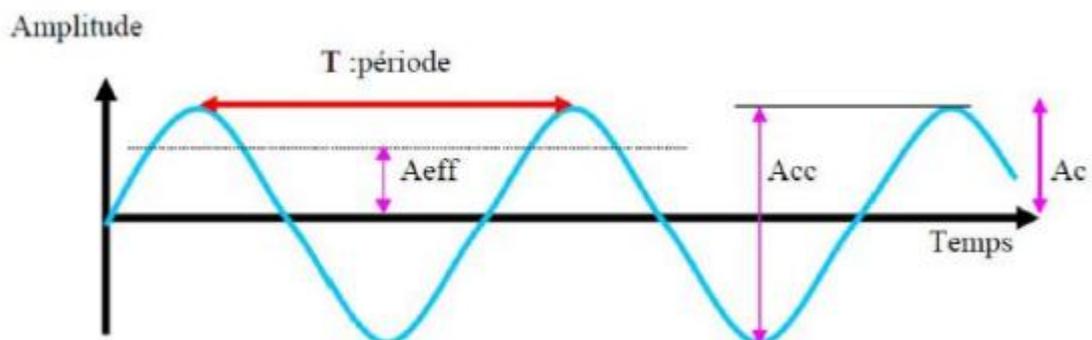
### II.2.1. Amplitude

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ( $1\mu\text{m}$ )

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}.$$

De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir Plusieurs grandeurs (figure 3.2.) pour caractériser son amplitude.

- L'amplitude crête ( $A_c$ ) : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.
- L'amplitude crête à crête ( $A_{cc}$ ) : appelée « peak to peak » ( $A_{pp}$ ) en anglais. Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée « amplitude double » ( $A_{pp} = 2A_c$ )).
- L'amplitude efficace ( $A_{eff}$ ) : ou RMS en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire [38].



**Figure 3.2.** La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale) [39].

### II.2.2. La fréquence

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz). Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz. La fréquence  $f$  est l'inverse de la période  $T$  qui est la durée d'un cycle.

$$f = \frac{1}{T} [40].$$

### II.2.3. La phase

La phase  $\Phi$  est représentative du temps qui s'écoule entre une référence que l'on se donne et l'instant que l'on considère. Elle est exprimée en unités d'angle, sachant que

$$\text{à } t = 0 \quad \Phi = 0 \text{ rad}$$

$$\text{à } t = T \quad \Phi = 2\pi \text{ rad (ou } 360^\circ)$$

La notion de phase n'a de signification que pour une vibration harmonique.[41]

## II.3. Différentes formes de vibrations

Les vibrations mécaniques sont des mouvements oscillants autour d'une position moyenne d'équilibre. Ces mouvements oscillants caractéristiques l'effort qui les génère, peuvent être, soit périodiques (harmonique et non harmonique), soit apériodiques (transitoires et aléatoires) selon qu'ils se répètent ou non identiquement à eux-mêmes après une durée déterminée.

### II.3.1. Vibrations harmoniques

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (Figure 3.3.). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

Si l'on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons

$$X(t) = X \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi).$$

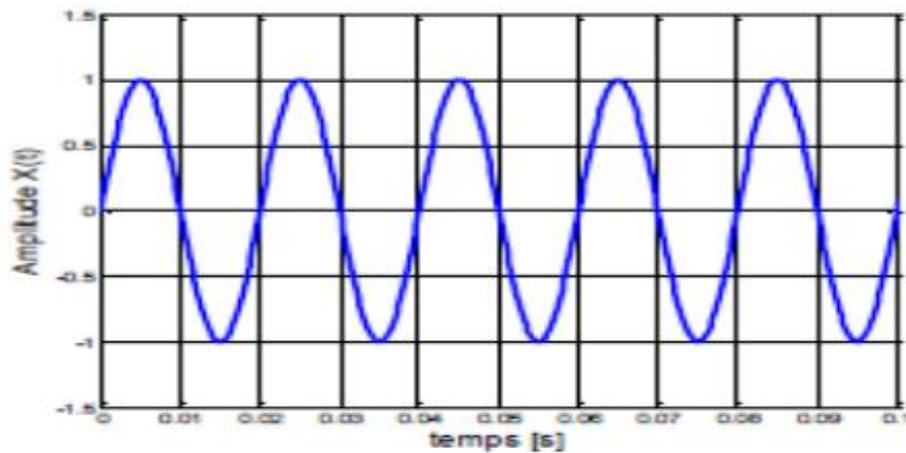
Avec

$X$ : Amplitude ;

$\omega$  : vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ( $2\pi f$ ) ;

$f$  : fréquence du mouvement ;

$\varphi$ : Phase du mouvement par rapport à une référence dans le temps [42].



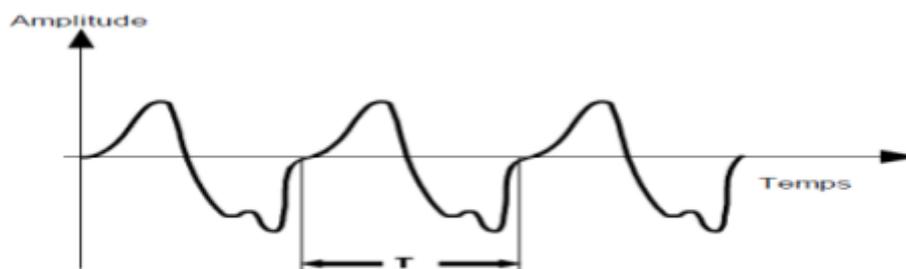
**Figure 3.3.** La représentation d'un signal harmonique (vibration sinusoïdale) [37].

### II.3.2. Vibrations périodiques

Une vibration périodique est telle qu'elle se reproduit exactement après un certain temps appelé période (figure 3.4.). Une telle vibration est créée par une excitation elle-même périodique. C'est le cas le plus fréquent rencontré sur les machines. [43]

Elle est décrite par l'équation :

$$X(t) = \sum_{i=1}^n [(X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i))].$$



**Figure 3.4.** vibration périodique [44].

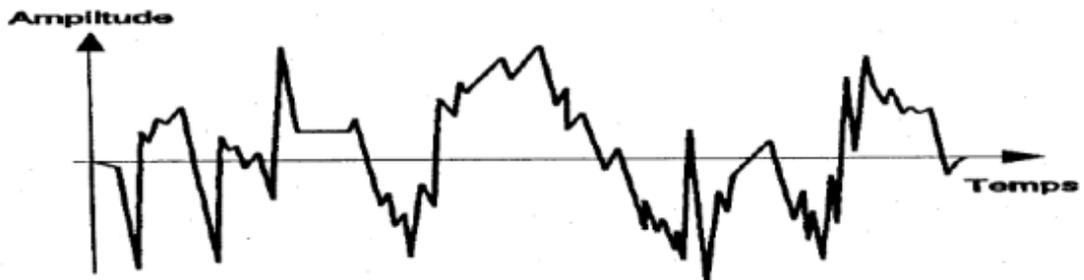
### II.3.3. Vibrations apériodiques

#### a) Les vibrations aléatoires

Une vibration aléatoire (Figure 3.5.) est telle que son comportement temporel est quelconque, c'est-à-dire que l'on n'observe jamais de reproductibilité dans le temps. C'est le cas des chocs que l'on enregistre sur un broyeur.[41]

Elle est décrite par l'équation ci-dessous

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} [(X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)].$$



**Figure 3.5.** Vibration aléatoire.[44]

### b) Vibration transitoire

Une vibration transitoire est une vibration non continue observable pendant un bref instant. Ce type de vibration apparaît lors d'un choc.



**Figure 3.6.** Vibration transitoire [44].

## II.4. La transformée de Fourier

La transformée de Fourier est l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine industriel. De part sa facilité de mise en œuvre et d'interprétation, cette représentation permet de connaître le contenu fréquentiel d'un signal temporel. Pour cette raison la transformée de Fourier a été largement utilisée dans le domaine de diagnostic des défauts pour localiser les fréquences caractéristiques de défauts. Dans la pratique, et Particulièrement pour des signaux numériques, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (Fast Fourier Transformé, FFT) [45].

Elle est définie par :

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}$$

Avec

$X(K\Delta f)$ : La transformée de Fourier discrète rapide ;

$t_e$ : La période d'échantillonnage du signal temporel ;

$n$ : Le numéro de l'échantillon ;

$K$ : Le numéro de la ligne fréquentielle ;

$\Delta f$ : L'intervalle entre deux raies fréquentielles ;

$N$  : Le nombre d'échantillons prélevés.

## II.5. Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique [46]

### II.5.1. Déplacement

Un déplacement : La position de la masselotte varie de part et d'autre de la position d'équilibre, allant de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement (figure 3.7.). On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante

$$x(t) = A \sin(\omega t).$$

Où

$X$ : Déplacement (m);

$t$ : Temps (s) ;

$A$ : Amplitude ( $\mu\text{m}$ );

$\omega$ : pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

La période de ce mouvement (ici égale à un tour du rotor) est notée  $T$ , elle est exprimée en secondes (s). L'inverse de la période, c'est-à-dire la fréquence est notée  $f$ , et est exprimée en Hertz (Hz). Nous vous rappelons que  $\omega$ ,  $T$  et  $f$  sont liés par les relations

$$f = \frac{1}{T} \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

### II.5.2. Vitesse

La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. Mathématiquement, la vitesse notée  $v$  est la dérivée du déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit

$$v = \frac{dx}{dt} = d \frac{A \sin(\omega t)}{dt} = A\omega \cos(\omega t).$$

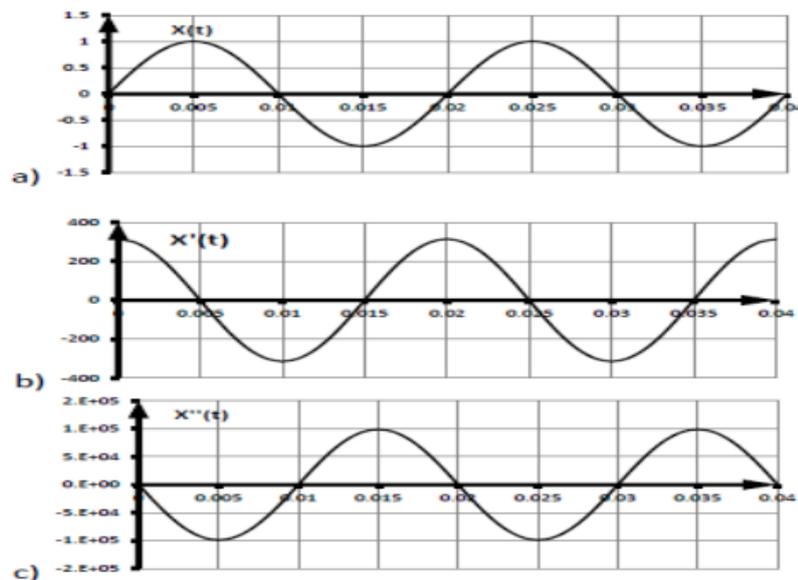
Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre (figure 25).

### II.5.3. Accélération

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps. Mathématiquement, L'accélération notée est la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Elle s'écrit

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = d \frac{A\omega \cos(\omega t)}{dt} = -\omega A\omega \sin(\omega t).$$

Une accélération Celle-ci permet à la masselotte de passer de sa vitesse minimale en début de course à sa vitesse maximale au point d'équilibre avant de décélérer en fin de course (figure 3.7.).



**Figure 3.7.** Grandeurs associés à un signal vibratoire

a) Déplacement ; b) vitesse ; c) accélération [37].

### III. Diagnostique et surveillance des machines tournantes

La mise en place d'un plan de maintenance est basée sur la surveillance de l'état de l'équipement, qui est une méthode générale pour établir la santé d'une machine à l'aide des paramètres mesurés qui reflètent les changements dans l'état mécanique de la machine [47]. Il est donc nécessaire de préciser les caractéristiques des différentes techniques de surveillance d'état pour sélectionner technique appropriée(s) pour chaque pièce d'équipement.

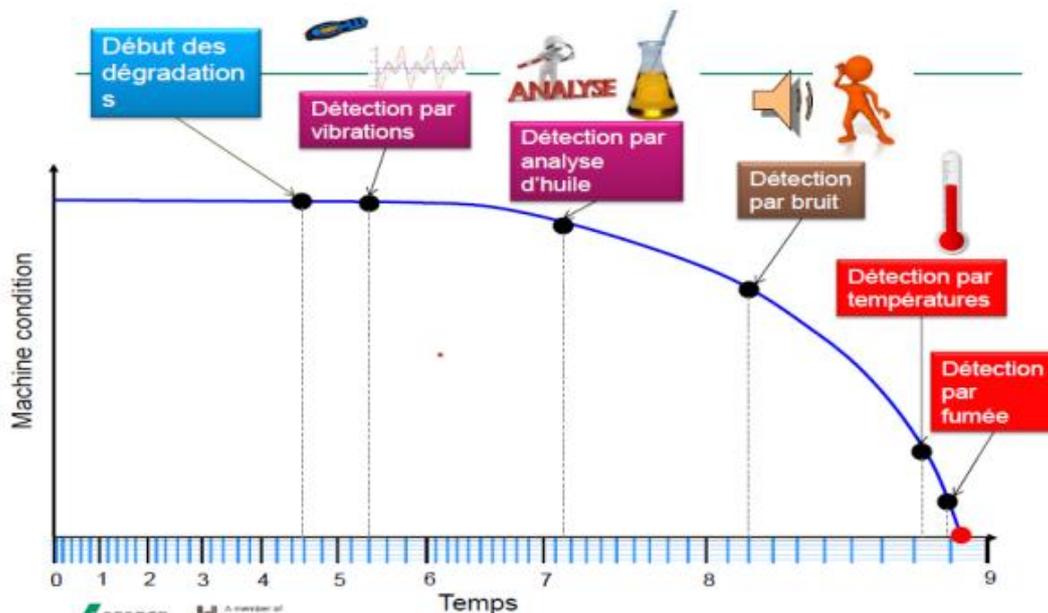


Figure 3.8. les vibrations et les modes de détections.[47]

#### III.1. L'analyse des huiles

L'analyse des huiles est d'une importance primordiale dans tout programme de maintenance des machines industrielles. La mise en œuvre de cette analyse est simple et presque tous les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être sujets à ce diagnostic. L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en ressent.

L'analyse d'huile permet de suivre dans le temps les caractéristiques physicochimiques du lubrifiant. Cela permet d'apprécier son état de dégradation et donc son aptitude à remplir sa fonction dans la machine.

Les résultats de l'analyse permettent de déceler des anomalies telles que :

- La contamination par des particules internes de l'équipement ;
- La pollution par des agents extérieurs ;
- L'usure par abrasion.

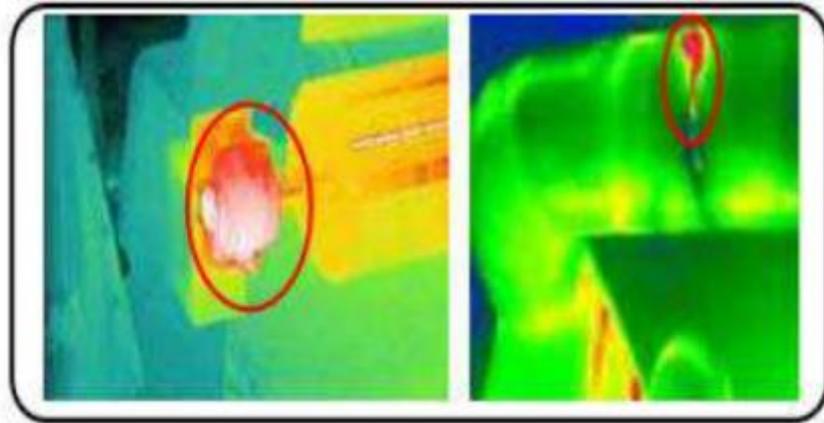
L'analyse d'huile fait partie des moyens mis en œuvre pour faire la maintenance préventive. Avec l'analyse vibratoire et la thermographie, elle permet d'éviter les pannes imprévues et les réparations coûteuses.[48]

### **III.2. Thermographie infrarouge**

#### **III.2.1. Définition**

La thermographie est une des techniques utilisées pour contrôler l'état des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l'intensité des émissions de rayons infrarouges (c'est-à-dire de chaleur) par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l'équipement. Grâce à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance. Le champ d'application de cette technique est très vaste et on peut citer :

- La détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs surdimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier) (figure 3.9.).
- La détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations etc....
- La thermographie infrarouge est relativement coûteuse (8 000 DT à 70 000 DT environ pour l'ensemble caméra + logiciel de traitement d'images associé), mais c'est un outil très polyvalent.[48]



-a- Défaut sur un palier      -b- Fuite sur une canalisation

**Figure 3.9.** Images thermographiques. [48]

### III.2.2. Matériels de mesure

a) **Le thermomètre infrarouge [49] [50]**



**Figure 3.10.** Thermomètre infrarouge. [49] [50]

b) **Caméra infrarouge [50] [49]**



**Figure 3.11.** Caméra infrarouge [50] [49].

### III.3. L'analyse acoustique

Permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

### III.4. Le contrôle ultrasonore

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l'enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse. La technique offre de multiples applications dans le contrôle d'équipements hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).[51]

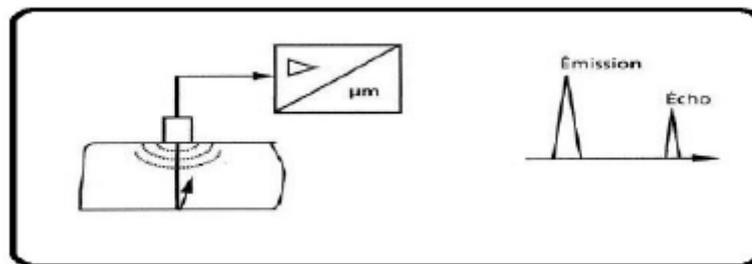


Figure 3.12. Mesure par ultrason.[52]

### III.5. L'analyse vibratoire

C'est la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.[53]

## IV. Choix d'une technique d'analyse

Chaque méthode a son champ d'application privilégié. Par exemple, l'analyse vibratoire convient aux défauts liés à la cinématique et à la structure de la machine, mais dans une plage de fréquences déterminées (situées généralement entre quelques Hertz et plusieurs dizaines de KHz). Elle couvre aussi les défauts spécifiques aux roulements (à plus hautes fréquences). Au-delà de 20 KHz, il est souvent préférable d'utiliser un contrôle par ultrasons ou par émission acoustique. L'analyse acoustique se limite à la détection de bruits dans les

fréquences audibles, mais lorsque la dégradation d'un roulement se manifeste en une fréquence audible, il est souvent trop tard pour intervenir. L'analyse d'huile consiste principalement à analyser les particules présentes dans l'huile, ce qui va révéler une usure anormale d'un ou plusieurs organes. Elle doit être appliquée dans le cas de machines où l'huile joue un rôle primordial et lorsque l'analyse des débris d'usure est significative [54].

**Tableau 3.1.** Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante [54].

	<b>Principaux avantages</b>	<b>Principales limitations</b>	<b>Champs d'applications</b>
<b>Analyse vibratoire</b>	Détection de défauts à un stade précoce. Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi. Autorise une surveillance continue.	Spectres parfois difficiles à interpréter.  Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses	Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc....)
<b>Thermographie</b>	Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation. Interprétation souvent immédiate des résultats	Détection de défauts à un stade moins précoce que l'AV.  Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffement de surface).  Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi.	Détection de tous les défauts engendrant un échauffement
<b>L'analyse des mesures ultrasonores</b>	Permet de détecter l'apparition de défauts audibles. Autorise une surveillance continue.	Sensibilité au bruit ambiant.  Diagnostic souvent difficile à réaliser.	Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

<p><b>Analyse d'huile</b></p>	<p>Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci entraîne une usure ou un échauffement. Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules</p>	<p>Ne permet pas de localiser précisément le défaut. Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.</p>	<p>Contrôle des propriétés physicochimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination</p>
<p><b>Analyse acoustique</b></p>	<p>Permet de détecter l'apparition des défauts audibles. Autorise une surveillance continue.</p>	<p>Sensibilité au bruit ambiant. Diagnostic souvent difficile à réaliser. Problèmes de répétabilité des mesures.</p>	<p>Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire.</p>

## V. Vibrations des machines tournantes

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissante, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers s'usent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers. Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement [55].

## VI. Défauts des machines tournantes

Le déséquilibre de masse, le frottement du rotor, le désalignement de l'arbre, les défaillances des engrenages et les défauts de palier sont des exemples de défauts pouvant conduire à la panne de la machine [56].

Outre la détection de l'apparition précoce et la gravité d'un défaut, il existe des systèmes qui peuvent également être conçus pour identifier les composants qui se détériorent et estimer l'intervalle de temps pendant lequel l'équipement surveillé peut encore fonctionner avant la défaillance [57]. Ces systèmes mesurent et interprètent en continu des signaux (par exemple, vibration, émission acoustique, thermographie infrarouge, etc.), qui fournissent des informations utiles pour identifier la présence de symptômes défectueux [58].

### VI.1. Balourd

Le balourd (figure 3.13.) est la cause de vibrations la plus commune et la plus fréquemment rencontrée. En dépit du soin apporté à la construction des rotors, il est donc impossible de les équilibrer parfaitement et il existe donc toujours une vibration à la fréquence de rotation dont l'amplitude est directement proportionnelle à l'importance du balourd et au carré de vitesse de rotation. Une modification brusque de l'amplitude correspond systématiquement à une modification du balourd dont l'origine peut-être une rupture ou la déformation d'une partie du rotor (ailettes de turbine par exemple). Si cette modification d'amplitude est plus lente, il peut s'agir d'une usure ou d'un encrassement de la partie tournante (suie, dépôt, etc.). Le phénomène se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation. [48]

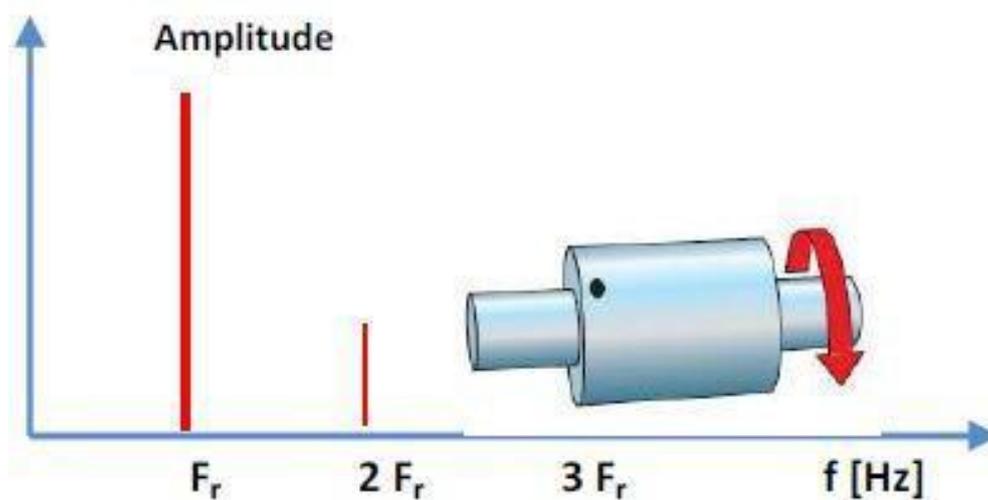
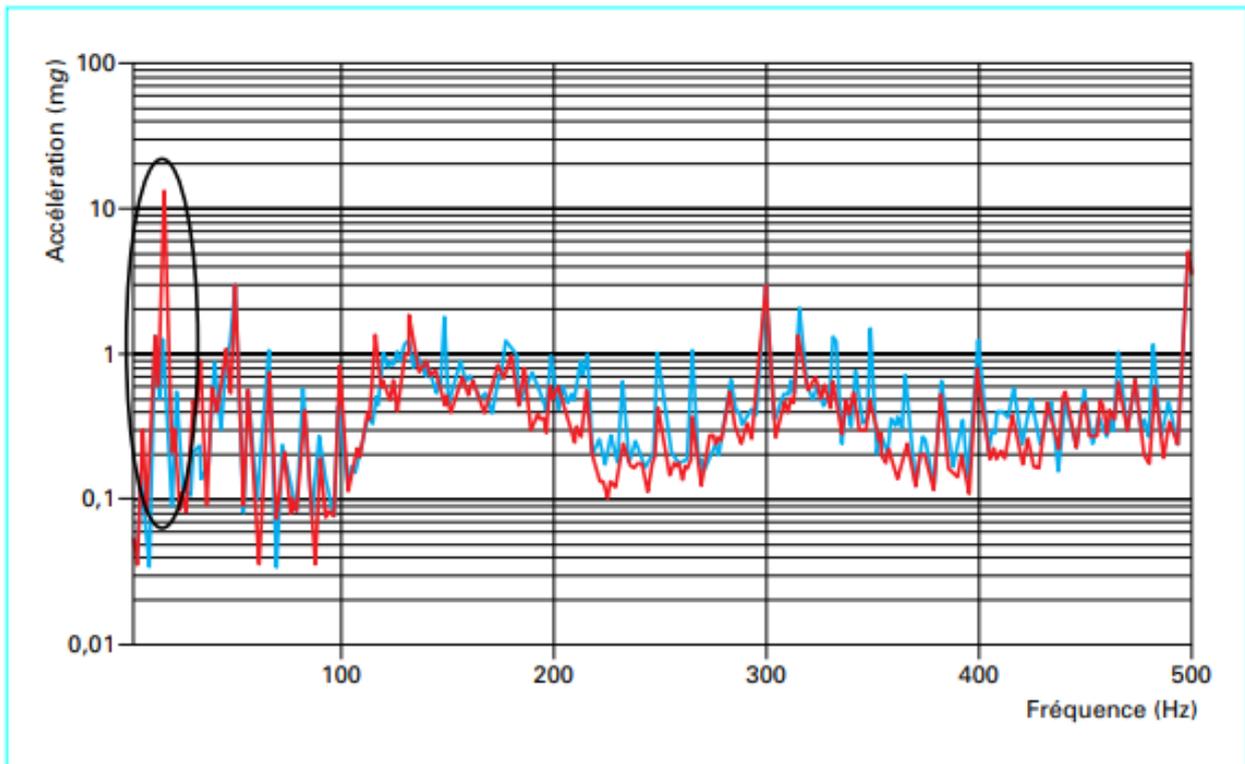


Figure 3.13. Défaut de balourd. [48]

**Exemple :** Mise en évidence d'un défaut de balourd (figure 3.14.).



**Figure 3.14.** Spectres fréquentiels du défaut de balourd.[59]

- Le spectre bleu (machine en bon état de fonctionnement) : amplitude de la fréquence fondamentale 1.323 mg pour 16.25 Hz ;
- Le spectre rouge (machine en fonctionnement dégradé : défaut d'équilibrage) : amplitude de la fréquence fondamentale 14.199 mg pour 16.25 Hz.

Ce défaut n'est pas directionnel, on recueille la même image dans toutes les directions radiales (verticale, horizontale ou oblique).[59]

### VI.2. Le désalignement

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements, il concerne soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. L'arbre moteur et l'arbre récepteur d'une machine ne sont pas parfaitement alignés.

L'objectif du lignage de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèles et confondus. Deux types de défauts de lignage sont donc rencontrés

- a) **Désalignement angulaire** : il se produit quand l'axe de rotation de deux machines à un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

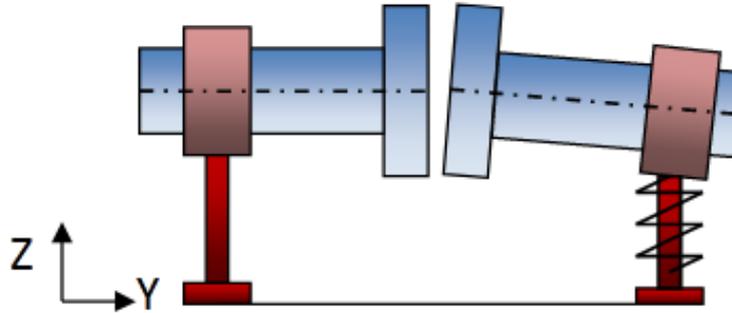


Figure 3.15. Désalignement angulaire [37].

- b) **Désalignement axial** : il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation. Mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre.

Le désalignement axial (parallèle) se caractérise par une vibration radiale élevée [60].

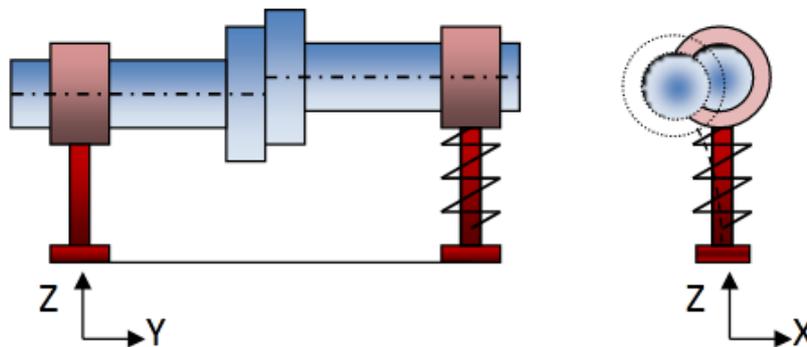


Figure 3.16. Désalignement parallèle [37].

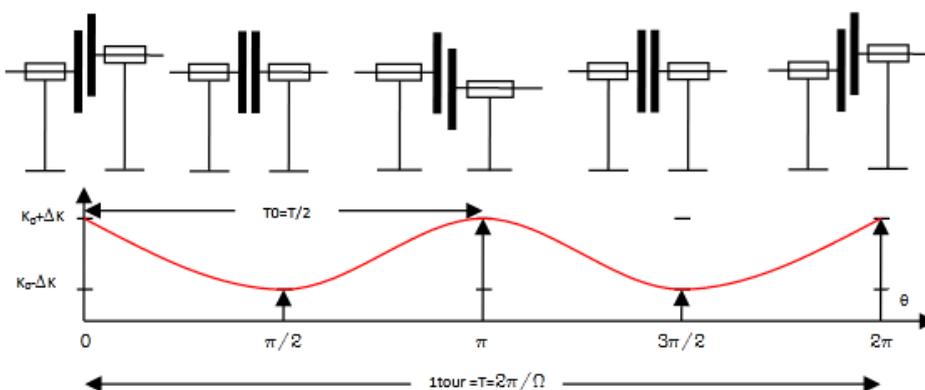


Figure 3.17. Comportement des paliers pour un désalignement parallèle [37].

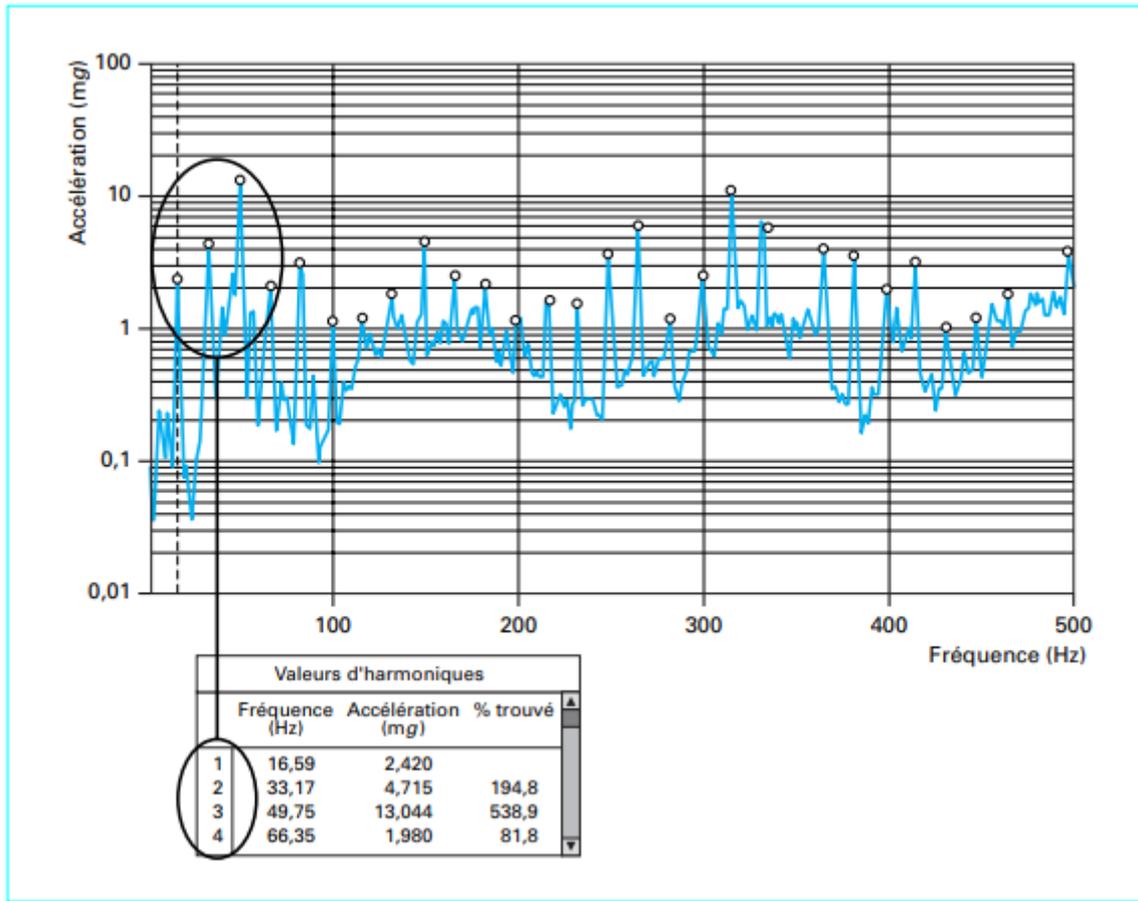


Figure 3.18. Spectre du défaut de délignage.[59]

### VI.3. Les engrenages

Ces défauts sont liés aux dégradations de la denture (denture cassée ou abîmée, usure uniforme ou non, mauvais centrage) (figure 3.19.). On peut observer aussi du fretting (corrosion, frottement) qui se traduit par un enlèvement de métal lorsque l'engrenage est mal lubrifié et que les efforts sont importants.

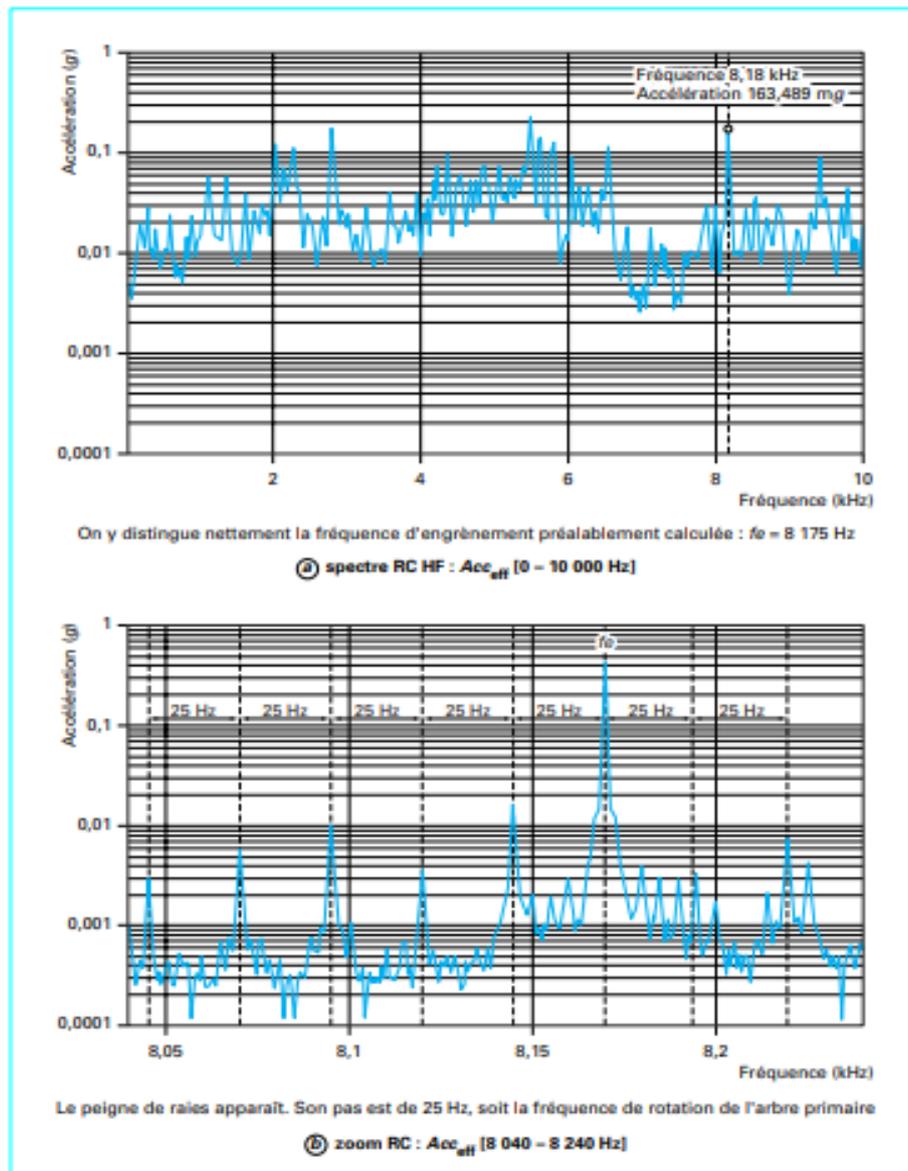


Figure 3.19. Dégradation des dents d'une roue dentée.[62]

Les vibrations des engrenages sont dominées par un effort à chaque contact [53]. Un arbre tournant à une fréquence  $f_r$  sur lequel est monté un pignon ou une roue comptant  $z$  dents sera soumis à  $z$  chocs par tour. La fréquence caractéristique de l'engrènement sera

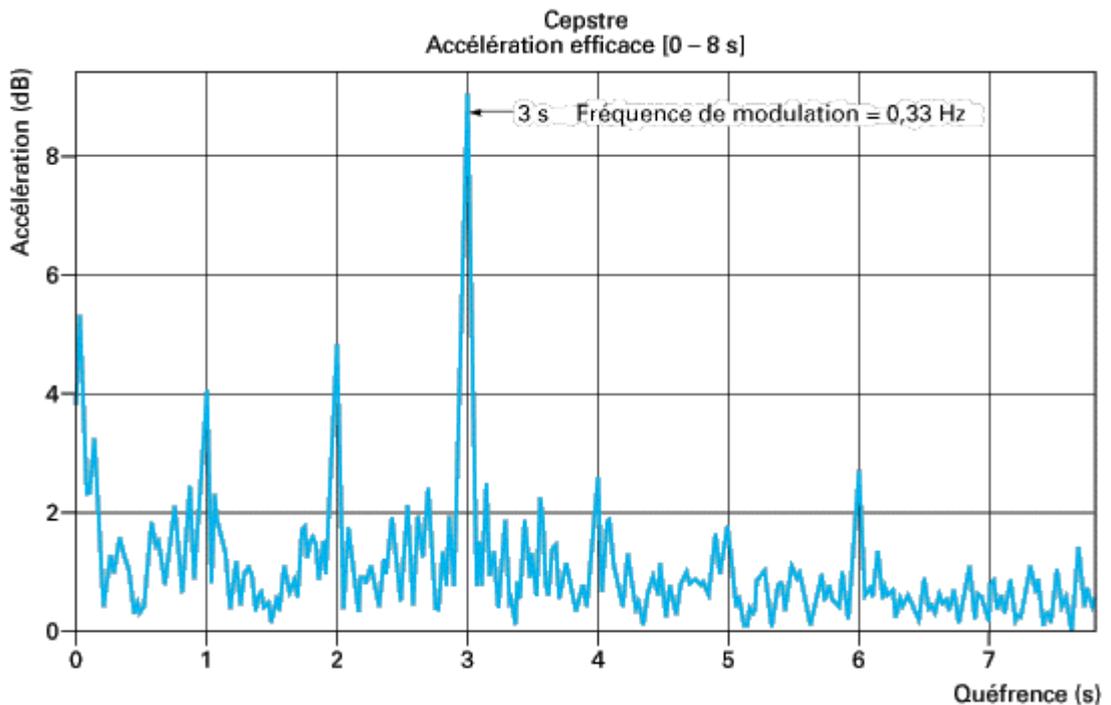
$$f_e = z.f_r$$

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité ou si une dent du pignon présente un défaut localisé, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence du signal. Cela se traduira, sur le spectre, par un peigne de raies centré sur la fréquence d'engrènement  $f_e$  et  $f_r$  de pas. Ce peigne est visible que sur un zoom centré lui aussi sur la fréquence d'engrènement  $f_e$  (figure 3.20.) [63].



**Figure 3.20.** Spectre RC et peigne de raies du défaut d'engrenages [59].

Si une même machine est le siège de plusieurs engrenements, les images caractéristiques de chacun peuvent se superposer de manière à ne plus être reconnaissables. Le seul outil permettant de dissocier les différents phénomènes est le sceptra (figure 3.21.). Il fait apparaître un pic caractéristique pour chaque fréquence de modulation. Cela permet de séparer les phénomènes de chaque ligne d'arbre [61][63].



**Figure 3.21.** Spectre du défaut d'engrenages [59].

### VI.4. Les courroies

Les défauts de courroies sont aussi des problèmes très courants néanmoins il faut distinguer entre problèmes liés à la courroie elle-même et les problèmes liés au désalignement des poulies ou la mauvaise tension de la courroie [37].



**Figure 3.22.** Transmission par courroie [37].

#### VI.4.1. Courroie en mauvais état

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est une usure avec détérioration de la courroie, un choc se produit alors à la fréquence de passage du défaut. La fréquence à laquelle tournent les courroies s'appelle fréquence de passage des courroies et est donnée par :

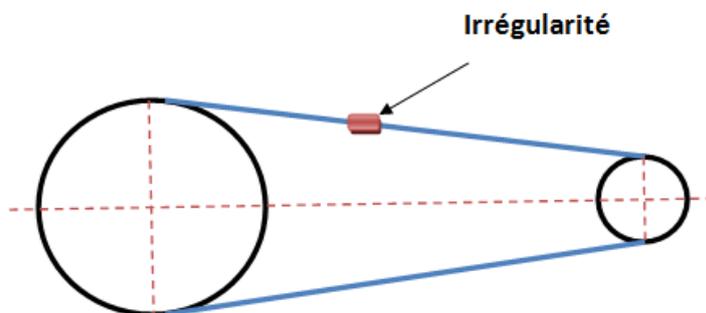
$$f_{pc} = \frac{\pi \times D_1}{L} \times f_1 = \frac{\pi \times D_2}{L} \times f_2.$$

Avec

$D_i$ : Diamètre de la poulie ;

$L$ : Longueur de la courroie ;

$f_i$ : Fréquence de rotation de la poulie de diamètre  $D_1$ .



**Figure 3.23** Défaut de courroie [37].

La longueur de la courroie est déterminée à partir de l'entraxe  $E$  et des diamètres des poulies menant et mené.

$$L = 2 \times E + \frac{1.57}{D_1 + D_2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4E}.$$

Le profil des gorges des poulies n'a aucune importance du moment que le diamètre et la vitesse correspondent à la même poulie.

Lorsqu'une irrégularité apparaît sur une courroie, à cause d'un défaut de fabrication ou d'une usure non homogène, elle passera sur chaque poulie à la fréquence de passage de la courroie.

Chacun des contacts générés sur une poulie provoquera un impact. Ce phénomène se produit donc à une fréquence égale ou double de la fréquence de passage [37].

### **VI.5. Les roulements**

Les paliers sont des composants critiques des machines tournantes et la surveillance de leur état est importante pour éviter les défaillances catastrophiques et réduire les temps d'arrêt des machines [64].

Douze avaries principales peuvent être retenues et proviennent de quatre familles de causes :

Avaries liées à la charge et à la vitesse appliquée : écaillage, grippage, coloration et détérioration des cages.

Avaries liées à la lubrification : grippage, rupture des bagues par contraintes thermiques, coloration, détérioration des cages et écaillage,

Avaries liées au montage : empreintes des corps roulants par déformation plastique, traces de coups, certaines détériorations des cages, corrosion par contact, certains écaillages provenant des défauts d'alignement et de circularité.

Avaries liées à l'environnement : usure, empreintes, corrosion, cratères, cannelures créées par le passage d'un courant électrique.[40]



**Figure 3.24.** Défauts de roulements [40]

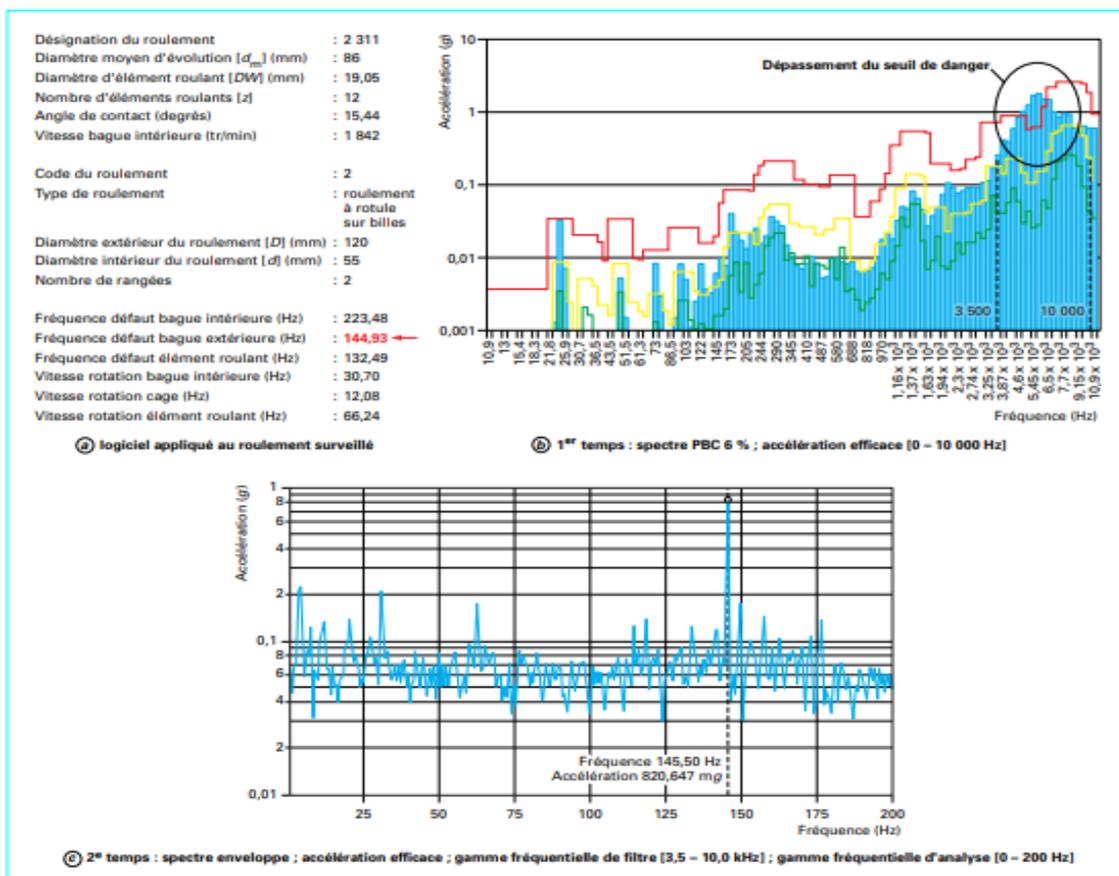
Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage et puis à la ruine du roulement. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Celles-ci correspondent aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut. Elles sont données en écrivant que les vitesses aux points de contact entre billes et bagues sont nulles. Elles dépendent du diamètre des éléments roulants ( $d$ ), du diamètre moyen du roulement ( $D$ ), du nombre d'éléments roulants ( $N$ ), de l'angle de contact ( $\varphi$ ) et de la fréquence de rotation ( $f_r$ ). Elles sont données par les formules.

**Tableau 3.2.** Les fréquences caractéristiques des défauts de roulements [40]

Défaut	Fréquence
Un défaut localisé sur la bague externe	$f_{be} = \frac{N}{2} f_r [1 - \frac{d}{D} \cos\phi]$
Un défaut localisé sur la bague interne	$f_{bi} = \frac{N}{2} f_r [1 + \frac{d}{D} \cos\phi]$
Un défaut localisé sur un élément roulant	$f_{er} = \frac{D}{d} f_r [1 - (\frac{d}{D} \cos\phi)^2]$
Un défaut localisé sur la cage	$f_c = \frac{1}{2} f_r [1 - \frac{d}{D} \cos\phi]$

**Exemple :** Mise en évidence d'un défaut de roulement (figure 3.25.)

Le roulement surveillé présente toutes les caractéristiques d'un écaillage ou d'une fissuration sur la piste externe. Le défaut va ensuite contaminer les autres éléments.



**Figure 3.25.** Mise en évidence d'un défaut de roulement par un spectre PBC et par un spectre d'enveloppe [65].

### VII. Analyse vibratoire

#### V.1. Principe

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par les structures de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sous l'effet d'efforts dynamiques sera fonction de multiples paramètres

- Caractéristiques de fixation de la machine sur le sol qui oppose des réactions aux vibrations et modifie l'intensité ;
- Position et fixation du capteur sur la machine ;
- Caractéristiques du capteur ;
- Pré-amplification et transmission du signal ;
- Vitesse de rotation et puissance absorbée ;
- Etat des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenages, roulements etc.). [66]

#### VII.2. Objectifs de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts ;
- L'analyse détaillée des défauts. On utilise à cet effet des paramètres calculés :
  - Soit dans le domaine temporel ;
  - Soit dans le domaine fréquentiel ;
  - Soit dans les deux à la fois. [67]

#### VII.3. Les avantages

- Détection de défauts à un stade précoce ;

- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi ;
- Autorise une surveillance continue ;
- Permet de surveiller le matériel en fonctionnement ;
- L'équipement à distance.

### VII.4. Les inconvénients

- Spectres parfois difficiles à interpréter ;
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses. [68]

### VII.5. Champs d'application privilégiée

Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc....) Et de sa structure.[69]

### VII.6. Les méthodes d'analyse des vibrations

Il existe de nombreux instruments différents et des méthodes d'analyse vibrationnelle qui détectent et diagnostiquent divers défauts et leurs causes. En général, il peut être divisé en deux parties [46].

#### ❖ Les méthodes temporelles

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut [46].

#### a. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien et il s'écrit sous forme discrétisée

$$V_{efficace}=V_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{N_e}\sum_{n=1}^{N_e}[x(n)]^2}$$

Où  $x(n)$  est le signal temporel mesuré, ne représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal. Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une

alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de fréquences d'analyse liées à la structure même des machines. Les indicateurs crêtes contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête ou le Kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsives telles que les écaillages de roulements.

Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Il est possible de distinguer principalement :

- le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace [46].

$$\text{Facteur crête} = \frac{\text{facteur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup|x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}}$$

Le tableau suivant illustre les natures de vibrations et leurs facteurs de crête.

**Tableau 3.3.** Nature des vibrations et facteur de crête [46].

Nature des vibrations	Facteur de crête	Causes possible
Périodique de type sinusoïdal ou complexe ou de type "bruit de fond".	1.5 à 2.5	Balourd Désalignement.
Aléatoire impulsif	3 à 4	Roulement en bon état.
Périodique impulsif	>4	Roulement écaillé.

➤ **Le Kurtosis**

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement.

Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3 (moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$kurtosis = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2}$$

Où  $M_2$  et  $M_4$  sont les moments statistiques d'ordre 2 et d'ordre 4,  $x(n)$  est le signal temporel,  $\bar{x}$  est la valeur moyenne des amplitudes,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal. Le principal avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du roulement. Le Kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic [46].

### **b. Les méthodes fréquentielles**

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques [46].

#### **1. Le spectre (L'analyse en fréquence)**

L'analyse « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence  $f$ , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques) sur le roulement par exemple permet sa localisation dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

Où :

$X(f)$ : est la transformée de Fourier ;

$t$ : est la variable temps ;

$f$ : est la variable fréquence.

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{K}}$$

Où :

$X(K\Delta f)$ : est la transformée de Fourier discrète rapide ;

$t_e$  : est la période d'échantillonnage du signal temporel ;

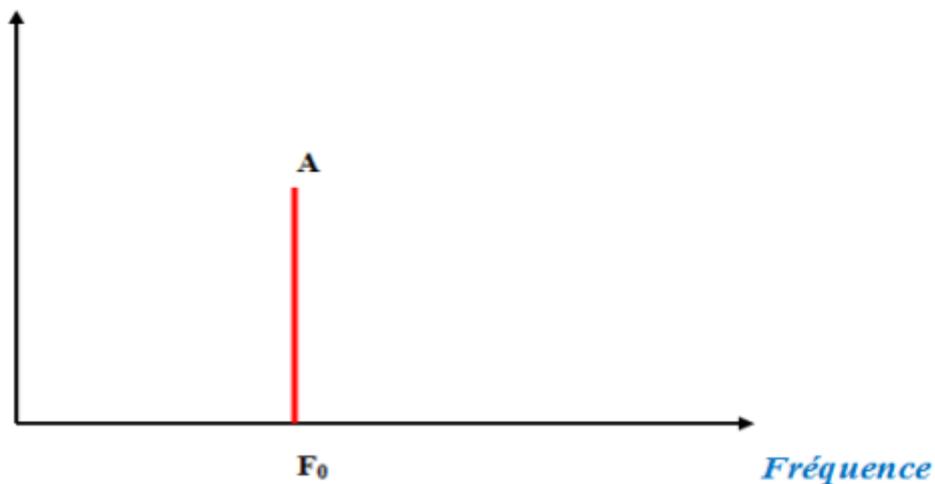
$n$  : est le numéro de l'échantillon ;

$k$  : est le numéro de la ligne fréquentielle ;

$\Delta f$  ; est l'intervalle entre deux raies fréquentielles ;

$N$  ; est le nombre d'échantillons prélevés.

*Amplitude*



**Figure 3.26.** La représentation spectrale d'un signal sinusoïdal [46].

## 2. L'analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure (carters, paliers...etc.) [71]. En effet, pour des défauts tels que les écaillages de roulement, les harmoniques peuvent exciter un mode de résonance de structure.

L'analyse d'enveloppe repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure [39]. En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes

- Déterminer les fréquences de résonance ;
- Filtrer, avec un filtre passe bande, le signal temporel autour des fréquences de résonance ;
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée d'Hilbert ;

- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier.

### 3. Le Cepstre

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier

$$c[s(t)] = TF^{-1} \log |TF[s(t)]|^2$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [39].

### VII.7. Surveillance

En comparant des mesures vibratoires prises à des intervalles de temps définis dans les mêmes conditions opératoires, il est possible de suivre l'évolution des défauts en exploitant les signaux vibratoires. A partir de ces mesures il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état. La norme (ISO10816) fixe les critères d'évaluation des niveaux vibratoires, permettant d'évaluer la gravité des pannes et donc l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur effective de la vitesse vibratoire mesurée dans la bande de fréquence [10-1000 Hz], sachant que la norme d'évaluation dépend de la catégorie dans laquelle se trouve la machine. Mais ces soi-disant "mesures au niveau global" sont encore imprécises et incapables de déterminer la cause de l'augmentation des niveaux de vibration.

#### VII.7.1. Méthode de niveau global

La méthode au niveau global consiste à évaluer le niveau vibratoire d'une machine en mesurant la valeur effective de ces vibrations et en les comparant à des seuils de jugement standard recommandés. Selon la norme AFNOR.E90-30, l'intensité vibratoire est une grandeur qui caractérise de manière simple et globale l'état vibratoire d'une machine. La mesure de niveau total permet une surveillance fiable des machines. Il ne peut pas confirmer le diagnostic. Quasiment tous les phénomènes mécaniques sont chaotiques (balourd, spectre,

engrènement, appuis) à la valeur du déplacement, de la vitesse ou de l'accélération. Ainsi, les mesures au niveau agrégé peuvent donner un avis sur l'état des phénomènes fréquentiels (origine basse fréquence ou haute fréquence).

### VII.7.2. Spectre PBC (pourcentage de bande constant)

La technique de surveillance des installations à chaîne cinématique simple (une seule ligne d'arbre) par comparaison de spectres PBC est une technique fiable et rapide. Elle constitue un bon crible. Par contre, contrairement à la surveillance par spectres RC (résolution constante), elle ne donne que rarement des informations précises sur l'origine des évolutions.

Le spectre PBC se présente sous forme de « bandes » juxtaposées selon une échelle logarithmique de la fréquence. Le rapport « largeur de bande /valeur de fréquence centrale » reste constant. Il est normalement égal à 6, 23 ou 70 %. On représente le PBC sur des échelles logarithmiques en abscisses et ordonnées (figure 3.27.). Le résultat est une image haute résolution aux basses fréquences (BF) afin de bien distinguer les composantes caractéristiques des défauts tels que le balourd, le désalignement, les instabilités des rotors. Dans les hautes fréquences (HF), la résolution est faible mais suffisante pour détecter les défauts de roulements, l'usure des dentures d'engrenage, les problèmes de lubrification... [59]

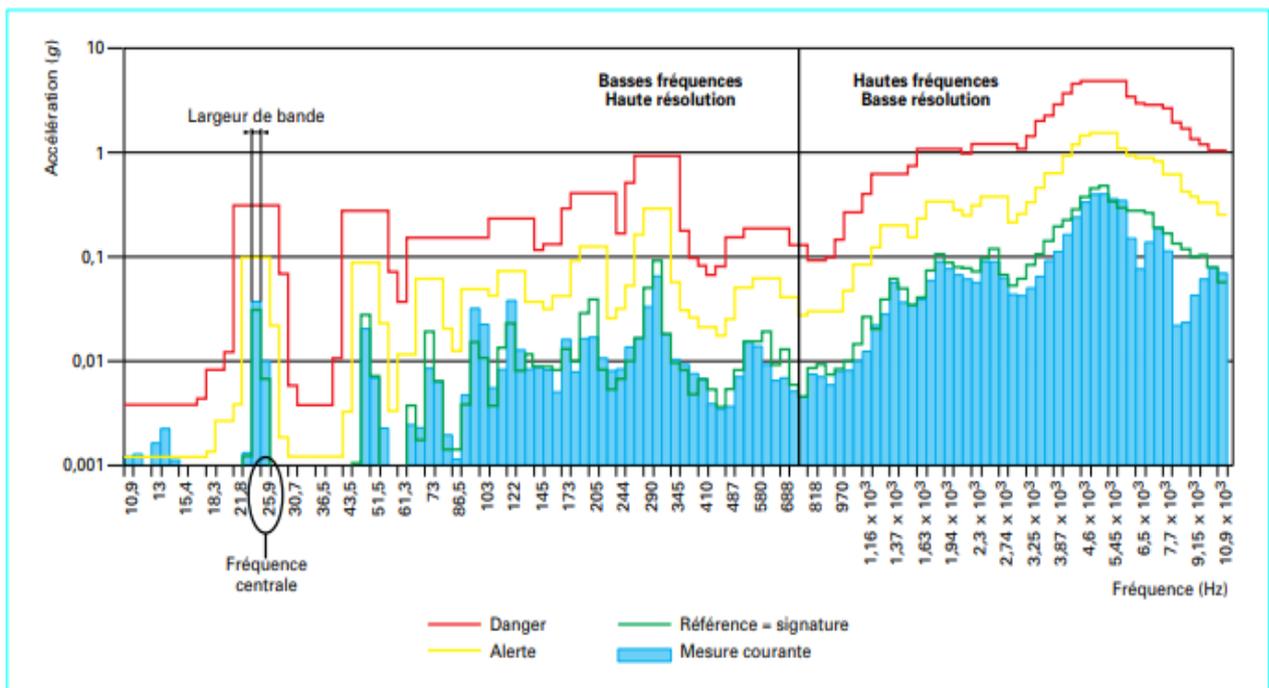
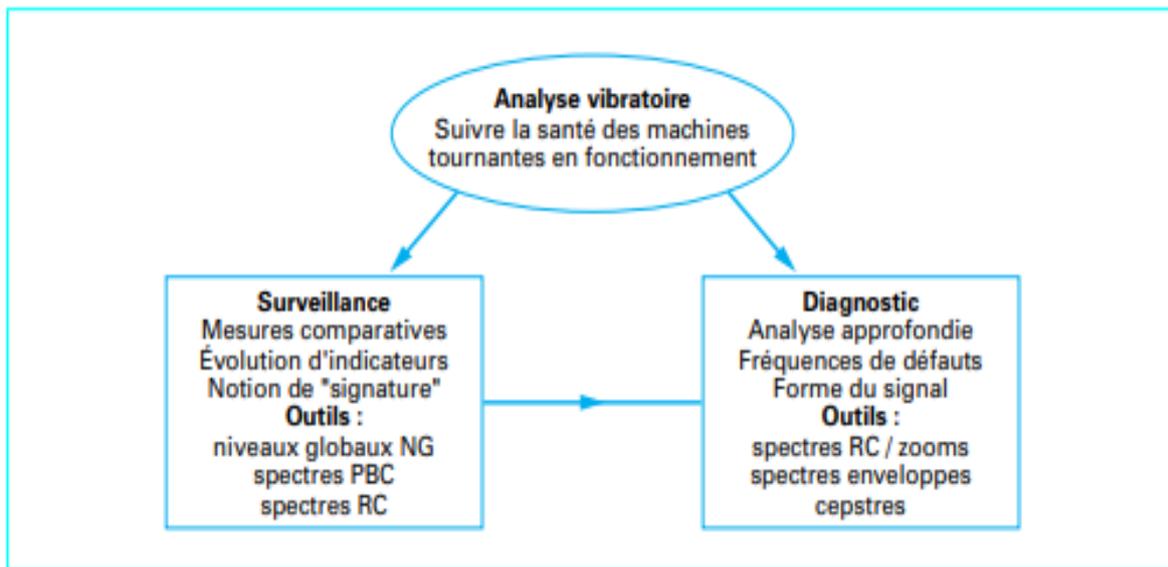


Figure 3.27. Exemple de spectre PBC.[59]

### VII.8. Diagnostic

La création de diagnostics vibratoires nécessite souvent l'utilisation d'outils mathématiques relativement sophistiqués. Ces outils doivent aider l'opérateur et lui permettre de retracer la cause de l'erreur. Cependant, dans l'absolu, les signaux vibratoires ne suffisent pas à poser un diagnostic. Il est donc important de connaître non seulement la cinématique d'une machine, mais aussi les propriétés de ses composants et les différents types de détérioration. La connaissance de ces types de défauts et de leur effet sur les niveaux de vibration est la base d'un diagnostic et d'une surveillance fiable.



**Figure 3.28.** schéma présente, de façon simplifiée, l'analyse vibratoire réalisée à partir de mesures effectuées sur les parties fixes des machines surveillées.[59]

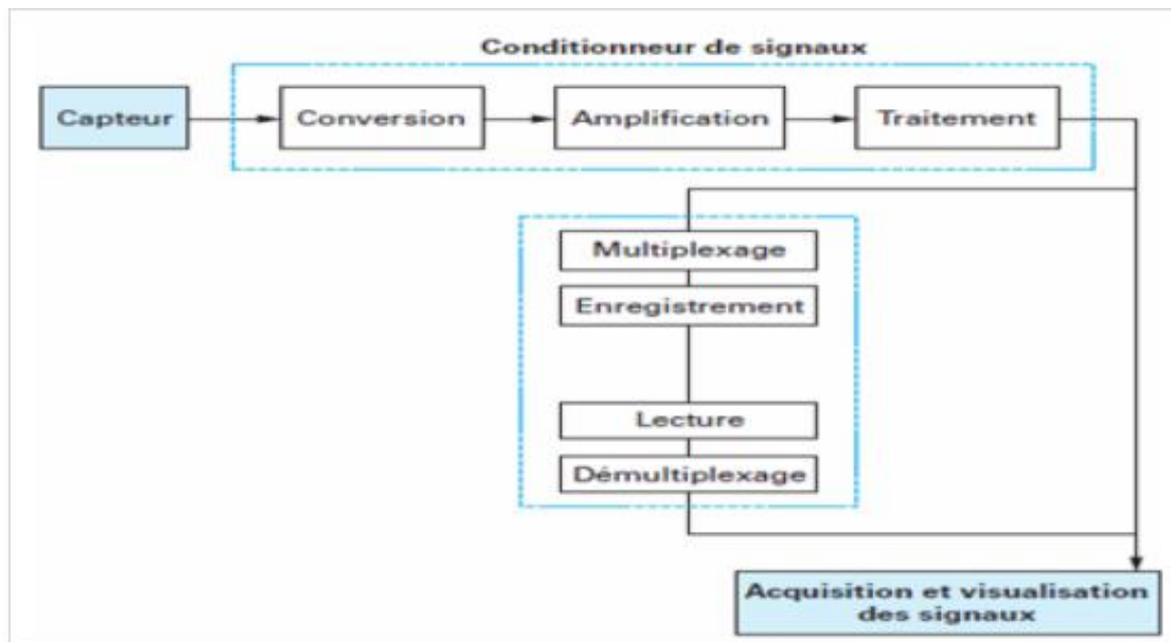
### VII.9. Chaîne de mesure

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

Prenons l'exemple d'une chaîne d'acquisition analogique (figure 3.28.). Le mot analogique veut dire que la loi liant l'information issue du capteur à la grandeur mesurée est continue. Le

signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants

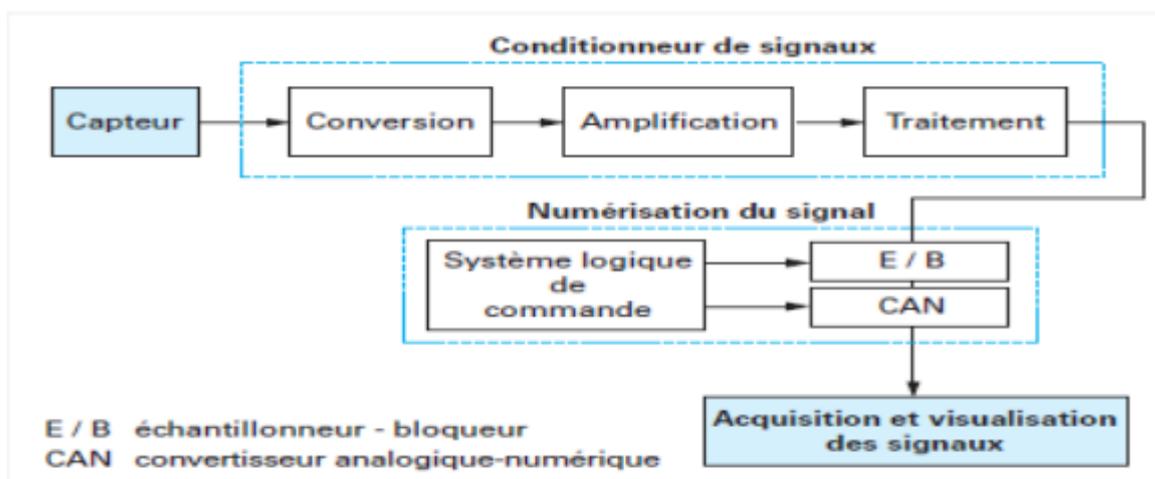
- Le convertisseur de mesure, qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable et qui est en entrée de la plupart des stations d'acquisition modernes ;
- L'amplificateur, qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre en cela moins sensible au bruit de fond ambiant ;
- Un ou plusieurs dispositifs de traitement du signal qui sont dédiés à la chaîne d'acquisition et varient en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur. Ces dispositifs mettent en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation. Dans certains cas, il est possible de trouver, dans la chaîne d'acquisition, un multiplexeur : par exemple, si la station d'acquisition est éloignée du lieu de mesure ou si l'opérateur désire enregistrer un certain nombre de voies sur une bande magnétique. L'opération consiste à faire passer plusieurs signaux par une seule voie.[71]



**Figure 3.29.** La chaîne de mesure analogique [71]

La chaîne de mesure numérique, dont un exemple est donné (figure 3.30.), utilise au départ les mêmes dispositifs que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants

- L'échantillonneur-bloqueur (E/B) a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion.
- Le convertisseur analogique-numérique (CAN) a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur. De la même manière que pour la chaîne analogique, dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'échantillonneur-bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur analogique-numérique. [71]



**Figure 3.30.** La chaîne de mesure numérique [71].

### VII.10. Capteurs de vibration

Les trois grandeurs que l'on est amené à mesurer en technique vibratoire - le déplacement, la vitesse et l'accélération - peuvent être appréhendées par des systèmes très différents les uns des autres. On distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- Déplacement : principe des courants de Foucault ;
- Vitesse : principe électrodynamique ;
- Accélération : principe piézo-électrique.

Ils ont tous les trois le même but : transformer une vibration mécanique en un signal électrique. Comme montré dans la (Figure 3.30.) Les capteurs utilisant ces principes peuvent être actifs ou passifs. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire.[39]

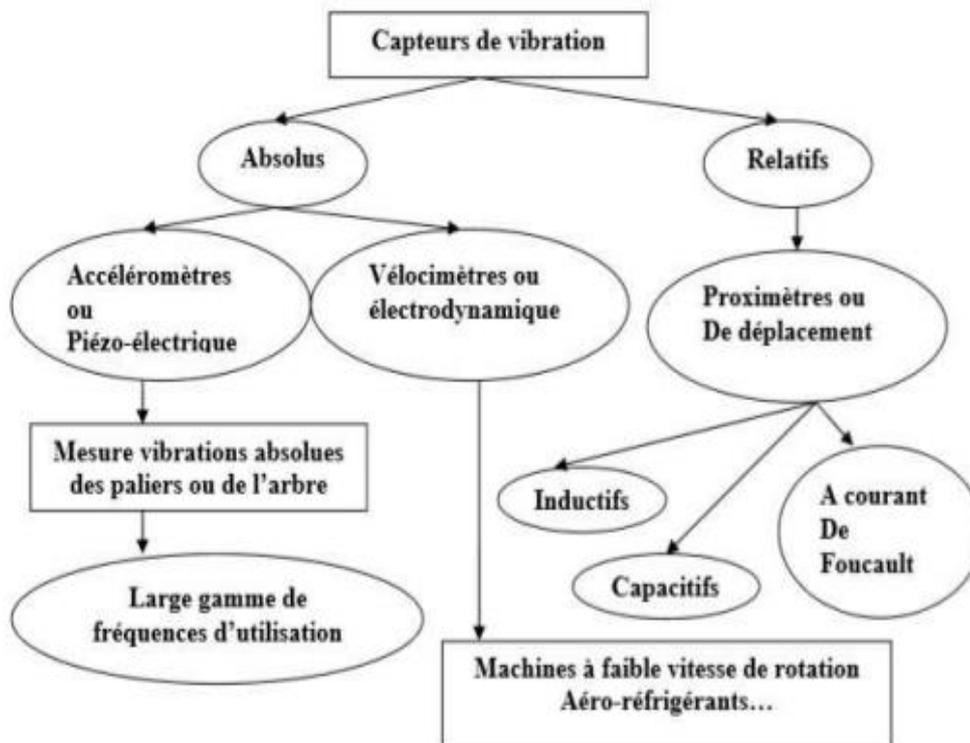


Figure 3.31. Capteurs de vibration.[39]

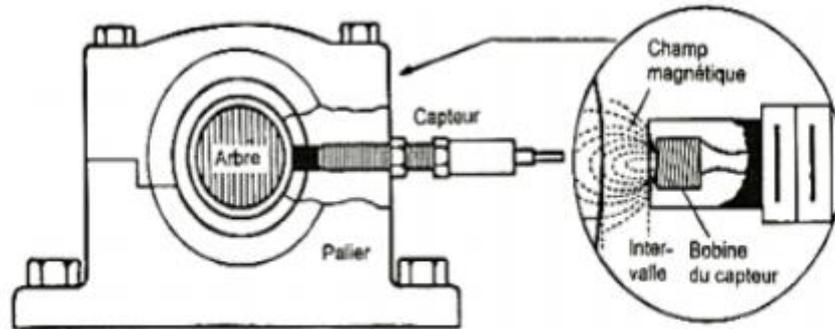
### VII.10.1. Proximètres

Le proximètre (figure 3.32.), ou sonde capteur de déplacement sans contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monte en permanence à l'intérieur du palier, les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz).



Figure 3.32. proximètres et leur driver.[72]

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications ou la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avèrent essentielle.[72]



**Figure 3.33.** Principe du capteur inductif à courants de Foucault [72]

**a. Avantages**

- Mesure directement les mouvements d'arbre ;
- Même capteur pour les butées axiales, les vibrations radiales et la vitesse ;
- Mesure directement le déplacement ;
- Pas de pièce mobile.

**b. Inconvénients**

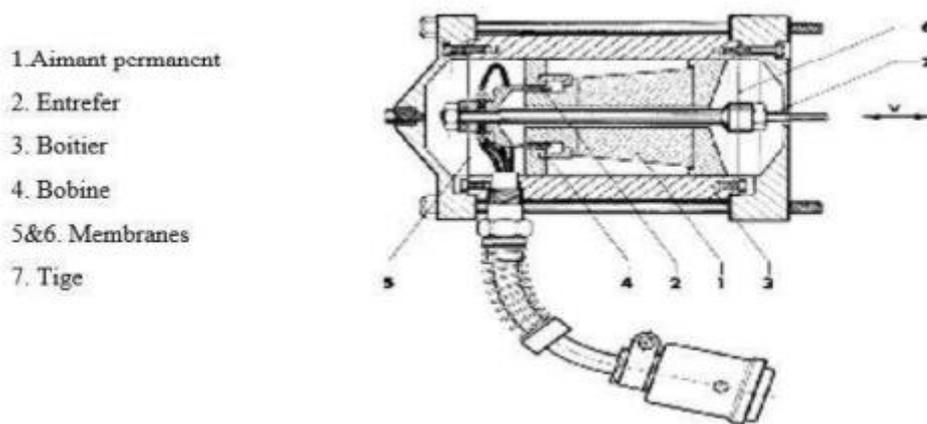
- Sensible au matériau de l'arbre ;
- Installation ;
- Gamme de fréquence limitée. Pas de détection des défauts de roulements ;
- Restriction de températures.[72]

**c. Problèmes et défauts détectés**

- Arbre ;
- Palier lisse ;
- Butée ;
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

### VII.10.2. Vélométrie

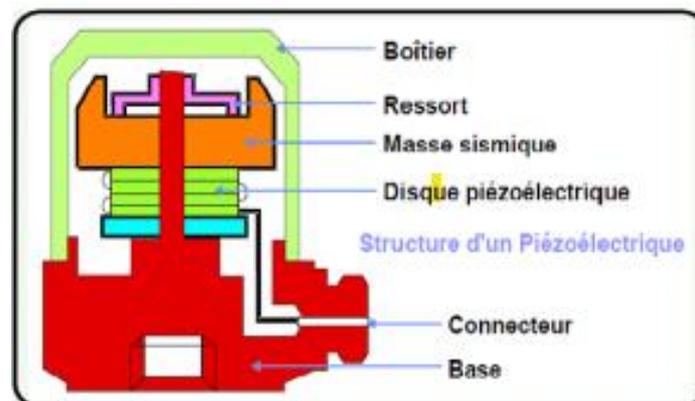
Les capteurs de vitesse ou vélocimètres (Figure 3.34.) sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur.



**Figure 3.34.** schéma de principe d'une vélocimétrie [72]

### VII.10.3. Accéléromètres

Un accéléromètre piézoélectrique (figure 3.35.) est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.



**Figure 3.35.** Schéma de principe d'un accéléromètre [72]

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles ;
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB) ;
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse ;
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.[48]

### a. Les avantages

- Facile à installer ;
- Petit, léger ;
- Supporte les hautes températures ;
- Pas de pièce mobile.

### b. Les inconvénients

- Nécessite une double intégration pour le déplacement ;
- Nécessite une source extérieure ;
- Fournit des informations limitées sur la dynamique d'arbre ;
- Médiocre pour les faibles vitesses.

### c. Problèmes et défauts détectés

- Roulements ;
- Engrenages ;
- Machine à pâles ;
- Machine électrique ;
- Généraux : balourd, désalignement, usure, etc.

### VII.10.4. Choix d'emplacement de capteurs

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile (figures 3.36. et 3.37). Ces efforts sont de deux types

- Efforts tournants Ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;
- Efforts directionnels Ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial). [73]

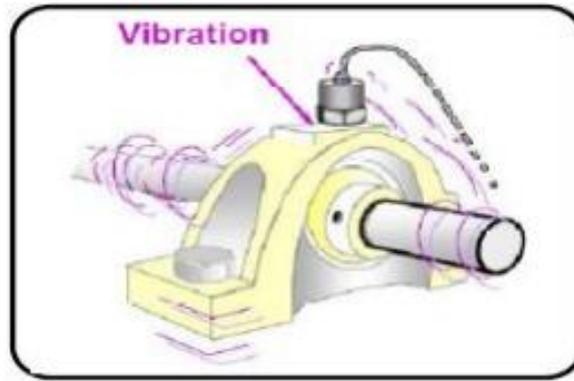


Figure 3.36. Fixation du capteur sur palier.[73]

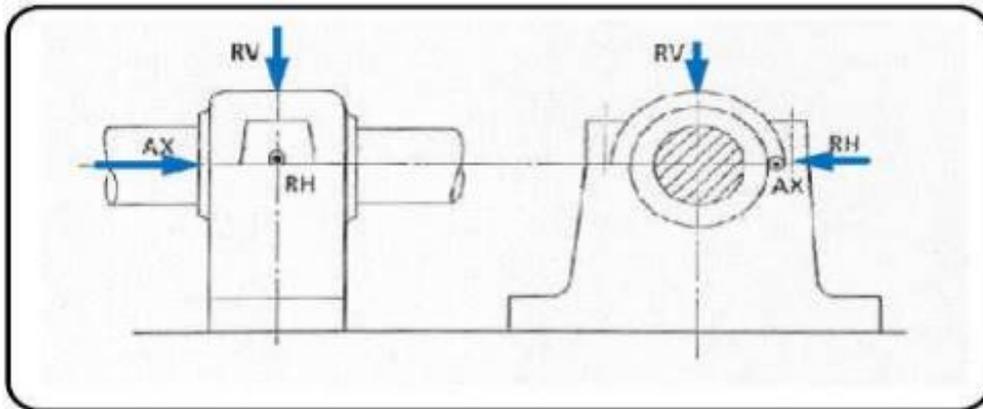


Figure 3.37. Choix directionnel pour la prise de mesure.[73]

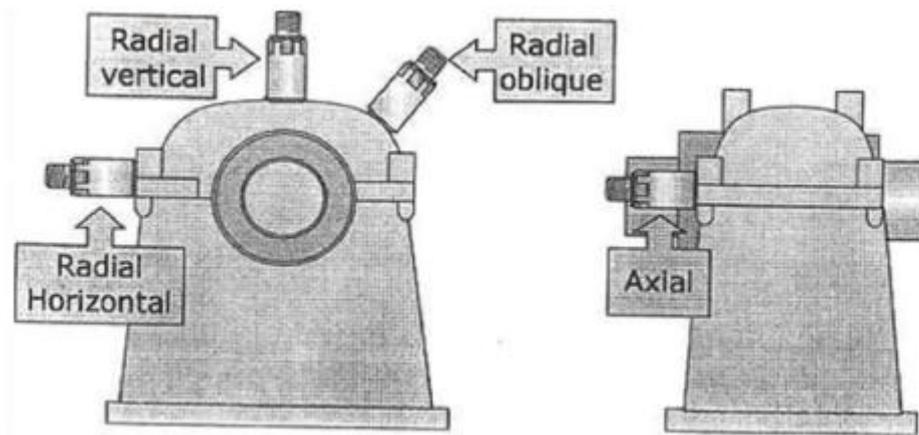


Figure 3.38. Les différents direction des mesures [46].

#### VII.10.4. Les appareils de mesure

Il existe essentiellement deux types de surveillance

- Surveillance en ligne (des capteurs sont installés en permanence sur la machine et connectés au système de surveillance) ;

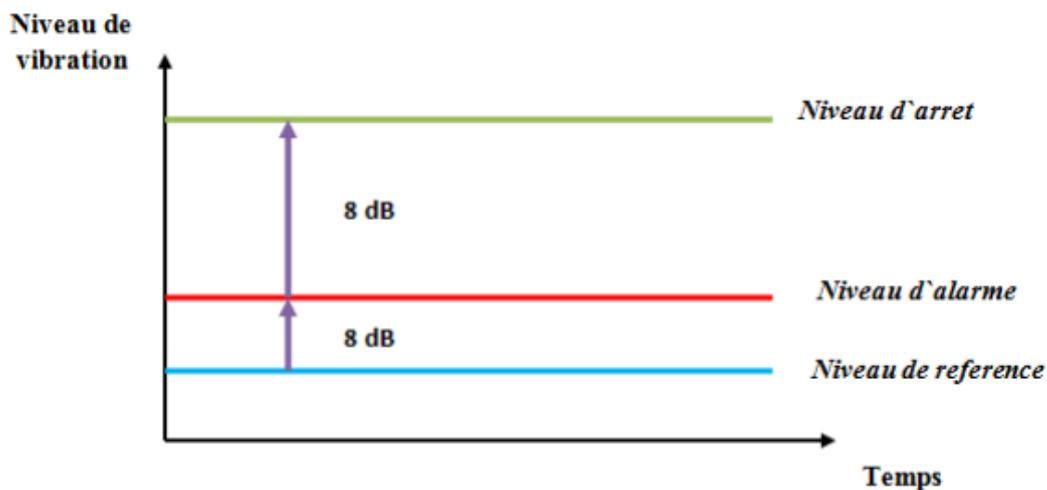
- Surveillance hors ligne (mesures périodiques par des opérateurs équipés de compteurs ou d'enregistreurs de données).

### VII.11. Détermination des seuils

Une mesure de vibrations doit être considérée comme relative. En effet, elle n'a aucune signification lorsqu'elle est isolée. Elle n'est que le résultat des forces émises par les différents éléments de la machine pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulements, film d'huile, film d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, ...etc.). Il faut donc définir des méthodes qui permettront de déterminer des seuils "d'avertissement" et "d'arrêt", avec une bonne probabilité de réussite. Le seuil d'avertissement est également appelé niveau d'alarme.[39]

#### VII.11.1. Méthode du relevé global

Cette méthode consiste à relever les mesures globales sur une machine lorsqu'elle est réputée fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommations, disponibilité, ...). Cet état est dit "de référence". Dans la pratique, le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau de référence. De même, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau d'alarme.



**Figure 3.39.** Détermination des seuils par la méthode du relevé global [46].

Cette méthode pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage [39].

#### VII.11.2. Méthode de l'analyse spectrale

Cette méthode met en œuvre un analyseur en lieu et place d'un vibromètre.

Les seuils d'alarme et d'arrêt sont déterminés selon la même méthode que précédemment, sur le spectre au lieu de la mesure globale.

Cette méthode devra être préférée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très faibles, comme les défauts d'engrènement ou de roulement.

**VII.11.3. Seuils de jugement**

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants

- Bon ;
- Admissible ;
- Encore admissible ;
- Inadmissible.

Ces seuils ne sont qu'une proposition basée sur une statistique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être modifiés à la baisse ou à la hausse (Figure 3.40.).

			<i>Inadmissible</i>	<i>Inadmissible</i>
28.0	<i>Inadmissible</i>	<i>Inadmissible</i>	<i>Encore admissible</i>	<i>Encore admissible</i>
18.0				<i>Encore admissible</i>
11.2			<i>Admissible</i>	
7.10	<i>Encore admissible</i>	<i>Encore Admissible</i>	<i>Admissible</i>	<i>Admissible</i>
4.50	<i>Admissible</i>	<i>Admissible</i>	<i>Admissible</i>	<i>Bon</i>
2.80				
1.12	<i>Admissible</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>
0.71	<i>Bon</i>			
0.45				
0.28	<i>Bon</i>			
Intensité vibratoire $V_{eff}$ [mm/s]	Group K Petites Machine	Group M Machine Moyenne	Group G Grosses Machine	Group T Turbo-générateurs

**Figure 3.40.** Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372 [39].

**VII.12. Dommages causés par des vibrations excessives**

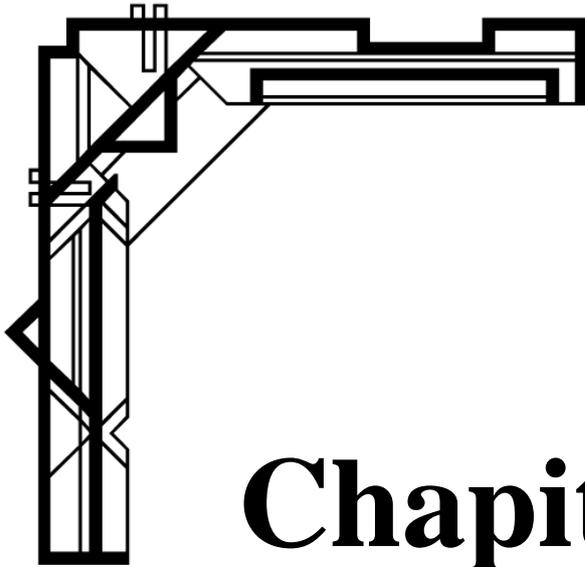
Les vibrations excessives doivent être évitées et rapidement supprimées lorsqu'elles sont détectées parce qu'elles ont pour effet d'accélérer l'usure de l'équipement, qu'elles causent des dommages et qu'elles peuvent provoquer une défaillance et parfois même un accident catastrophique [39]. On peut citer les principaux défauts et leurs fréquences correspondent dans le tableau suivant

**Tableau 3.4.** Défauts et fréquences correspondants [39].

Anomalies	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
<b>Tourbillon d'huile</b>	De 0.42 à 0.48FR	Radiale	Uniquement sur palier lisse hydrodynamique à grande vitesse
<b>Balourd</b>	1*FR	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur deux Mesures orthogonales.
<b>Défaut de fixation</b>	1,2,3,4*FR	Radiale	Aucun déphasage sur deux Mesures orthogonales
<b>Défauts d'alignement</b>	2*FR	Axial et Radiale	Vibration axiale plus Importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire
<b>Vitesse critique de rotation</b>	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime Transitoire Et s'atténue ensuite.
<b>Excitation Hydrodynamique</b>	Fréquence de Passage des Aubes	Axial et Radiale	
<b>Détérioration de Roulement</b>	Haute fréquence	Axial et Radiale	Ondes de chocs dues aux écaillages.

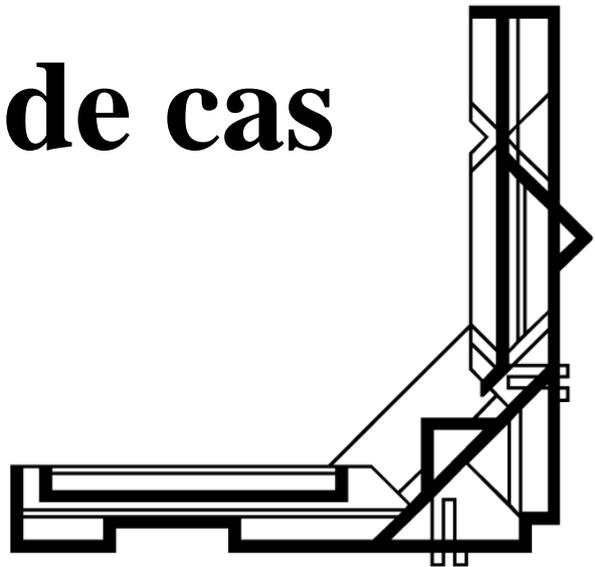
### **VIII. Conclusion**

Ce chapitre s'est penché sur les différents types de vibrations, avec un récapitulatif des composants clés de l'analyse du signal comme la transformée de Fourier. Nous avons examiné les causes profondes des vibrations affectant les composants des machines tournantes, tout en explorant les techniques d'analyse des défauts. Cependant, notre attention est restée principalement sur l'analyse des vibrations, car elle reste l'outil le plus complet pour diagnostiquer l'état des pièces rotatives de la machine.



# Chapitre 4 :

## Etude de cas

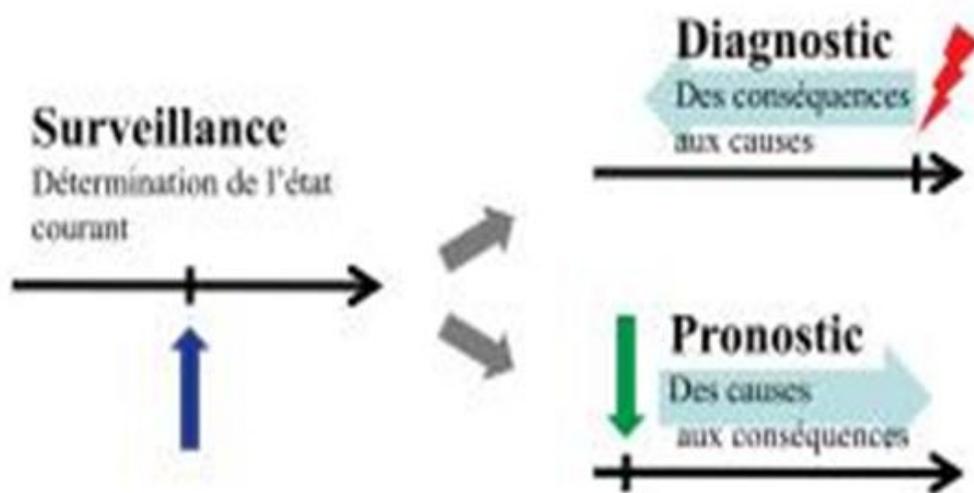


## I. Introduction

La mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle des machines tournantes par analyse vibratoire est maintenant très répandue dans des usines du monde entier vu son efficacité sur le plan détection précoce des défaillances ce qui se reflète sur les coûts de maintenance et le rendement de ces machines.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le domaine de la maintenance prédictive et les vibrations, ce qui facilite aux responsables de prendre les bonnes décisions.

Dans le langage industriel, la maintenance est liée au risque de défaillance d'un produit et consiste à palier à ce risque. Un matériel, aussi bien conçu qu'il soit, n'échappe pas, l'expérience le prouve, à certaines pannes en dehors de celles provoquées par un stockage, une mauvaise utilisation, un acte de sabotage ou un manque de précaution dans la manutention. [74]



**Figure 4.1. Principe d'un diagnostic [75]**

La mise en œuvre du suivi par analyse vibratoire d'une machine de production, permet et facilite la détection ainsi le diagnostic des dysfonctionnements des machines vitales complexes, telles que les moteurs, réducteurs et concasseurs dans la chaîne de production d'une cimenterie, (figure 4.2.).

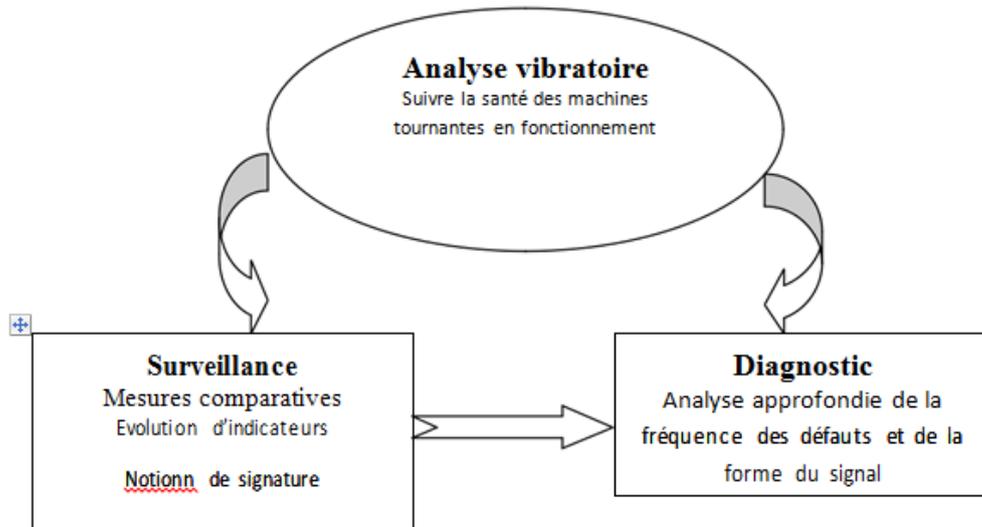


Figure 4.2. Les activités de l'analyse vibratoire [76]

## II. Application de l'analyse vibratoire au concasseur calcaire rotor A1MO1 (cas de la Cimenterie d'Elmalabiod)

Dans notre étude on s'intéresse au concasseur calcaire rotor A1MO1 de la zone crue de la chaîne de fabrication de ciments d'Elmalabiod situé à 35 km de la ville de Tébessa. La surveillance de la machine concerne les composants de commande du concasseur à savoir : Moteur, réducteur et paliers

(Figure 4.3).



Figure 4.3 : Equipements de commande du concasseur

La surveillance des machines ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut, mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un diagnostic approfondi pour le localiser précisément et quantifier sa sévérité. L'analyse vibratoire est une technique qui permet de réaliser ce diagnostic [53].

Pour plus de précision, le diagnostic par analyse vibratoire nécessite d'étudier les valeurs du niveau global des vibrations, les contenus fréquentiels des signaux à l'aide d'outils sophistiqués du traitement de signal (spectre, cepstre, analyse d'enveloppe etc.)[67]

Depuis une dizaine d'années, malgré sa robustesse le concasseur calcaire A1M01 de la chaîne de fabrication ne s'échappe pas aux différents problèmes touchant ses composants de commande comme il a été signalé précédemment à savoir le moteur, le réducteur et les paliers.

Dans le but d'anticiper les défaillances qui peuvent affecter un mécanisme, un système, détecter les défauts à un stade plus ou moins précoce, éviter des arrêts de production coûteux en raison de défaillances imprévues, un diagnostic a été effectué en faisant appel à l'analyse vibratoire (analyse spectrale, mesures des niveaux vibratoires globaux en vitesse et en accélération).

L'application de cette technique de surveillance nous a permis après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance de l'équipement qui représente l'un des maillons constituant la ligne de production du ciment, depuis l'extraction du calcaire jusqu'à l'expédition du ciment.

### **II.1. Suivi vibratoire du concasseur A1M01**

Le concasseur étant composé du moteur électrique, du réducteur et des paliers constituant une chaîne rigide. Un défaut sur un de ces composants influe négativement sur le fonctionnement global de l'équipement. Le diagnostic portera donc sur toute la chaîne synoptique du concasseur (figure 4.4), en particulier les paliers, car ces derniers constituent le chemin de passage principal pour les vibrations.

L'étude est étalée sur une période de 4 ans (2018/2019 et 2022/2023).

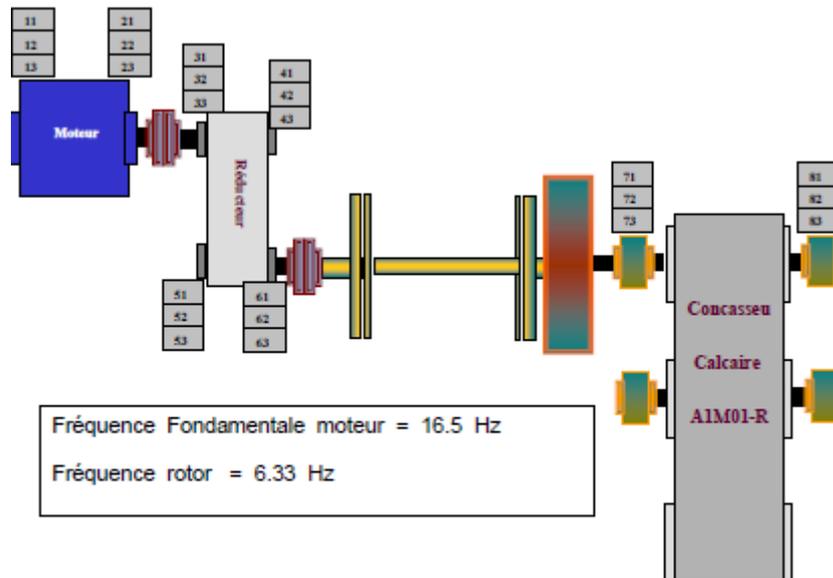


Figure 4.4. Schéma synoptique du concasseur calcaire rotor AIM01

## II.2. Comportement vibratoire de l'équipement

### II.2.1. Points de mesure sur moteur (Analyse en niveau global)

Des mesures vibratoires ont été effectuées et ont fait ressortir les résultats suivants :

Tableau 4.1. Mesures sur moteur (21 /11/2018)

Palier	2AX	2RH	2RV
NG Vit (mm/s)	0.074	0.063	0.100
NG Accel (g)	0.828	1.12	1.58

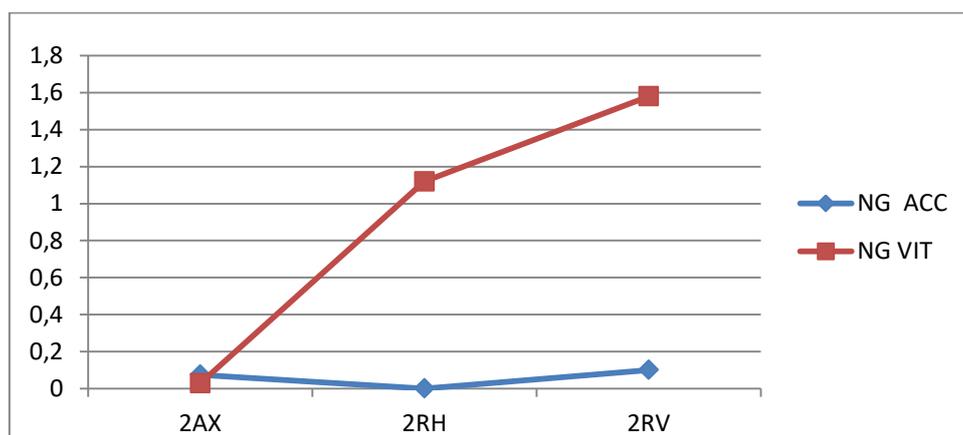


Figure 4.5. Courbe de tendance du NG accélération et vitesse du moteur

Pour plus de précision on passe à l'analyse spectrale

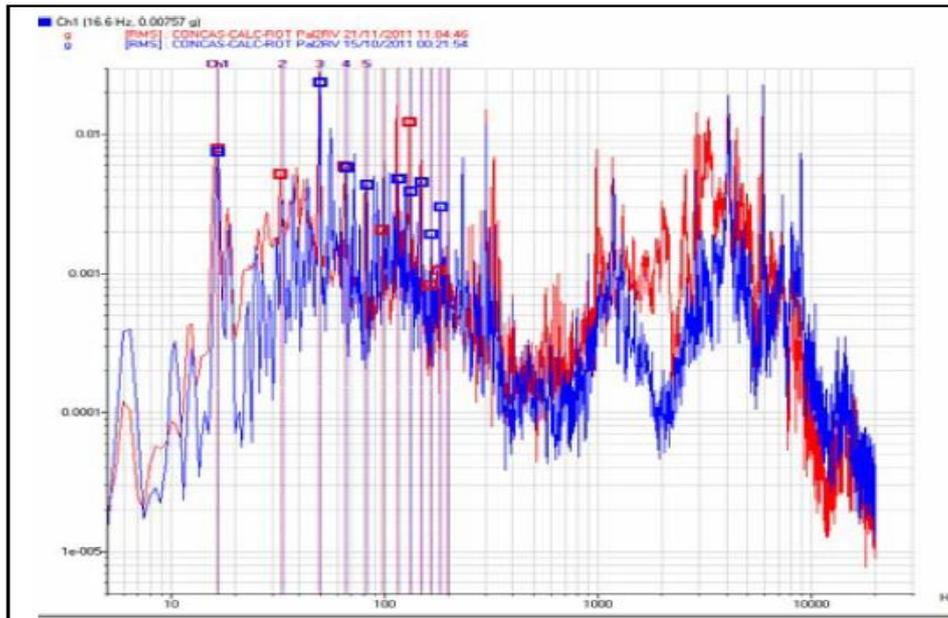


Figure 4.6. Analyse spectrale du moteur

### II.2.2. Points de mesure sur le réducteur

Tableau 4.2. Mesures sur réducteur (21 /11/2018)

Palier	3AX	3RH	3RV
NG Accel (g)	0.297	0.268	0.385
NG Vit (mm/s)	1.40	0.910	0.864
D.E.F	2.35	2.34	2.46

Palier	6AX	6RH	6RV
NG Accel (g)	0.220	0.117	0.242
NG Vit (mm/s)	1.32	0.940	0.945
D.E.F	2.28	2.25	2.81

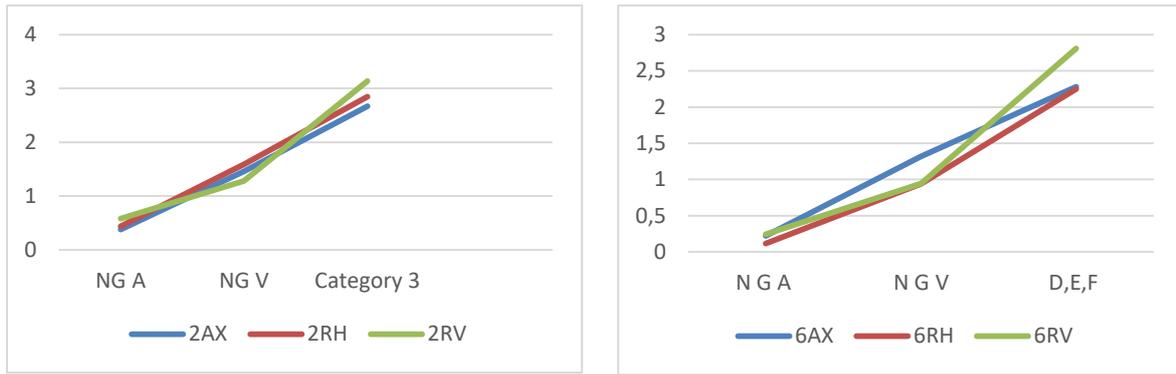


Figure 4.7. Courbes de tendance du NG vitesse à l'entrée et à la sortie réducteur.

### II.2.3. Les paliers du concasseur

Tableau 4.3. Mesures sur paliers du concasseur.

Palier	7AX	7RH	7RV	8AX	8RH
NG Acc	0.576	0.273	0.414	0.265	0.217
NG Vit	2.83	1.34	1.48	3.29	1.19
D.E.F	6.91	5.39	5.82	5.59	5.79

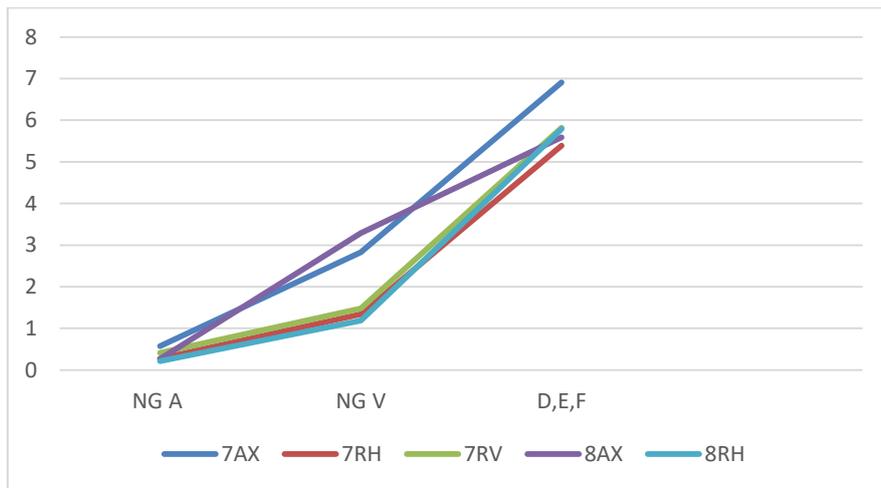


Figure 4.8. Courbe de tendance du NG vitesse en axial des paliers cylindre.

Une deuxième mesure a mis en évidence l'évolution faible des niveaux globaux vitesses en vertical dont le seuil reste acceptable. Pour mieux comprendre le phénomène et avoir plus d'information sur le dysfonctionnement, on est passé à l'analyse spectrale (figure 4.10).

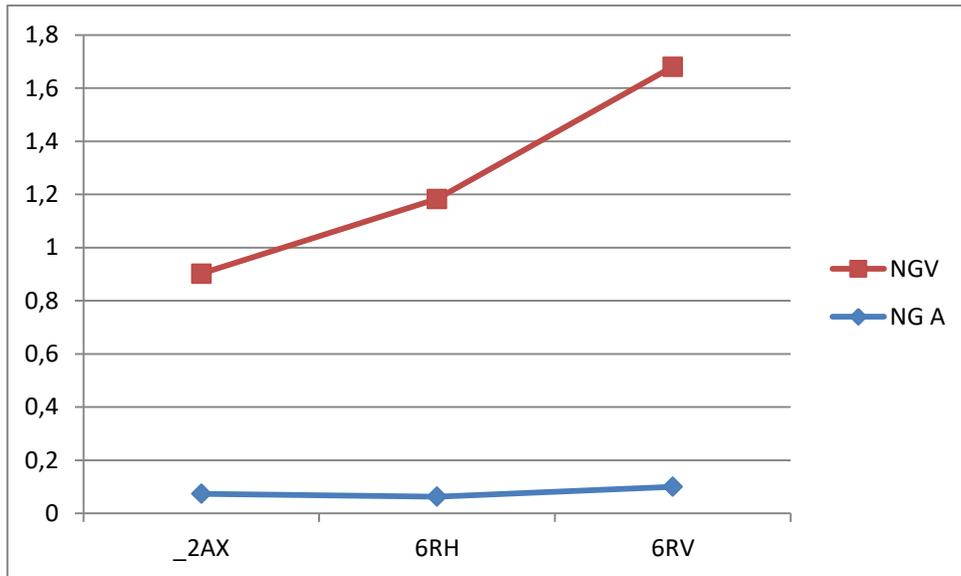


Figure 4.9. Courbe de tendance en niveau global vitesse.

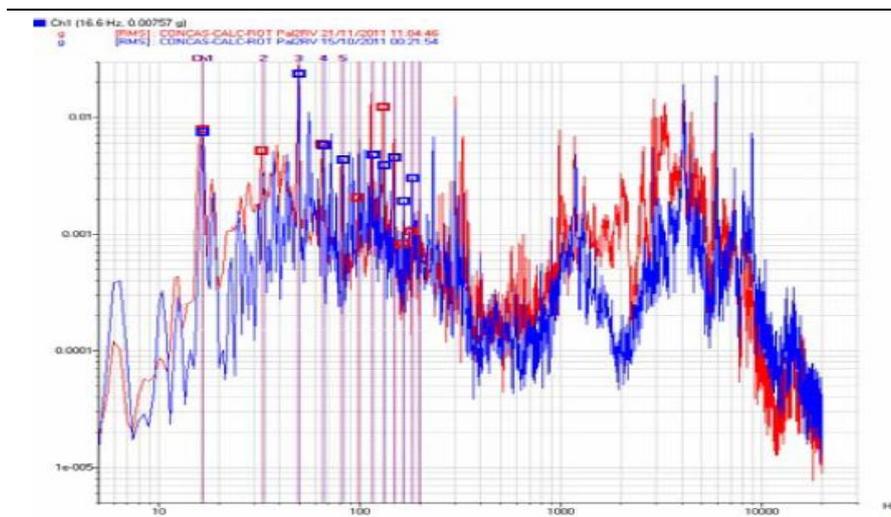


Figure 4.10. Analyse spectrale octobre 2019.

#### II.2.4. Analyse en niveau global du réducteur

Cette analyse a montré des niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse qui sont acceptables ainsi que l'état des roulements.

Pour plus de précision on passe à l'analyse spectrale (figure 4.11)

### II.2.5. Analyse spectrale du réducteur

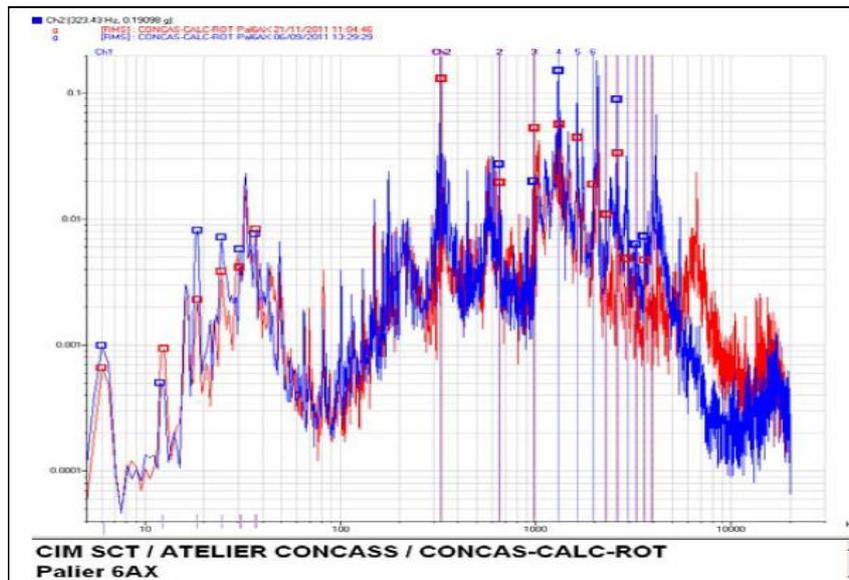


Figure 4.11. Analyse spectrale du réducteur octobre 2019

### II.2.6. Analyse en niveau global des paliers du concasseur

Evolution des niveaux vibratoires globaux relevés sur les paliers du rotor concasseur surtout en axial par rapport à la mesure précédente coté roue d'inertie de 3.98mm/s à 4.79mm/s.

Après le changement de la roue d'inertie+ le manchon du roulement, l'analyse en niveau global a montré l'évolution des niveaux vibratoires globaux relevés sur les paliers du rotor concasseur surtout en axial par rapport à la mesure précédente coté roue d'inertie de 3.98mm/s à 4.79mm/s.

### II.2.7. Analyse spectrale des paliers du concasseur

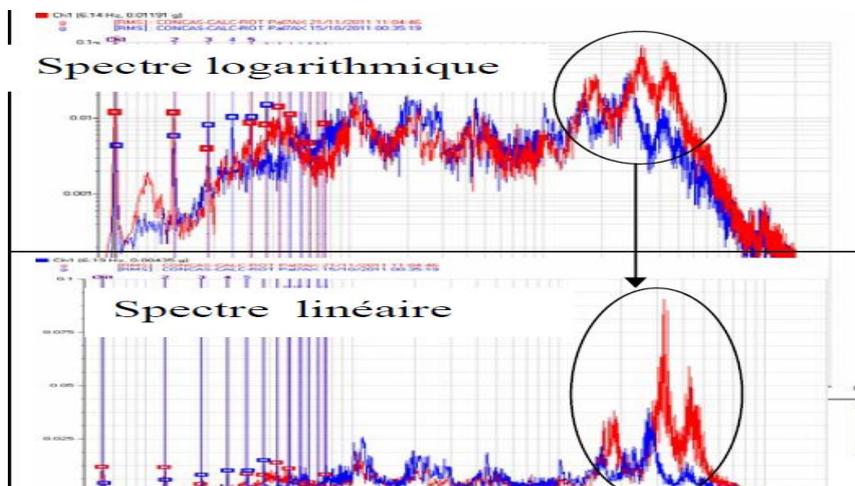


Figure 4.12. Analyse spectrale des paliers du concasseur 2019.

Une deuxième mesure a permis d'obtenir le spectre suivant :

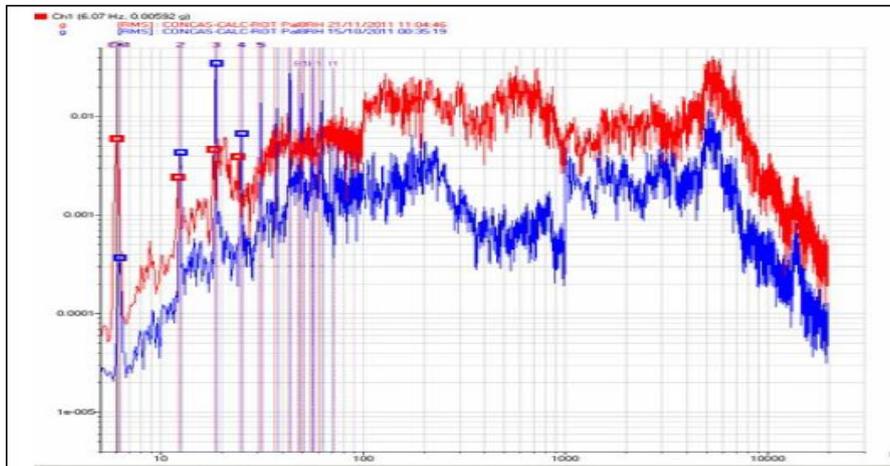


Figure 4.13 : Analyse spectrale novembre 2019.

### II.3. Mesure sur les composants du concasseur 2022

#### II.3.1. Moteur

##### a. Analyse en niveau global

Tableau 4.4. Mesures sur moteur(2022).

Palier	1AX	1RH	1RV	2AX	2RH	2RV
NG Vit	1.52	1.88	2.05	2.93	3.84	4.3
NG Acc	0.296	0.24	0.257	0.248	0.641	0.442
D.E.F	2.38	2.23	2.38	2.31	2.48	2.31

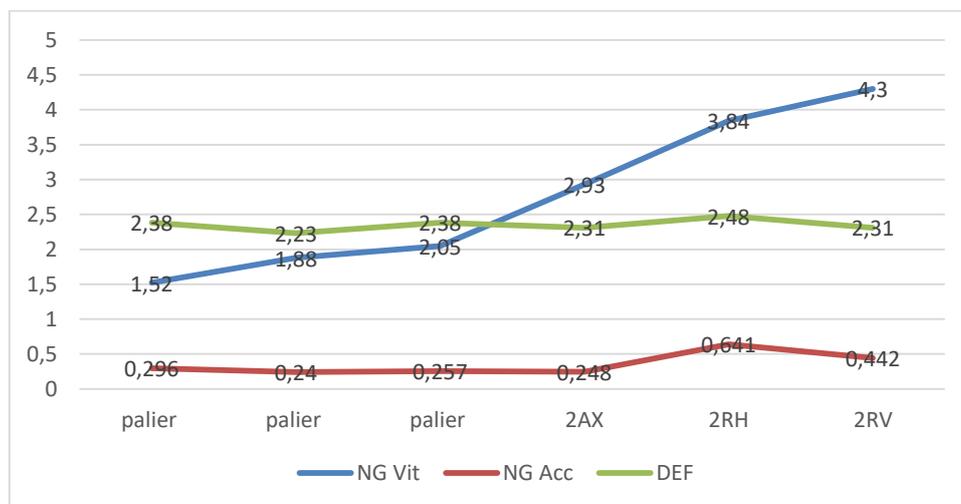
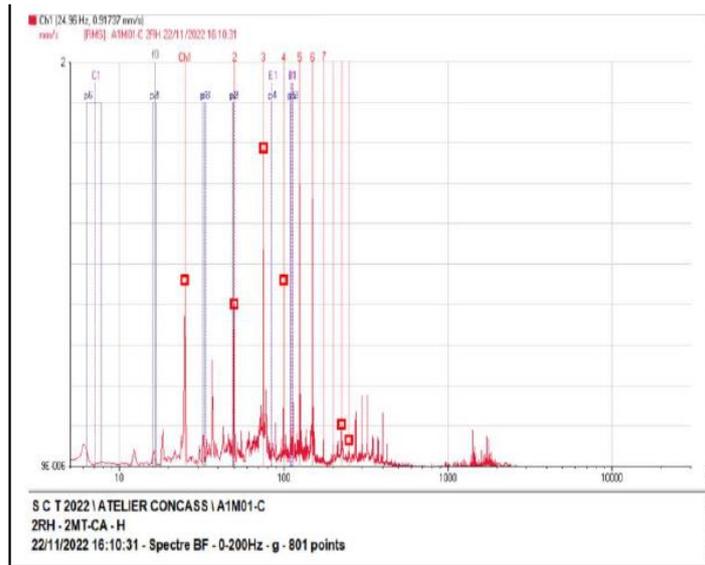


Figure 4.14: Courbe de tendance en niveau global vitesse 2022.

**b. Analyse spectrale**



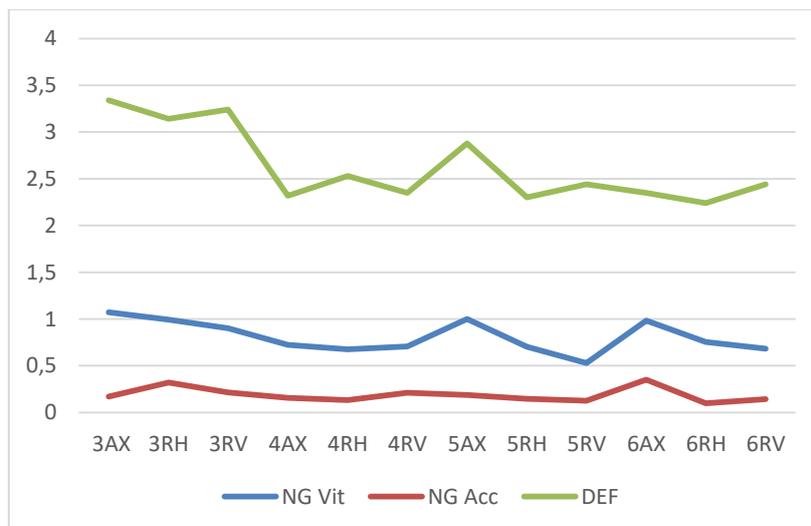
**Figure 4.15. Analyse spectrale moteur 2022.**

**II.3.2. Réducteur**

**a. Analyse en niveau global**

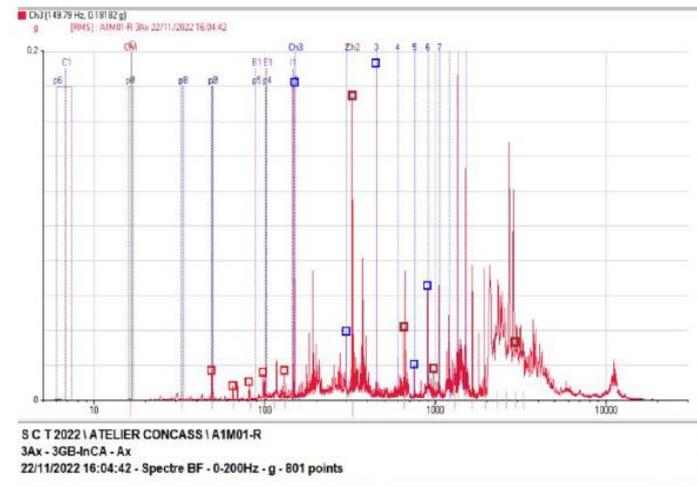
**Tableau 4.5. Mesures sur réducteur(2022).**

Palier	3AX	3RH	3RV	4AX	4RH	4RV	5AX	5RH	5RV	6AX	6RH	6RV
NG Vit	1.07	0.993	0.902	0.722	0.667	0.705	1	0.703	0.53	0.984	0.753	0.682
NG Acc	0.169	0.32	0.213	0.157	0.133	0.212	0.188	0.145	0.127	0.351	0.099	0.141
DEF	3.34	3.14	3.24	2.32	2.53	2.35	2.88	2.3	2.44	2.35	2.24	2.44



**Figure 4.16. Courbe de tendance en niveau global vitesse 2022.**

**b. Analyse spectrale**



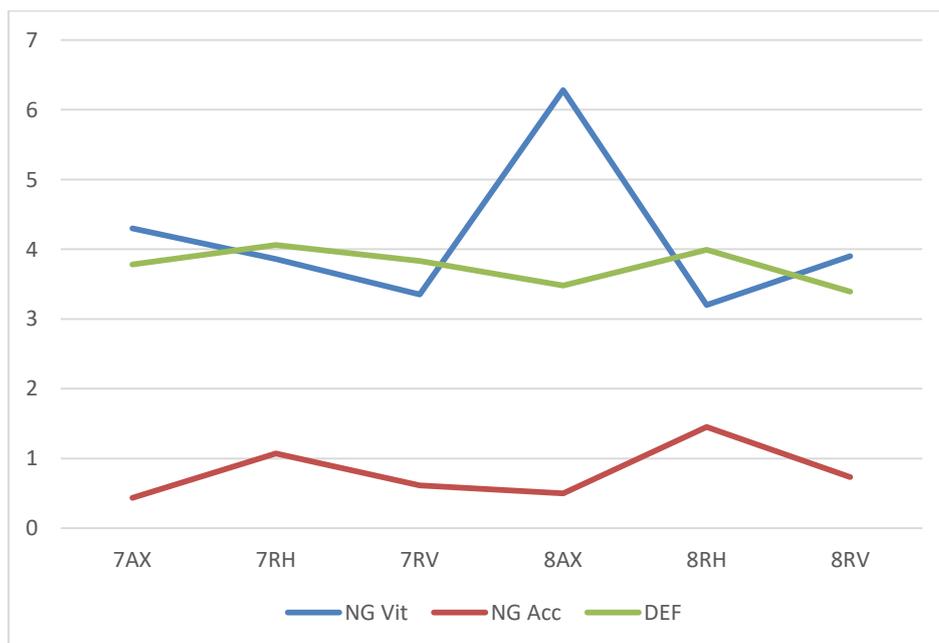
**Figure 4.17. Analyse spectrale réducteur 2022.**

**II.3.3. Les paliers concasseur**

**a. Analyse en niveau global**

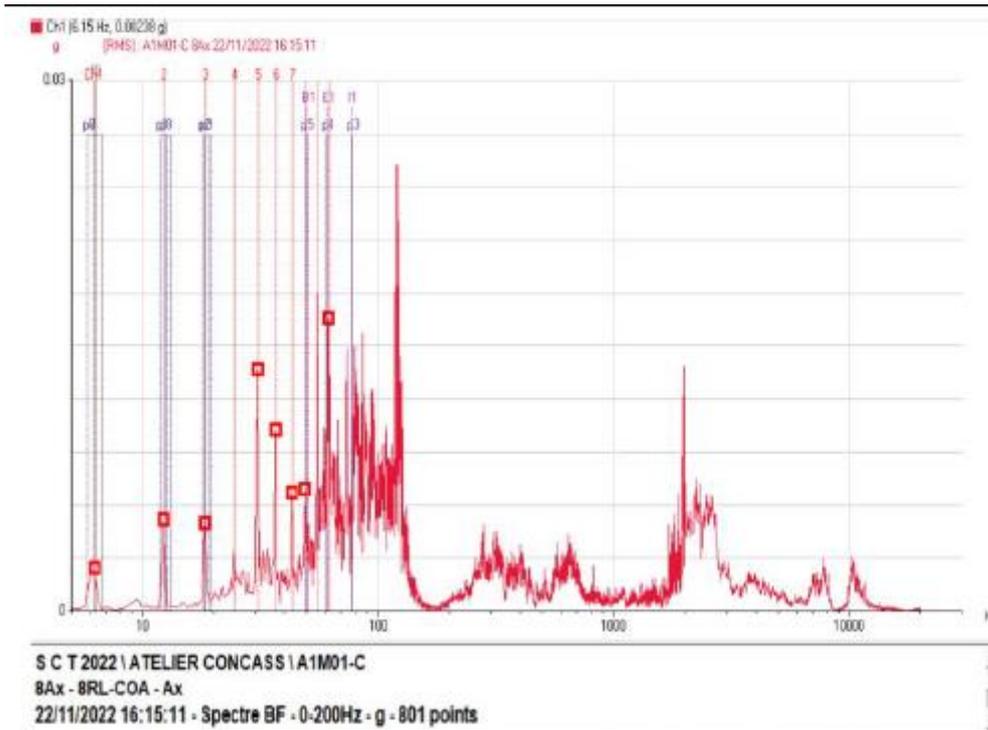
**Tableau 4.6. Mesures sur paliers du concasseur(2022).**

<b>Palier</b>	<b>7AX</b>	<b>7RH</b>	<b>7RV</b>	<b>8AX</b>	<b>8RH</b>	<b>8RV</b>
<b>NG Vit</b>	<b>4.3</b>	<b>3.86</b>	<b>3.35</b>	<b>6.28</b>	<b>3.2</b>	<b>3.9</b>
<b>NG Acc</b>	<b>0.434</b>	<b>1.07</b>	<b>0.614</b>	<b>0.498</b>	<b>1.45</b>	<b>0.732</b>
<b>DEF</b>	<b>3.78</b>	<b>4.06</b>	<b>3.83</b>	<b>3.48</b>	<b>3.99</b>	<b>3.39</b>



**Figure 4.18: Courbe de tendance en niveau global 2022.**

## b. Analyse spectrale



**Figure 4.19. Analyse spectrale paliers concasseur 2022.**

## II.4. Discussion des résultats

Selon la (figure 4.5) on constate une faible évolution des niveaux vibratoires globaux vitesses en vertical des points de mesure du moteur, dont le seuil reste acceptable.

L'analyse spectrale (figure 4.6) nous a permis de constater que l'amplitude est acceptable à la fréquence de rotation du moteur 0.008g à 16.24Hz, une évolution avec de l'énergie suite à l'augmentation de la charge.

L'analyse du deuxième composant du système de commande, qui est le réducteur à l'entrée et à la sortie en analyse globale sont représentées dans la (figure 4.7). Montre une faible atténuation des niveaux vibratoires globaux à l'entrée et à la sortie du réducteur dont le seuil reste acceptable. Etat des roulements acceptables

Pour la courbe de tendance du niveau global vitesse en axial, elle met en valeur une atténuation du NG vitesse en axial sur le palier libre dont le seuil reste tolérable (Atténuation de la charge).

Sur la (figure 4.6) on constate :

- Une amplitude acceptable à la fréquence de rotation du moteur 0.008g à 16.24Hz.
- Une évolution de l'énergie suite à l'augmentation de la charge.

Cette analyse a montré des niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse qui sont acceptables ainsi que l'état des roulements. Une évolution du NG vitesse en vertical à l'entrée du réducteur a été mise en évidence dont le seuil reste acceptable 1.54mm/s (augmentation de la charge de 340T/H à 500T/H) avec l'atténuation des niveaux vibratoires globaux vitesses à la sortie du réducteur dont le seuil est acceptable

L'analyse spectrale du réducteur de l'année 2019 (figure 4.11) a montré des amplitudes acceptables à la fréquence d'engrènement réducteur 0.13g à 325.91Hz.

Le problème réside dans la roue d'inertie à cause de l'évolution de l'énergie suite à l'augmentation de la charge, ce qui a nécessité le changement de la roue d'inertie. Après changement de la roue d'inertie+ manchon du roulement du palier 7,

Selon la (figure 4.12) on constate une évolution des amplitudes de la 1ere et 2eme harmonique de la fréquence de rotation du rotor concasseur par rapport à la dernière mesure de 0.004g/6.19Hz à 0.011g/6.14Hz, avec l'évolution de l'énergie en hautes fréquences qui correspond à l'apparition d'un défaut de roulement du palier coté roue d'inertie et qui nécessite d'autre mesure pour confirmer le défaut. Plus une évolution de l'énergie sur toute la gamme de fréquence suite à l'augmentation de la charge de 340T/H à 500T/H.

Une évolution de l'amplitude de la fréquence de rotation du rotor par rapport à la dernière mesure de 0.0003g/6.26Hz à 0.005g/6.07Hz a été enregistrée.

La dernière mesure représentée par le spectre (figure 4.13) a montré l'évolution de l'énergie sur toute la gamme de fréquence suite à l'augmentation de la charge de 340T/H à 500T/H, avec l'évolution de l'amplitude de la fréquence de rotation du rotor par rapport à la dernière mesure de 0.0003g/6.26Hz à 0.005g/6.07Hz. le résultat de cette étude a poussé au changement de l'arbre du rotor et le suivi du défaut de roulement palier rotor concasseur.

Les mesures en niveau global sur le moteur des années 2022/2023 ont montré que les niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse sur le moteur (figures 4.14,4.15) sont tolérables et que le facteur défaut roulement est acceptable.

L'analyse spectrale (figure 4.17) coté réducteur montre une stabilité au niveau des niveaux globaux vitesse et un facteur défaut roulement stable.

Pour la partie palier concasseur (figure 4.18) les niveaux vibratoires globaux relevés en vitesse sont tolérables et le facteur défaut roulement acceptable.

### III. CONCLUSION

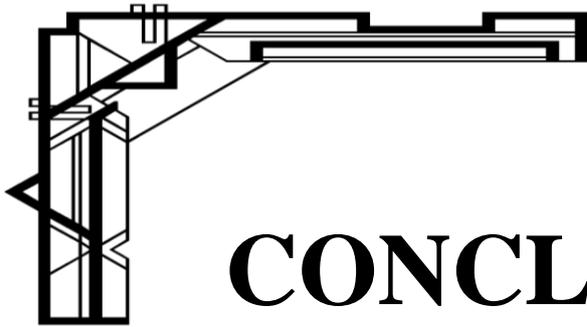
Dans ce chapitre nous avons vu un cas pratique sur les éléments du concasseur A1M01

Grâce à une analyse spectrale, on a déterminé que :

- L'amplitude à la fréquence de rotation du moteur répond aux normes acceptables
- Les amplitudes à la fréquence d'engrènement du réducteur étaient dans des limites acceptables
- La production d'énergie a connu une augmentation en raison de la charge, ce qui a entraîné le remplacement de la roue d'inertie
- Une différence dans l'amplitude de la fréquence de rotation du rotor a été remarquée par rapport à la mesure précédente.
- Les facteurs de défaut de roulement étaient également jugés acceptables

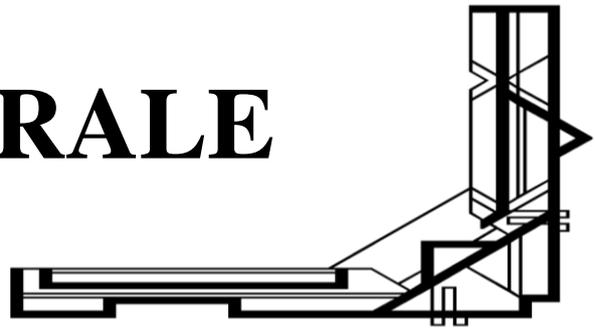
L'analyse vibratoire est une méthode utilisée pour surveiller l'état des machines tournantes.

Si l'augmentation des vibrations de la machine aide à détecter un défaut, l'analyse des caractéristiques de vibration de la machine peut aider à en déterminer la cause. Nous pouvons alors déduire avec précision la latence avant qu'elle ne devienne critique.



**CONCLUSION**

**GENERALE**



A l'issue de ce travail nous concluons les points suivants :

Dans son sens le plus général, la maintenance ne se limite pas aux actions correctives menées sur les équipements, comme la réparation ou le remplacement mais elle vise à s'assurer que les machines sont en permanence aptes à remplir la fonction qu'on attend d'elles, dans de bonnes conditions de sécurité et de rentabilité

Les objectifs fixés et tracés dans notre plan de travail ont été atteints étant donné que nous avons pu détecter le défaut provoqué dans le concasseur en utilisant l'analyse vibratoire.

Il faut dire que l'analyse vibratoire permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement ou un roulement usé ... se traduisant par une variation des efforts internes que subit la machine et conduisent à une modification de son comportement vibratoire.

L'analyse spectrale démontre bien la signature vibratoire typique d'un défaut juste au niveau de la roue d'inertie à cause de l'augmentation de la charge ce qu'il fallait changer avant la rupture.

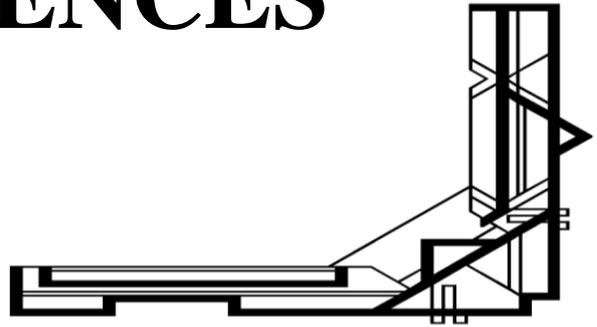
Le bon choix de la méthode de surveillance vibratoire joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic et par conséquent la détection de n'importe quel défaut dans les machines tournantes.

Les résultats trouvés ont fait ressortir des conclusions sur le suivi du comportement des machines tournantes, en particulier les paliers, les roulements et les réducteurs.

Suite aux mesures relevées sur le moteur en utilisant l'analyse en niveau global, il a été constaté que les niveaux globaux relevés en accélération, en vitesse ainsi que le facteur défaut de roulement sont acceptables, cependant l'analyse spectrale, a permis de donner plus d'information sur l'état de santé de l'équipement de commande de notre machine( concasseur calcaire) et la détermination de la cause d'origine du défaut.



# REFERENCES



- [1] Kassas. B , " Application de l'arbre de défaillance « Fault-tree » pour le système du ballon à vapeur au niveau de l'unité Production Ammoniac" Université Badji Mokhtar Annaba,2017
- [2] ANTER LEBIDI, « Développement de la production d'un système électromécanique par une proposition d'une politique de maintenance efficace » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2014
- [3] TOUAMA Elhadj, « Evaluation des performances de la maintenance des systèmes de production » Mémoire de Master en génie électrique, université de M'sila, 2014.
- [4] MAHFOUD BRAHIM, « ANALYSE DE LA FONCTION MAINTENANCE A L'UNITE TSS – SIDER ANNABA » Mémoire de Master en génie mécanique, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016/2017
- [5] Deloux E., Castanier B., and Bérenguer C., Optimisation de la politique de maintenance pour un système à dégradation graduelle stressé, 7ème Congrès international pluridisciplinaire Qualité de Sûreté de Fonctionnement, 20, 21 et 22 mars 2007, volume 1, pages 142–149, Tanger (Maroc), 2007.
- [6] BANOUH. S, BAZIZEN. A/Rahim ,( 2003) « Informatisation des modules de maintenance curative et préventive » ; Cote : « 621N/35 », dirigé par Mr R.LAGGOUNE, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [7] ZARGOU Abdellatif & ZAID Mokhtar « Outil d'aide au diagnostic basé sur l'approche de Raisonnement à partir de cas(PANSOL) »Mémoire de Master en génie industriel , université Université Abou bekr Belkaid – Tlemcen 2015/2016
- [8] Negadi Ali, « la maintenance des Equipements de forage (CAS TP127 HASSI MESSAOUD) » Mémoire de master génie mécanique, université ABDOU BEKR BELKAID-TLEMEN, juin 2014.
- [9] Hafaifa Ahmed, Attia Daoudi and Kouider Laroussi, Application of fuzzy diagnosis in fault detection and isolation to the compression system protection. Control and Intelligent Systems ACTA Press, July 2011, vol. 39, no. 3, pp. 151-158.
- [10] Lung B, Morel G, Leger J.B, Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement, Robotica, vol 21, 2003, pp 313-324.

- [11] Devarun Ghosh, Sandip Roy, Maintenance optimization using probabilistic costbenefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2009; 22(4): 403-407.
- [12] V.A. Kopnov, Optimal degradation processes control by two policies. *Reliability Engineering and Design*, 196(2) pp 219-231 mars 2000.
- [13] AFNOR : « Recueil des normes françaises ».
- [14] CHERIFI, F.& SMAILI, Y, « Application de l'analyse vibratoire à la maintenance préventive Conditionnelle », Mémoire de Master spécialité Électrotechnique, Université A. MIRA de Bejaia (2014).
- [15] Carnero M.C., Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. *Decision Support Systems* 2005; 38(4): 539- 555.
- [16] François Monchy Maintenance, méthodes et organisation. Éditeur Dunod, 2ème édition, Paris, 2003.
- [17] Oustani Mebrouk & Nedjaa Mohammed Mokhtar, « Etude maintenance préventive d'un turbocompresseur par analyse des huiles » Mémoire de master Génie mécanique, Université Kasdi Merbah - Ouargla juin 2014 .
- [18] Douaba .N , Berouba .S,( 2017) " Analyse analytique FMD et AMDEC d'un compresseur à vis- ATLAS COPCO ZE3-" Université kasdi merbah Ouargla .
- [19] Muraru G., Brun-picard D., *Mécanique et industries* 6, 425 – 430, 2005.
- [20] Documentation offerte par la société des ciments de Beni Saf SCIBS
- [21] RANDRIAN JANAHAARY Séraphin : « contribution à l'étude et à la réhabilitation du concasseur à mâchoire » Thème de l'ingénieur au département des mines, Ecole Supérieure Polytechnique ; Université d'ANTANANARIVO ,21 Mai 2010
- [22] Mémoire d'étude et conception appareil de broyage et de classement en vue de la concentration des déchets de société kraomita malagasy-2003-
- [23] KALONJI KALONJI Roger : «CONCEPTION ET SIMULATION NUMERIQUE D'UN ARBRE DU CONCASSEUR DE L'USINE DE CIMENTERIE (Cas de l'usine de beni sasaf) ». Mémoire master Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.

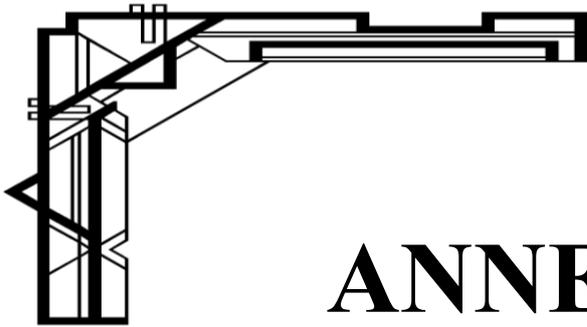
- [24] Baamar Abdelmalek & Skhara Riadh « Concasseurs et broyeurs : Types et maintenance » Mémoire master UNIVERSITE Mohamed Boudiaf , M'sila 2019 / 2020
- [25] LEFKIR ZINE EDDINE & SELMI AHMED SABER : « Automatisation d'un concasseur minéral de fer par l'automate programmable SIMATIC S7-400 ». Thème de l'ingénieur au département d'Electrotechnique, spécialité : Automatique. Université FERHAT ABBAS SETIF 2009 ;
- [26] SELFRAG, « SELFRAG révolutionne le traitement des scories des usines d'incinération d'ordures ménagères. » 2014. [En ligne]. Available : <http://www.selfrag.com/pdf/pressrelease/1214/selfragpressRelease-FR-1214.pdf>
- [27] <http://www.planete-tp.com/le-concassage-a270.html>
- [28] N° 4/ 4ème trimestre 1999- ISSN (société de l'industrie minérale) Les techniques de l'industrie minérale. Concassage. (1999). N ; 622/29.4
- [29] De DIEMAR (R.B.): New concepts in jaw crusher technology. Min. Eng., vol 3, no1/2, pp. 67-74 (1990).
- [30] SEBAA HOUSSEM & HOUACINE MHAMMED « Etude de l'influence du mode de concassage sur les caractéristiques de fabrication des granulats naturels » Mémoire master UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA – BEJAIA 2014/2015.
- [31] P. Gireesh, K. Kolluru, V. L. Subramaniam, S. Moses, S. Neelima, and S. D. Editors, “Lecture Notes in Civil Engineering Recent Advances in Civil Engineering Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Technologies and Advancements in Civil Engineering (ScTACE 2021).” [Online]. Available: <https://link.springer.com/bookseries/15087>
- [32] Cour de préparation mécanique des roches (3ème année mine et géologie) ; Mr Akim. A .2016.
- [33] Lafarge, Centre de viviers, service formation EdSE, connaissances cimenteries ; concassage. 2016
- [34] DJEZAIRI Omar, Promotion : juin 2008, L'influence du mode de concassage sur les caractéristiques de fabrication des granulats. Département de Génie Minier, école nationale polytechnique/2008
- [35] [https://www.azprocede.fr/cours.GC/fragmentation\\_installation.html](https://www.azprocede.fr/cours.GC/fragmentation_installation.html).

- [36] FLSMIDTH, (Concasseur à marteaux EV avec cylindre d'admission. Montage, utilisation VIGERSLEV ALLÉ et entretien), instruction manuel 70000193-4 77 - 2500 VALBY – DANEMARK. 2002.
- [37] M. M. Ghozlane, “Techniques de Surveillance des machines tournantes,” 2015.
- [38] S. Belhamdi, “Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques De Comande.” Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [39] T. BENSANA, “Diagnostique des défaillances basé sur l’analyse vibratoire d’une turbine à vapeur.” Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2008.
- [40] Debbah.Y.(s.d) « Mécanique de vibration » (cours) .Université les frères Mentouri Constantine.
- [41] BOUMAILA AHMED DHIA EDDINE « Diagnostic des défauts d’un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l’unité SIDER TSS » [Mémoire master] Université Badji Mokhtar Annaba 2017/2018.
- [42] H. Benmohamed and Y. KHADRI, “Étude de l’usure des engrenages par analyse vibratoire,” 2010.
- [43] Formation du Bruel & kjaer « vibration générale ».
- [44] KHELFA.A et GUENOUCHE.D (2007) Faculté des hydrocarbures et de la chimie , département : Transport et Equipement des Hydrocarbures , En vue de l’obtention du diplôme d’ingénieur d’Etat en mécanique des chantiers pétroliers Boumerdès
- [45] M. MAFART, Les opérations unitaires du génie industriel alimentaire, Tome 2 : techniques séparatives (2e éd.).
- [46] D. Youcef, “Surveillance et diagnostic des défauts d’une machine électrique par l’analyse vibratoire.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2017.
- [47] Markeset, T. & Kumar, U. (2001). R&M and Risk-Analysis Tools In Product Design, to Reduce Life-Cycle Cost and Improve Attractiveness. Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Philadelphia, P.A., USA.
- [48] Landolsi Foued, « Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines Par Analyse Vibratoire ».

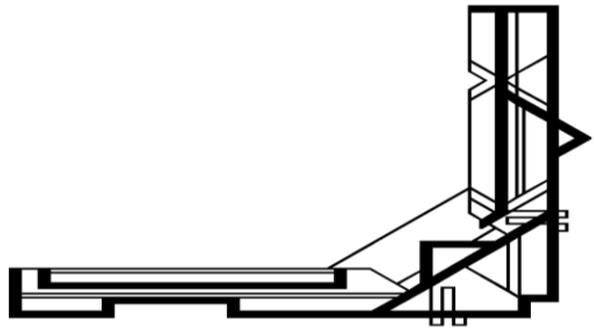
- [49] Kaplan. H, « Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment »Second edition, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999.
- [50] Lavodrama S, et Abdelhadi L, PFE : « Contrôle des machines tournantes », Université Sidi Mohamed Ben Abdallah de FES (Maroc) ,2006.
- [51] Maintenance (2001 juin) Récupéré sur Ingexpert ; [www.ingexpert.com/maintexpert/php\\_theorie\\_maintenance\\_definitons.php](http://www.ingexpert.com/maintexpert/php_theorie_maintenance_definitons.php).
- [52] Héng Jean, « Pratique de la maintenance préventive ». Edition Dunod 2002.
- [53] Chevalier R., « Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM, 2001.
- [54] Chapelot M. (EMS) et Richard A., consultants au CETIM « surveillance des machines tournantes », guide d'achat Mesures N° 757, septembre 2003.
- [55] Bolaers F., Dron J.P., Rasolofondraibe L. "Prédiction et suivi de l'évolution d'un 134 écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire". XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, référence 649, 2003.
- [56] R.O. Saied, M.S. Mostafa, and H.A. Hussein, "Predictive Maintenance Program Based on Vibration Monitoring" Design and Modeling of Mechanical Systems,II- Springer, pp. 651-660, 2015.
- [57] B. Samanta, K. Al-Balushi, and S. Al-Araimi, "Bearing fault detection using artificial neural networks and genetic algorithm", EURASIP Journal on Applied Signal Processing, pp. 366–377, 2004.
- [58] B. Lazzarini and S. Volpi," Classifier ensembles to improve the robustness to noise of bearing fault diagnosis", Pattern Analysis and Applications, Vol. 16 (2), pp. 235–251, 2013.
- [59] D. Augeix, « Analyse vibratoire des machines tournantes », Technique d'ingénierie, Traité Génie Mécanique, BM 5145, EDITION 2000.
- [60] TOUAFEK Ishak « Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques : Comparaison de L'EMD et des ondelettes(WT) » mémoire magister. Université Ferhat Abbas Sétif 2011
- [61] Morel J., « surveillance vibratoire et maintenance prédictive », Techniques de l'ingénieur R 6 100, 2007.

- [62] K. Ibrahim and S. Youcef, “Détection des défauts d’une machine tournantes par l’analyse FFT.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2019.
- [63] Augeix D., Techniques de l’ingénieur BM5 – 145, « bruit et vibrations », 2007.
- [64] A. Kr Jalan and A.R. Mohanty, “Model based fault diagnosis of a rotor bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 327 (3–5), pp. 604-622, 2009.
- [65] Augeix D., "Analyse vibratoire des machines tournantes", Techniques de l'ingénieur, BM5 -145, 2001.
- [66] Nabti Mohamed Tahar, (2011). « Etude de l’évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques » MEMOIRE de MAGISTER en Optique et Mécanique de Précision UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF.
- [67] Omar DJEBILI, (2013). « Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement ». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne.
- [68] ABA. A, (2015) « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique Industrielle, DIRECTION REGIONALE HAUD BERKAOUI.
- [69] Ilyes KHELF, « DIAGNOSTIC DES MACHINES TOURNANTES PAR LES TECHNIQUES DE L’INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ». Thèse de Doctorat Spécialité Génie mécanique, UNIVERSITE BADJ MOKHTAR – ANNABA (2013/2014).
- [70] R. Ziani, “Contribution à l’analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques.” 2018.
- [71] Technique de l’ingénieur « Essais de vibrations, Mesures et exploitation des résultats »
- [72] BELKHIR, T. & BEN SACI, M, « La maintenance des équipements par l’analyse vibratoire » Mémoire de Master spécialité Maintenance Industrielle UNIVERSITE KASDI MARBAH (2016, 6).

- [73] Mr. Djaballah Saïd « Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements » Mémoire de Magister Spécialité Génie Mécanique Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras.
- [74] CHAIB R, 2009, Contribution à l'optimisation de la maintenance conditionnelle par l'analyse vibratoire, thèse de doctorat en sciences en mécanique, université de Constantine.
- [75] Taleb M (2018), surveillance, détection et diagnostic dans une cimenterie et utilisant l'analyse fonctionnelle ; thèse doctorat ; faculté Technologie Département de Génie Mécanique ; Université du 20 Aout 1955 Skikda
- [76] AUGÉIX. D, 2002, Analyse vibratoire des machines tournantes, Techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique, BM 5- 145, pp. 1-22.]



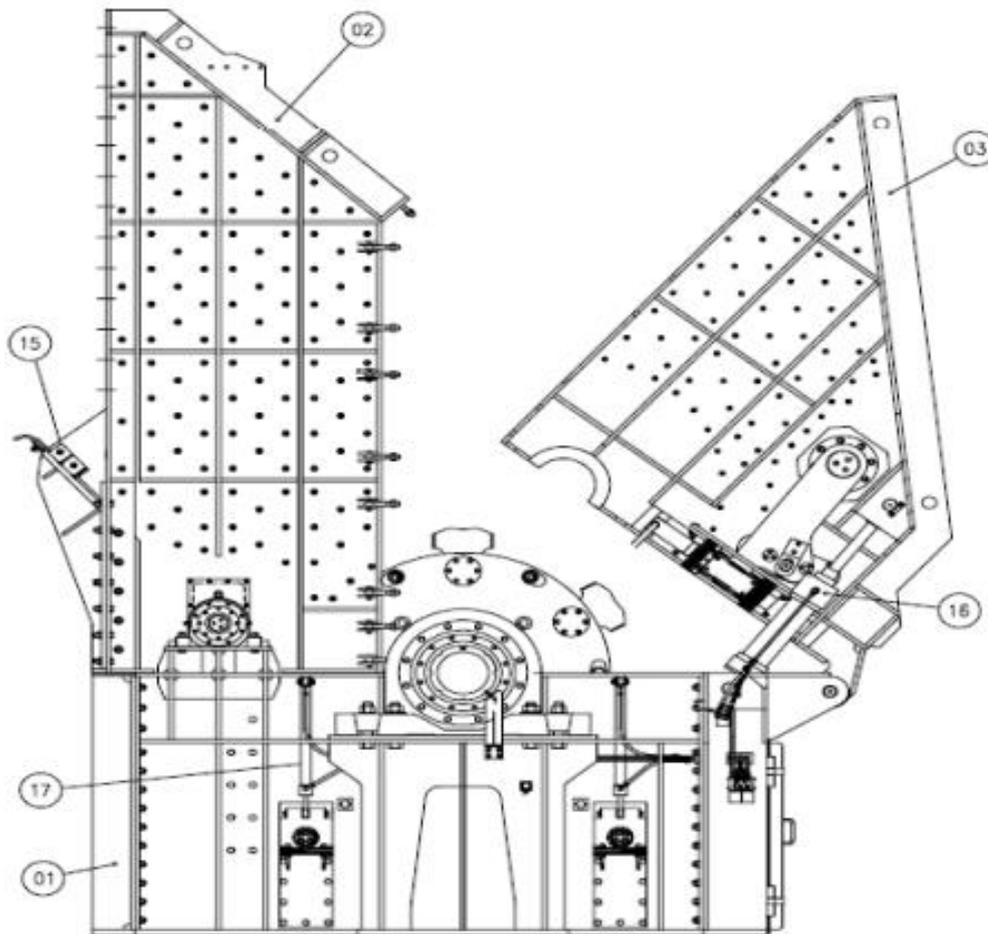
# ANNEXES



## **Légende des annexes**

- 01 Section inférieure ;
- 02 Section supérieure fixe ;
- 03 Section supérieure basculante ;
- 04 Cylindre d'admission ;
- 06 Plateau de concassage ;
- 15 Plateau d'admission ;
- 16 Cylindre hydraulique ;
- 17 Cylindre hydraulique de la grille ;
- 18 Plaque d'usure ;
- 19 Plaque d'usure du plateau de concassage ;
- 20 Garde-chaîne ;
- 21 Porte d'observation ;
- 68 Boulon de fixation.

# Annexe 1



01 Section inférieure ;

02 Section supérieure fixe ;

03 Section supérieure basculante ;

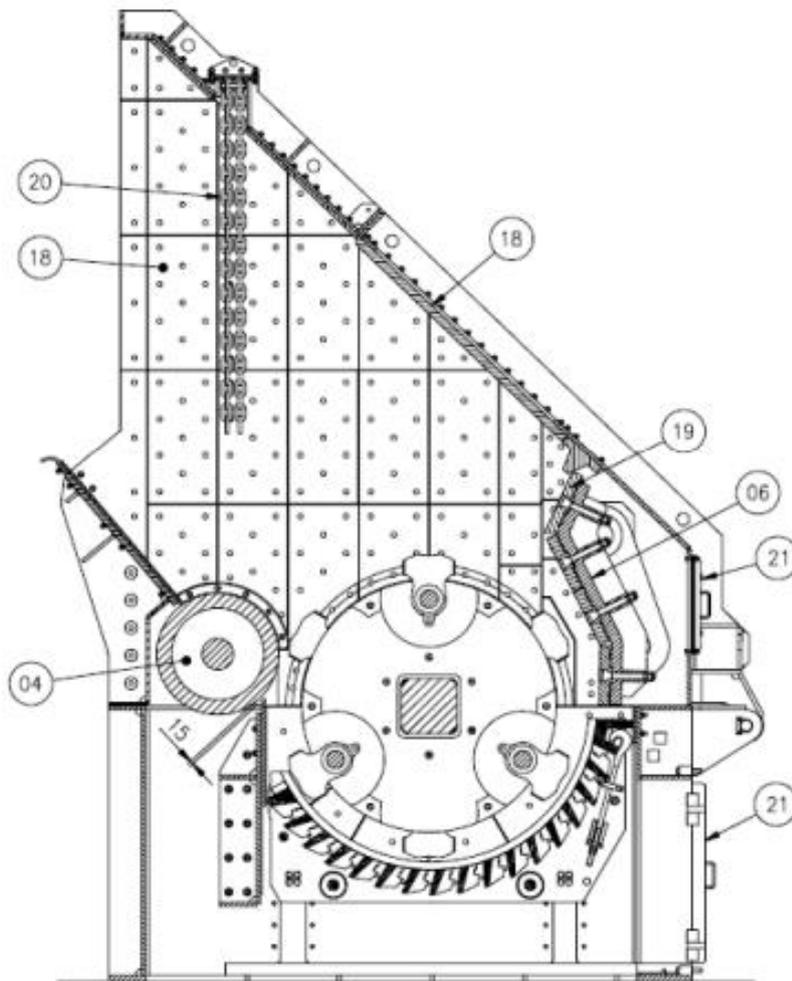
15 Plateau d'admission ;

16 Cylindre hydraulique ;

17 Cylindre hydraulique de la grille ;

68 Boulon de fixation.

## Annexe 2



04 Cylindre d'admission ;

06 Plateau de concassage ;

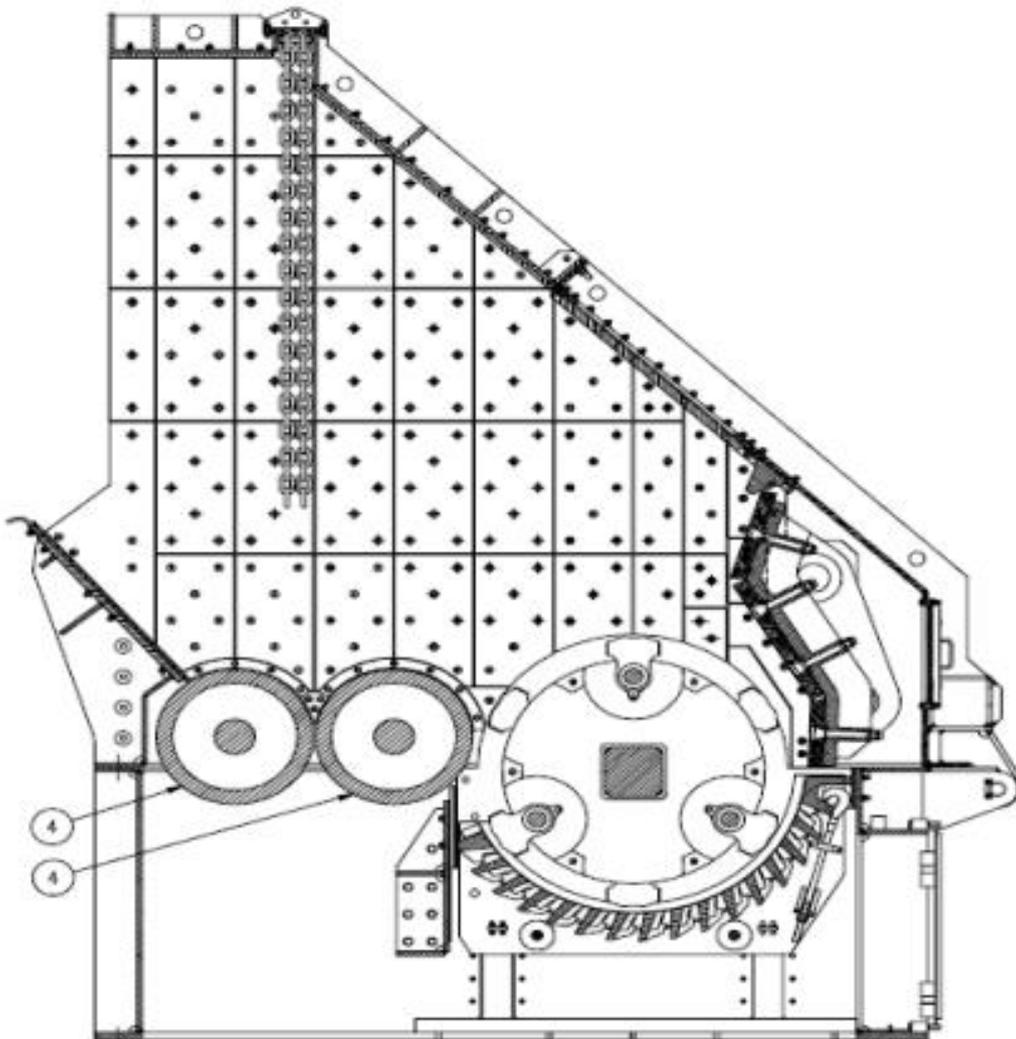
18 Plaque d'usure ;

19 Plaque d'usure du plateau de concassage ;

20 Garde-chaîne ;

21 Porte d'observation.

## Annexe 3



04 Cylindre d'admission.