

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2024



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté par

- MEDJOU DJ NOUR EL ISLAM
- HAMMI OUSSAMA

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

**Étude de défaut d'écaillage sur le comportement dynamique
des engrenages droits**

Soutenu publiquement, le 23/06 /2024, devant le jury composé de :

Djebala Abderrazak	Professeur	Univ. Guelma	Président
Benmohamed Hanane	MCB	Univ. Guelma	Encadreur
Chaabi Lilia	MCA	Univ. Guelma	Examineur
Frioui Nadia	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Nous remercions notre superviseur, Mme Ben Mohamed Hanane, pour son aide, ses encouragements et sa patience.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Par ailleurs, la réalisation ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien moral et effectif de nos deux familles. Nous remercions donc nos familles pour leur appui et leur soutien durant toutes nos années d'étude.

Enfin, Nous remercions toute personne qui nous ont aidé de manière directe ou indirecte à la réalisation de cette étude.

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail à

A mon père et à ma mère.

Pour leur immense soutien, leur grand amour, leurs sacrifices et leurs prières.

A mes frères et sœur pour leur grand soutien.

A toute ma famille.

A tous mes chers amis.

A tous ceux que j'aime.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

Et surtout mon encadreur dr. Ben Mohamed Hanene.

Dédicace

Je tiens à dédier cet humble travail à : À la mémoire de mon père (رحمه الله)

À ma chère mère.

*À tous mes proches de la famille Medjoudj, et plus
particulièrement, mes sœurs et mes frères.*

A tous mes chers amis.

A tous mes enseignants.

Et surtout mon encadreur dr. Ben Mohamed Hanene.

RESUME

La maintenance des machines tournantes en fonctionnement a une importance vitale pour assurer une production permanente et augmenter la durée de vie de ces machines tournantes.

Ce travail de recherche se concentre sur l'étude des processus de détérioration des défauts d'engrenages droits, en appliquant les Méthodes temporelles basée sur les indicateurs scalaires et les méthodes fréquentielles. Ces deux méthodes sont basées sur les analyses vibratoires du système à engrenage sous test.

Le but de ce travail est d'avoir un écaillage sur toute la longueur de la dent et de voir l'évaluation du degré cette détérioration.

Mots clés : analyse vibratoire, indicateurs scalaires, réducteur à engrenage

ABSTRACT

The maintenance of rotating machines in operation is of vital importance to ensure permanent production and increase the lifespan of these rotating machines.

This research work focuses on the study of the deterioration processes of spur gear defects, by applying temporal methods based on scalar indicators and frequency methods. These two methods are based on vibration analyzes of the gear system under test.

The aim of this work is to have chipping along the entire length of the tooth and to see the evaluation of the degree of this deterioration.

Keywords: vibration analysis, scalar indicators, gear reducer

ملخص

تعد صيانة الآلات الدوارة قيد التشغيل ذات أهمية حيوية لضمان الإنتاج الدائم وزيادة عمر هذه الآلات الدوارة.

يركز هذا العمل البحثي على دراسة عمليات التدهور في عيوب التروس، من خلال تطبيق الطرق الزمنية المبنية على المؤشرات العددية وطرق التردد. تعتمد هاتان الطريقتان على تحليلات الاهتزاز لنظام التروس قيد الاختبار.

الهدف من هذا العمل هو إجراء التقطيع على طول السن بالكامل ورؤية تقييم درجة هذا التدهور.

الكلمات المفتاحية: تحليل الاهتزازات، المؤشرات العددية، مخفض التروس

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I Généralité sur la maintenance

<i>I.1. Introduction</i> :	4
<i>I.2. La maintenance</i> :	4
<i>I.2.1. Définition de la Maintenance</i> :	4
<i>I.2.2. Rôle de la maintenance</i> :	4
<i>I.2.3. Objectifs de la maintenance dans l'entreprise</i> :	5
I.2.3.1. La centralisation :	5
I.2.3.2. La décentralisation :	5
<i>I.2.4. Les Différentes types des maintenances</i> :	6
I.2.4.1. La maintenance corrective (curative) :	7
I.2.4.2. La maintenance préventive :	7
<i>I.2.5. Les techniques d'analyse</i> :	9
I.2.5.1. L'analyse vibratoire :	9
I.2.5.2. Thermographie infrarouge :	9
I.2.5.3. L'analyse d'huiles :	10
I.2.5.4. L'analyse acoustique :	10
<i>I.2.6. Les niveaux de maintenance</i> :	11
<i>I.2.7. Opérations de maintenance</i> :	12
I.2.7.1. Inspection :	12
I.2.7.2. Contrôle :	12
I.2.7.3. Visite :	12
I.2.7.4. Dépannage :	12
I.2.7.5. Réparation :	12
<i>I.3. Conclusion</i> :	14

Chapitre II Etude de l'analyse vibratoire

<i>II.1. Introduction</i>	16
<i>II.2. L'analyse Vibratoire</i>	16
<i>II.2.1. Définition</i> :	16
II.2.1.1. Définition d'une vibration :	16
<i>II.2.2. Caractéristique d'une vibration</i> :	17
II.2.2.1. La fréquence :	17
II.2.2.2. Amplitude :	17
<i>II.2.3. Activités de L'analyse vibratoire</i> :	17

II.2.3.1. Surveillance :	17
II.2.3.2. Détection :	18
II.2.3.3. Diagnostic :	18
II.2.4. Structure des signaux vibratoires :	19
II.2.4.1. Signaux harmoniques :	19
II.2.4.2. Signaux périodiques non harmonique :	20
II.2.4.3. Signaux aléatoires :	21
II.2.5. La nature des vibrations :	21
II.2.5.1. Vibrations périodiques :	21
II.2.5.2. Vibrations périodiques impulsionnelles :	22
II.2.5.3. Vibrations aléatoires impulsionnelles :	22
II.2.6. Les outils de la surveillance et du diagnostic par l'analyse vibratoire :	22
II.2.6.1. Les outils du diagnostic :	22
II.2.6.2. Les outils de surveillance :	24
II.3. Synthèses bibliographiques :	25
II.4. Conclusion.....	26

Chapitre III Etude sur les engrenages et synthèses bibliographiques

III.1. Introduction :	28
III.2. Les engrenages :	29
III.2.1. Définition :	29
III.2.2. Les avantages des engrenages :	29
III.2.3. Les inconvénients des engrenages :	29
III.3. Les différents types des engrenages :	29
III.3.1. Les engrenages à axes parallèles (engrenages cylindriques) :	30
III.3.2. Engrenage cylindrique à denture droite :	30
III.3.2.1. Caractéristiques des dentures :	30
III.3.3. Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale :	32
III.3.4. Engrenage à axes concourants (engrenage conique) :	33
III.3.5. Engrenage gauche (système roue et vis sans fin) :	35
III.3.6. Engrenage à roue et crémaillère :	36
III.4. Profil des dents :	37
III.5. Ligne d'engrènement ou ligne d'action :	37
III.6. Cycle de fonctionnement d'un engrenage parallèle extérieur à denture droite :	38
III.6.1. Début de l'engrènement :	38
III.6.2. Début du contact unique :	38

III.6.3. Fin du contact unique :	38
III.6.4. Fin de l'engrènement :	39
III.7. Période d'approche et de retraite :	39
III.8. Efforts sur les dentures :	40
III.8.1. Action de contact $F_{2/1}$:	40
III.8.2. Effort tangentiel F_T :	41
III.8.3. Effort radial F_R :	41
III.9. Interférence de fonctionnement :	41
III.9.1. Principe de l'interférence :	41
III.10. L'apparition des défauts des engrenages :	42
III.11. Défauts des engrenages :	42
III.11.1. Défauts de fabrication :	42
III.11.1.1. Défaut de taillage :	42
III.11.1.2. Erreur de pas :	43
III.11.2. Défauts de rectification :	43
III.11.3. Défauts de montage :	43
III.11.4. Défauts de fonctionnement :	43
III.11.4.1. Défauts répartis sur toutes les dents :	43
III.11.4.2. Défauts localisés sur certaines dents :	45
III.12. L'influence des défauts d'engrenages sur la structure des signaux :	47
III.13. Gravité des défauts des engrenages :	47
III.14. Fréquence d'engrènement :	48
III.14.1. Détérioration de dent :	49
III.14.2. Défaut d'excentricité :	50
III.15. Synthèses bibliographiques :	51
III.16. Conclusion :	52

Chapitre IV Etude expérimentale

IV.1. Introduction :	54
IV.2. Analyse de la base CETIM :	54
IV.3. Description de banc d'essai :	55
IV.4. Acquisition des signaux :	56
IV.4.1. Inspection visuelle :	57
IV.4.2. Analyse temporelle :	57
IV.4.2.1. Les indicateurs scalaires :	57
IV.4.2.2. L'analyse des signaux temporelle.....	60

<i>IV.4.3. Analyse Fréquentielle :</i>	62
<i>IV.4.4. Analyse en temp-fréquence :</i>	64
<i>IV.5. Conclusion :</i>	65
<i>Conclusion générale</i>	67
<i>Références bibliographiques</i>	68

Liste des figures

CHAPITRE I

FIGURE I.1 : OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE	6
FIGURE I.2 : ORGANIGRAMME DE DEFERENTS TYPES DE MAINTENANCE.....	7
FIGURE I.3: DIFFERENTS TECHNIQUES DE L'ANALYSE	9
FIGURE I.4: EXEMPLE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	10
FIGURE I.5: OPERATION DE MAINTENANCE	13

CHAPITRE II

FIGURE II.1: AMPLITUDE DU SIGNAL VIBRATOIRE.....	17
FIGURE II.2: LES TYPES DE SURVEILLANCE DES MACHINES	18
FIGURE II.3: METHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC	19
FIGURE II.4: REPRESENTATION D'UN SIGNAL HARMONIQUE.....	20
FIGURE II.5: REPRESENTATION D'UN SIGNAL PERIODIQUE NON HARMONIQUE ET SES DEUX COMPOSANTES HARMONIQUES	20
FIGURE II.6: REPRESENTATION D'UN SIGNAL ALEATOIRE	21
FIGURE II.7: EXEMPLE D'UN SIGNAL TRANSITOIRE ET UN SIGNAL ALEATOIRE	21
FIGURE II.8: LA NATURE DES VIBRATIONS.....	22

CHAPITRE III

FIGURE III.1: CARACTERISTIQUES D'UNE DENTURE	30
FIGURE III.2: CARACTERISTIQUES D'UNE DENTURE	31
FIGURE III.3: ENGRENAGES HELICOÏDALES.....	32
FIGURE III. 4: CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES A DENTURE HELICOÏDALE	32
FIGURE III.5: CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES CONIQUES A DENTURE DROITE.....	34
FIGURE III.6: ENGRENAGES ROUES ET VIS SANS FIN	35
FIGURE III. 7: CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES ROUES ET VIS SANS FIN.....	35
FIGURE III.8: ENGRENAGES A CREMAILLERE ET PIGNON.....	36
FIGURE III.9: PROFIL D'UNE DENT EN COMPARAISON AVEC UNE DROITE ET UN ARC DE CERCLE	37
FIGURE III.10: POSITIONS SUCCESSIVES DE DEUX DENTS EN CONTACT AU COURS DE L'ENGRENEMENT	37
FIGURE III.11: DEBUT DE L'ENGRENEMENT	38
FIGURE III.12: DEBUT DE CONTACT UNIQUE	38
FIGURE III.13: FIN DE CONTACT UNIQUE.....	39
FIGURE III.14: FIN DE L'ENGRENEMENT.....	39
FIGURE III.15: APPROCHE ET RETRAITE DANS UN COUPLE D'ENGRENAGE	40
FIGURE III.16: EFFORTS SUR UNE DENTURE DROITE.....	40
FIGURE III.17: INTERFERENCE DE FONCTIONNEMENT	41
FIGURE III.18: DETAIL DE LA ZONE DE CONTACT D'INTERFERENCE	42
FIGURE III.19: USURE NORMALE.....	44
FIGURE III.20: USURE EXCESSIVE	44
FIGURE III.21: LE PIQURE	45
FIGURE III.22: L'ECAILLAGE	45
FIGURE III.23: GRIPPAGE A FROID.....	46
FIGURE III.24: GRIPPAGE A CHAUD.....	46
FIGURE III.25: REDUCTEUR A ENGRENAGE.....	48
FIGURE III.26: ENGRENEMENT DE REDUCTEUR	48
FIGURE III.27: SPECTRE THEORIQUE D'UN ENGRENAGE SAIN.....	49
FIGURE III.28: SPECTRE THEORIQUE D'UN ENGRENAGE PRESENTANT UNE DENT DETERIOREE	50
FIGURE III.29: SPECTRE THEORIQUE D'UN ENGRENAGE PRESENTANT UN DEFAUT D'EXCENTRICITE	50

CHAPITRE IV

FIGURE IV.1 : DIAGRAM DU DIAGNOSTIC DU BANC D'ESSAI CETIM.....	54
FIGURE IV.2: VU D'ENSEMBLE DU BANC D'ESSAI.....	55
FIGURE IV.3: SCHEMA CINEMATIQUE DU BANC D'ESSAI CETIM	56
FIGURE IV. 4: INDICATEURS SENSIBLES A LA FORME DU SIGNAL : A. LE KURTOSIS, B. LE FACTEUR CRETE.	59
FIGURE IV. 5: INDICATEURS SENSIBLES A L'ENERGIE DU SIGNAL : A. CRETE A CRETE, B. RMS, C. ENERGIE,D. VALEUR CRETE ET E. FACTEUR K.....	60
FIGURE IV.6: SIGNAUX TEMPORELLE MESURES POUR LES 12 JOURS.....	61
FIGURE IV.7: UN ZOOM SUR LES SIGNAUX TEMPORELS DU 11 ^{EME} ET 12 ^{EME} JOUR	62
FIGURE IV.8: LES SPECTRES DES SIGNAUX	63
FIGURE IV.9: SPECTRES D'ENVELOPPE DES SIGNAUX	65

Liste des tableaux

CHAPITRE I

TABLEAU I.1: CHOIX D'UNE TECHNIQUE D'ANALYSE	11
TABLEAU I.2: LES NIVEAUX DE MAINTENANCE.....	12

CHAPITRE III

TABLEAU III.1: CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES A DENTURE DROITE.....	31
TABLEAU III. 2: LES CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES CYLINDRIQUES A DENTURE HELICOÏDALES.....	33
TABLEAU III.3: LES CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES CONIQUES	34
TABLEAU III.4: LES CARACTERISTIQUES DES ENGRENAGES ROUES ET VIS SANS FIN.....	36

CHAPITRE IV

TABLEAU IV.1: CARACTERISTIQUES NOMINALES DU REDUCTEUR TESTE.....	56
TABLEAU IV.2: RAPPORT D'INSPECTION VISUELLE DE LA DEGRADATION DU DEFAUT	57
TABLEAU IV.3: LES VALEURS DES INDICATEURS SCALAIRES.....	58

NOMENCLATURE

M : module

Z : nombre de dent

p : pas

H : hauteur de la dent

h_a : saillie de la dent

h_r : creux de la dent

b : largeur de denture

d_p : diamètre primitif

d_s : diamètre de tête

d_f : diamètre de pied

β : Angle d'hélice

θ : angle de hauteur

ω : Vitesse angulaire ou pulsation du mouvement ($2\pi f$),
exprimée en rad/s ($\omega = 2\pi f$).

f : Fréquence du mouvement (Hertz).

φ : Phase du mouvement par rapport à un repère dans le temp

x_i: Le signal temporel mesuré

N : Le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

σ_x : L'écart type

M₄: Le moment statistique d'ordre 4.

M₂: Le moment statistique d'ordre 2

INTRODUCTION GENERALE

Le principe de tout système mécanique est de transmettre et d'adapter une énergie mécanique depuis une source d'énergie vers une application donnée

Les réducteurs à engrenages sont des éléments importants dans les lignes d'arbres des machines tournantes. On les trouve dans tous types d'industries, où ils ont pour fonction de transmettre la puissance d'un arbre en rotation à un autre arbre tournant généralement à une vitesse différente, tout en maintenant une proportion constante entre les deux vitesses. Les engrenages constituent des éléments cruciaux des systèmes mécaniques, et leur état de santé conditionne le bon fonctionnement de l'ensemble du mécanisme, assurant ainsi un niveau élevé de sécurité et de fiabilité.

La surveillance et le diagnostic d'engrenages prennent une place importante dans la tendance actuelle des milieux scientifique et industriel. Les engrenages sont d'autant plus concernés étant donné les conditions sévères et les couples importants dans lesquels ils opèrent, provoquant leur détérioration rapide notamment au niveau des dentures (usure, écaillage, fissure, rupture...). Ces défauts entraînent une défaillance dans le fonctionnement du réducteur, d'où la nécessité de les soumettre à une surveillance continue.

Pour prévenir les défaillances et assurer une disponibilité optimale nous recherchons des outils capables de révéler de manière précoce l'apparition des dysfonctionnements dans le but d'établir la maintenance préventive conditionnelle. Contrairement à la maintenance systématique, ce type de maintenance va drastiquement réduire le temps d'arrêt de la machine et pouvoir ainsi faciliter la planification de la production et de la main d'œuvre, il existe heureusement des outils de surveillance puissante telle que l'analyse vibratoire, qui entrent dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle.

L'analyse des signaux vibratoires est appropriée pour la surveillance des engrenages vu que tout changement dans la signature vibratoire résulte vraisemblablement d'un changement de l'état des engrenages. En effet, l'apparition des défauts altère les modulations d'amplitude et de phase de la réponse vibratoire des engrenages, indiquant ainsi la possibilité d'une défaillance. À ce propos plusieurs indicateurs de détection ont été proposés et utilisés comme mesure globale du niveau vibratoire tels que la valeur crête, le kurtosis, le RMS, le facteur de crête. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre un rappel des généralités de la maintenance, principe, approches et les aspects principaux de la mise en place d'un plan de maintenance préventive conditionnelle.

Le deuxième chapitre présente un bref théorique sur l'analyse vibratoire, les différentes méthodes et technique utilisée que ce soit les outils de diagnostic ou de surveillance.

Le troisième chapitre est dédié à une étude bibliographie sur les engrenages, nous avons commencé par définir les engrenages, puis nous avons présenté leurs types et leurs caractéristiques géométriques et les défauts des engrenages. On présente par la suite une synthèse bibliographique de plusieurs travaux de recherche dans le domaine du diagnostic et de surveillance, dans le cas de la détection des défauts d'engrenage.

Dans le quatrième chapitre est consacré à l'application expérimentale basée sur les signaux de vitesse enregistrés sur la table d'essai. Nous avons commencé par analyser ces signaux et parvenir à une évaluation pour la sécurité du système.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both ending in rounded, scroll-like shapes.

CHAPITRE I

***GENERALITE SUR LA
MAINTENANCE***

I.1. Introduction :

La maintenance industrielle essentielle pour garantir le bon fonctionnement des outils de production, revêt une importance stratégique pour les entreprises. Étroitement liée à l'évolution technologique, à l'adoption de nouveaux modes de gestion et à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en perpétuelle évolution. Son objectif dépasse désormais la simple réparation des équipements, incluant également la prévision et la prévention des dysfonctionnements.

Dans ce chapitre on va présenter une généralité sur la maintenance, sa définition, ces méthodes, ces opérations.

I.2. La maintenance :

I.2.1. Définition de la Maintenance :

La norme AFNOR NF X 60 010 [1] définit La maintenance est l'ensemble des actions techniques et administratives destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction nécessaire pour fournir un service donné.

Dans une entreprise, maintenir c'est effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité. Pendant la durée de vie du matériel.

La mission de la maintenance consiste à :

- Des actions de surveillance et de suivi (visites, contrôles et inspections systématiques ou non)
- Des opérations diverses : dépannages, réparations, révisions partielles ou totales amélioration du matériel.

Ces actions et opérations visent à assurer la disponibilité du matériel, à conserver la qualité de la production et à minimiser les dépenses de maintenance.

I.2.2. Rôle de la maintenance :

Le rôle de la maintenance est de maintenir les outils de production en état de fonctionner en toute sécurité tout en réduisant les coûts de production. Pour répondre aux enjeux économiques croissants, elle est une source d'optimisation voire de profits En bref, le rôle de la maintenance est de mettre en œuvre le fameux proverbe « mieux vaut prévenir que guérir »

I.2.3. Objectifs de la maintenance dans l'entreprise :

Peuvent être décomposés en deux tendances :

I.2.3.1. La centralisation :

Où un service unique assure l'ensemble de la maintenance. Les avantages sont :

- Possibilité d'investir dans des matériels onéreux grâce au regroupement
- Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication
- Vision globale de l'état du parc des matériels à gérer.
- Gestion plus aisée et plus souple des moyens en personnels.
- Rationalisation des moyens matériels et optimisation de leur usage (amortissement plus rapide).
- Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles.
- Communication simplifiée avec les autres services grâce à sa situation centralisée

I.2.3.2. La décentralisation :

Où certaines responsabilités sont déléguées, notamment la maintenance de fabrication aux services de production. Cette décentralisation vise à mieux cerner les coûts réels de maintenance par postes de travail, mais peut entraîner l'application de politiques contradictoires.

Les avantages sont :

- Meilleures communications et relations avec le service responsable et utilisateur du parc à Maintenir.
- Effectifs moins importants dans les différentes antennes.
- Réactivité accrue face à un problème.
- Meilleure connaissance des matériels.
- Gestion administrative allégée.

La figure I.1 illustre les principaux objectifs de la maintenance

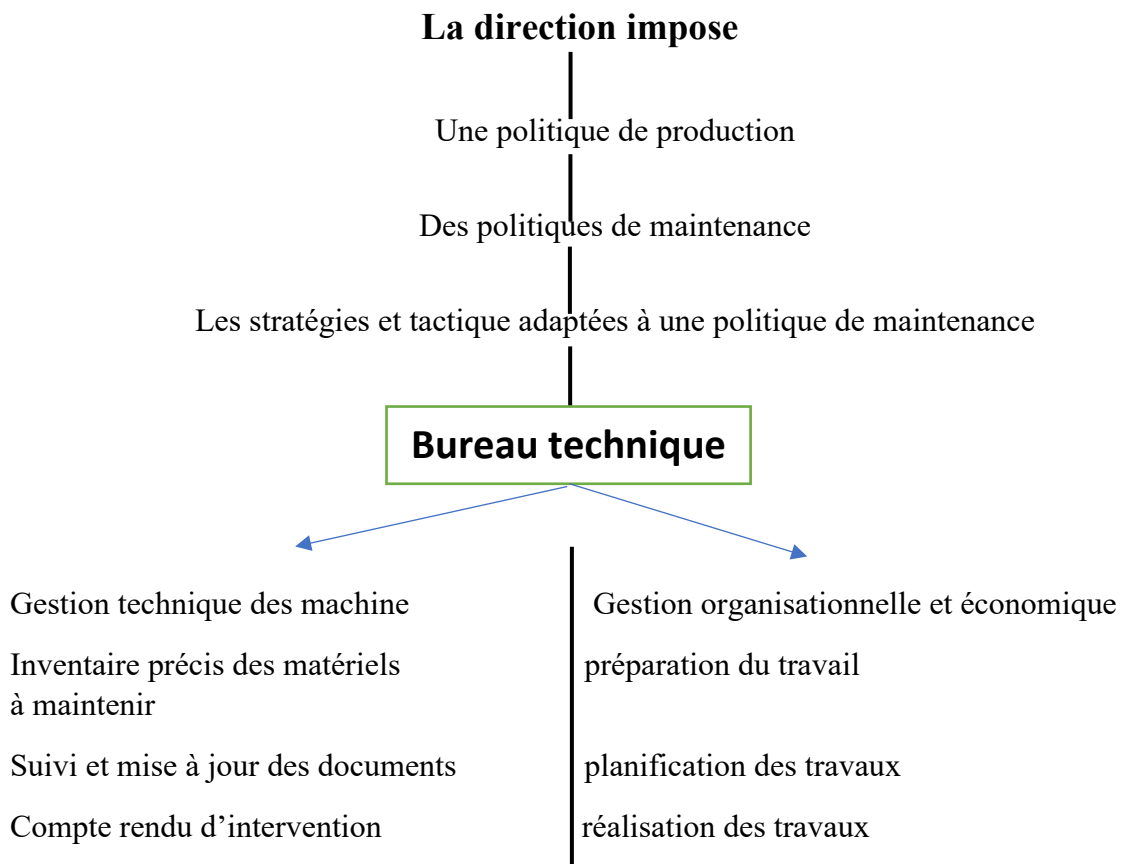


Figure I.1 : Objectifs de la maintenance

I.2.4. Les Différentes types des maintenances :

On distingue deux méthodes de maintenance [2] :

- Maintenance corrective
- Maintenance préventive

La Figure I.2 représente un organigramme de différents types de maintenance

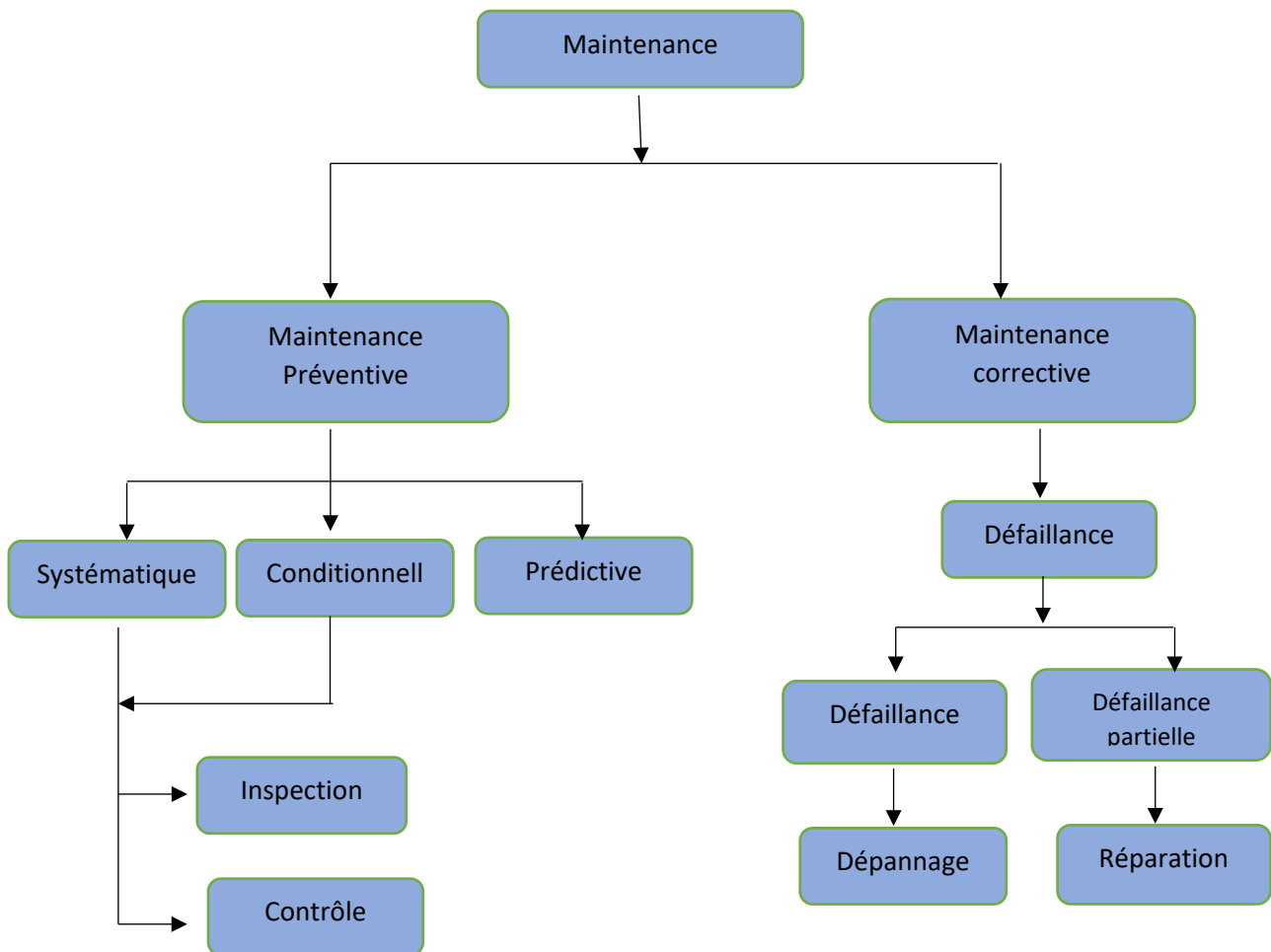


Figure I.2 : Organigramme de différents types de maintenance

I.2.4.1. La maintenance corrective (curative) :

Il s'agit d'une opération de maintenance effectuée après défaillance. Elle s'applique automatiquement aux défaillances soudaines comme par exemple la rupture brusque d'une pièce mécanique

La maintenance corrective comprend 2 types d'interventions :

I.2.4.1.1. Le dépannage :

Appelé aussi maintenance palliative est une intervention immédiate et rapide visant une remise en état provisoire du matériel.

I.2.4.1.2. La réparation :

Appelée aussi maintenance curative, est une remise en état définitive du matériel soit direct après une défaillance ou après un dépannage.

I.2.4.2. La maintenance préventive :

Elle est effectuée selon des critères prédéterminés. Les interventions sont prévues, préparées, et programmées avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

Types de La maintenance préventive :

I.2.4.2.1. Maintenance préventive systématique :

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

I.2.4.2.2. Maintenance préventive conditionnelle :

La maintenance préventive conditionnelle est une approche proactive où les arrêts pour inspection ou réparation ne sont déclenchés que lorsque les indicateurs de surveillance dépassent des seuils prédéfinis. Cette technique repose sur la mesure de divers paramètres physiques tels que les vibrations, le bruit, les températures, et l'analyse des huiles pour anticiper les défaillances et optimiser la maintenance des équipements.

I.2.4.2.3. Maintenance préventive prévisionnelle :

La maintenance préventive prévisionnelle repose sur l'identification anticipée des défauts et sur l'estimation de leur gravité pour décider de l'intervention et de son degré d'urgence. Elle se base sur des prévisions extrapolées à partir de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien pour anticiper les besoins de maintenance.

I.2.4.2.4. Les Objectifs de la maintenance préventive :

- ❖ Augmenter la durée de vie d'Equipment électrique
- ❖ Diminuer la probabilité des défaillances en service
- ❖ Prévenir et aussi prévoir les interventions de maintenance corrective
- ❖ Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions (gestion de la maintenance)
- ❖ Supprimer les causes d'accidents graves
- ❖ Diminuer les travaux urgents.

I.2.4.2.5. Pratique de la maintenance préventive conditionnelle :

Son principe consiste, à partir de différentes technique basées sur la mesure de paramètres physique (les vibrations, analyse d'huile, ...etc.), à suivre l'état de marche (et son évolution) du matériel en fonctionnement, de manière à diagnostique et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

I.2.5. Les techniques d'analyse :

Aujourd'hui, plusieurs techniques peuvent être employées pour surveiller l'état des machines par l'analyse des vibrations, du bruit, de la température, du courant, etc. [3]

Les différentes techniques de l'analyse sont illustrées dans la figure I.3.

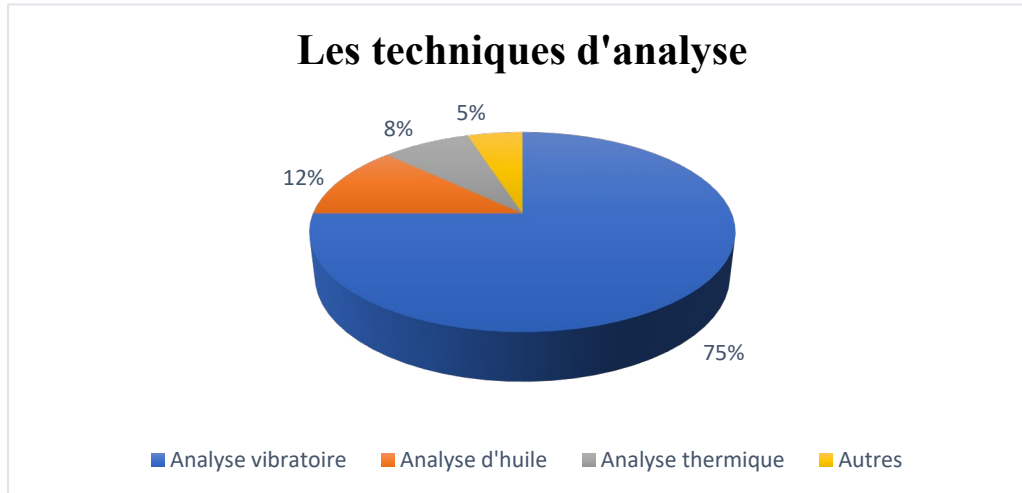


Figure I.3 : différents Techniques de l'analyse

I.2.5.1. L'analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire est une méthode courante de maintenance conditionnelle pour surveiller les machines tournantes, détectant les problèmes précocement pour éviter les défaillances coûteuses. Elle permet de planifier les interventions de maintenance de manière proactive, réduisant les temps d'arrêt non planifiés et augmentant la disponibilité des équipements. En se basant sur l'état réel des machines, elle optimise les programmes de maintenance, réduisant les coûts et prolongeant la durée de vie des équipements.

I.2.5.2. Thermographie infrarouge :

La thermographie est une technique de maintenance prédictive adaptée à la détection des points chauds sur les machines tournantes et les armoires électriques, ainsi qu'à la surveillance de processus comme le soudage ou le remplissage de moules. Elle utilise l'émission d'énergie infrarouge pour surveiller l'état de la machinerie, des structures et des systèmes de l'usine, permettant de détecter des anomalies thermiques et d'éviter les pannes.

Exemple : la figure I.4 présente un exemple de la thermographie infrarouge pour détecter un défaut d'engrenage.



Figure I.4: Exemple de la thermographie infrarouge

I.2.5.3. L'analyse d'huiles :

L'analyse de lubrifiant est une méthode appliquée à tous les équipements utilisant des fluides de lubrification pour surveiller les propriétés du lubrifiant, détecter les problèmes de lubrification et de contamination, ainsi que prévenir l'usure mécanique. Elle permet de suivre l'évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'huile, d'identifier les sources de dysfonctionnement et de décider des actions correctives nécessaires, comme la maintenance ou le remplacement de l'huile.

I.2.5.4. L'analyse acoustique :

L'analyse acoustique repose sur la détection de bruits anormaux à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement surveillé. Cette méthode permet de repérer des défauts auditifs jusqu'à 20 kHz et offre une surveillance continue, mais elle présente des limites telles que la sensibilité au bruit ambiant, des diagnostics souvent complexes et des problèmes de reproductibilité des mesures.

Le tableau I.1 donne un aperçu sur les critères pris pour le Choix d'une technique d'analyse [4].

	Principaux avantages	Principales limitation	Champ d'application privilège
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> -Détection de défauts à un stade précoce - Possibilité de réalisation un diagnostic approfondi -Autorise une surveillance Continue - Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> -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.) et de sa structure
Analyse d'huiles	<ul style="list-style-type: none"> - Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement - Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permet pas de localiser précisément le défaut - Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le processus (étanchéité), etc.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation - Interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire - Contrôle limité à ce que "voit" la caméra (échauffements de surface) - Ne permet pas de réaliser un diagnostic approfondi 	-Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)
Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de détecter l'apparition de défauts audibles -Autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensibilité au bruit ambiant - Diagnostic souvent difficile réalisé - Problèmes de répétabilité des mesures 	-Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire

Tableau I.1: Choix d'une technique d'analyse

I.2.6. Les niveaux de maintenance :

Ils existent cinq (5) niveaux de maintenance [1], sont :

Niveaux	Description
Niveau 1	Prévu par constructeur moyen d'organes accessible sans aucun démontage ou échange d'équipement, ou changement d'élément accessible en toute sécurité
Niveau 2	Dépannage par échange standard d'élément prévus effet ou d'opération mineures de maintenance préventive
Niveau 3	Identification et diagnostic des pannes, réparation par échange composants fonctionnels, réparation mécanique mineures
Niveau 4	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive
Niveau 5	Travaux importants de maintenance reconstruction ou opération importants confiées à un atelier centre

Tableau I.2: Les niveaux de maintenance

I.2.7. Opérations de maintenance :

I.2.7.1. Inspection :

Activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie : cette activité peut s'exercer notamment à la moyenne de rondes.

I.2.7.2. Contrôle :

Vérification de conformité à des données préétablies ; suivie d'un jugement le contrôle peut déboucher sur des actions correctives.

I.2.7.3. Visite :

Opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminer de tout (visite générale) ou partie (visite limite) des différents éléments du bien. La visite peut impliquer des opérations de maintenance du 1^{er} niveau.

I.2.7.4. Dépannage :

Action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement au moins provisoirement.

I.2.7.5. Réparation :

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après la défaillance.

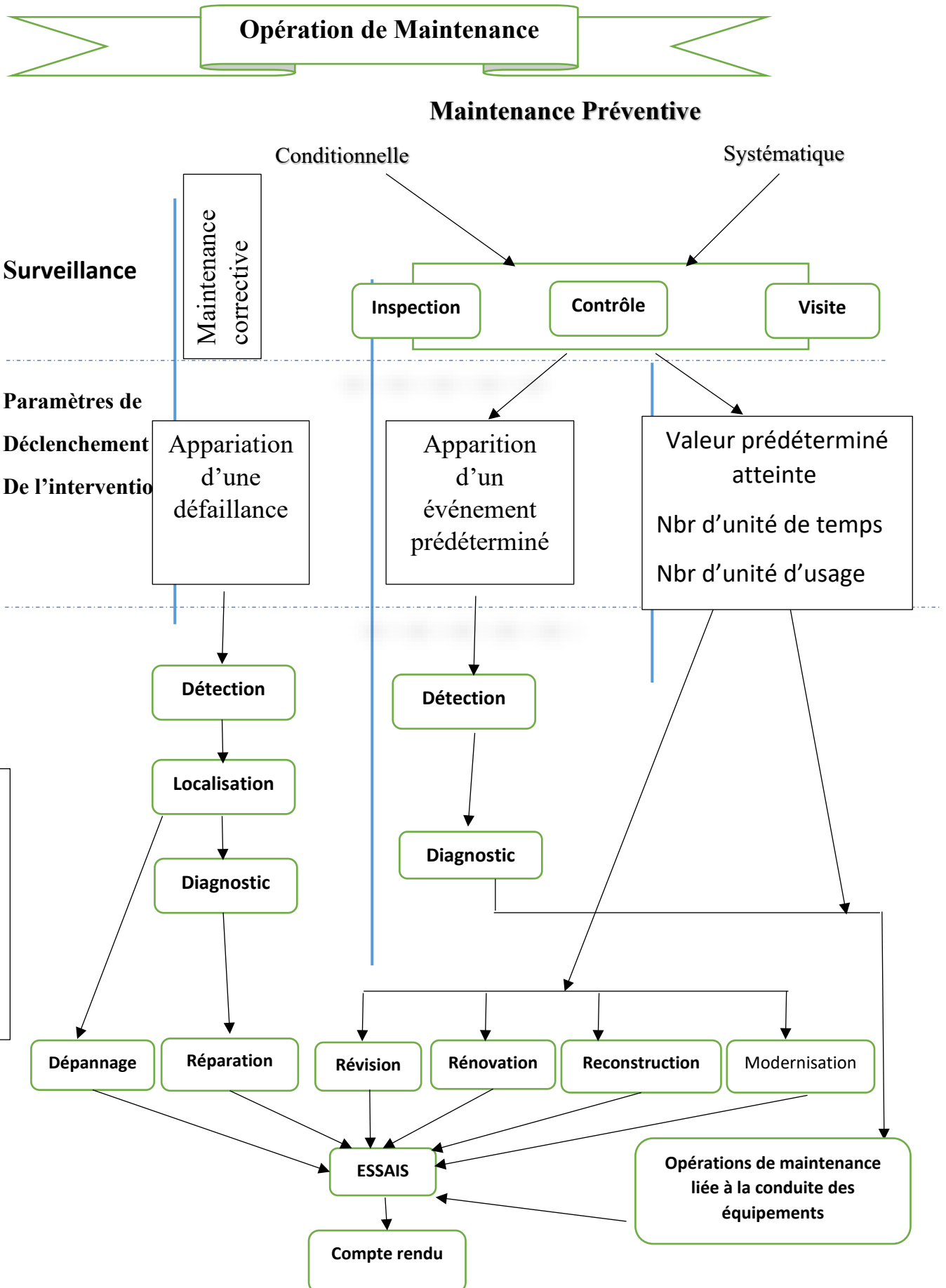


Figure I.5 : Opération de maintenance

I.3. Conclusion :

Ce chapitre est un rappel des généralités de la maintenance, principe, approches et les aspects principaux de la mise en place d'un plan de maintenance préventive conditionnelle.

Actuellement, la maintenance conditionnelle s'impose comme la meilleure solution permettant d'accroître les performances et d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement de tout système industriel. Pour assurer une maintenance conditionnelle efficace, plusieurs outils peuvent être utilisés l'analyse d'huile, thermographie, l'analyse vibratoire qui a fait ses preuves est la plus connue et la plus largement utilisé. On peut donc dire que maintenance et ses applications dans l'industrie, restent évoluent, par la formation et l'encadrement technique dans le secteur.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and a horizontal strip at the top. The scroll is outlined in black and has rounded ends. The text is centered within the horizontal strip.

CHAPITRE II

ETUDE DE L'ANALYSE

VIBRATOIRE

II.1. Introduction

La maintenance préventive conditionnelle repose sur l'observation continue ou périodique des machines pour identifier les signes de dégradation avant les défaillances. L'analyse vibratoire joue un rôle central en fournissant des données précises sur les vibrations des composants mécaniques. Les capteurs de vibration collectent ces données puis les analysent avec des logiciels spéciaux.

L'analyse vibratoire est essentielle en maintenance préventive conditionnelle, utilisée pour surveiller et diagnostiquer l'état des machines industrielles. Cette analyse permet de détecter des problèmes tels que déséquilibres, désalignements, anomalies des engrenages...

L'adoption de l'analyse vibratoire en maintenance préventive conditionnelle améliore la fiabilité et la durée de vie des équipements, optimise les ressources et assure un fonctionnement plus sûr et efficace des installations industrielles.

II.2. L'analyse Vibratoire

II.2.1. Définition :

L'analyse vibratoire est une méthode d'évaluation des vibrations et oscillations dans un système, visant à identifier les problèmes potentiels et à améliorer son fonctionnement en surveillant les caractéristiques telles que la fréquence, l'amplitude.

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

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

II.2.1.1. Définition d'une vibration :

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre.

D'après définition de la norme NFE 90-001[5] : Une vibration est une fluctuation dans le temps d'une caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, où cette caractéristique alterne entre des valeurs plus grandes et plus petites qu'une certaine moyenne ou référence.

II.2.2. Caractéristique d'une vibration :

II.2.2.1. La fréquence :

La fréquence mesure la répétition d'un phénomène par unité de temps. En seconde, elle est exprimée en Hertz (Hz). Par exemple, une vibration se produisant 50 fois par seconde a une fréquence de 50 Hz. La fréquence (f) est l'inverse de la période (T), qui est la durée d'un cycle.

II.2.2.2. Amplitude :

L'amplitude d'une onde vibratoire représente la distance maximale de ses déplacements par rapport au point d'équilibre. L'amplitude maximale est appelée amplitude crête, et l'amplitude double est également connue sous le nom d'amplitude crête à crête.

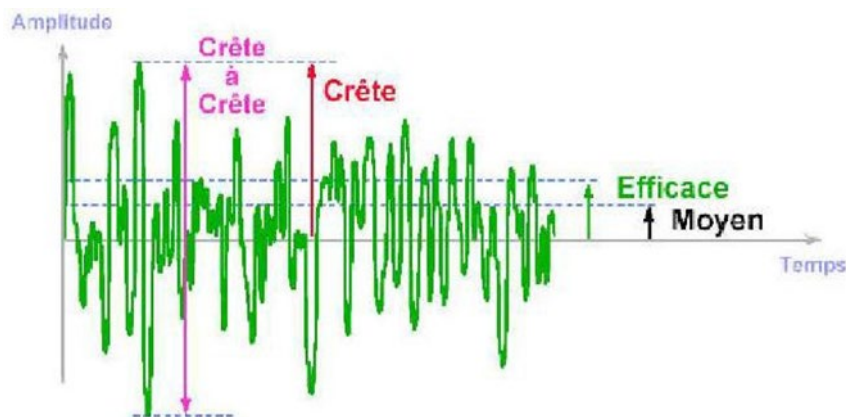


Figure II.1: Amplitude du signal vibratoire [6]

II.2.3. Activités de L'analyse vibratoire :

II.2.3.1. Surveillance :

L'objectif est de surveiller l'évolution d'une machine en analysant ses vibrations successives. Si certains indicateurs dépassent les valeurs de référence, formant ainsi une signature, cela alerte généralement le technicien sur un possible dysfonctionnement. Idéalement, cette signature est établie dès les premières mesures effectuées sur la machine, qu'elle soit neuve ou révisée.

Il s'agit 2 types de la surveillance :

II.2.3.1.1. La surveillance on-line :

Des capteurs sont fixés en permanence sur les machines et reliés à un système de surveillance, permettant une collecte continue des données pour une analyse en temps réel.

II.2.3.1.2. La surveillance off-line :

Un opérateur équipé d'un collecteur de données relève les mesures à intervalles réguliers.

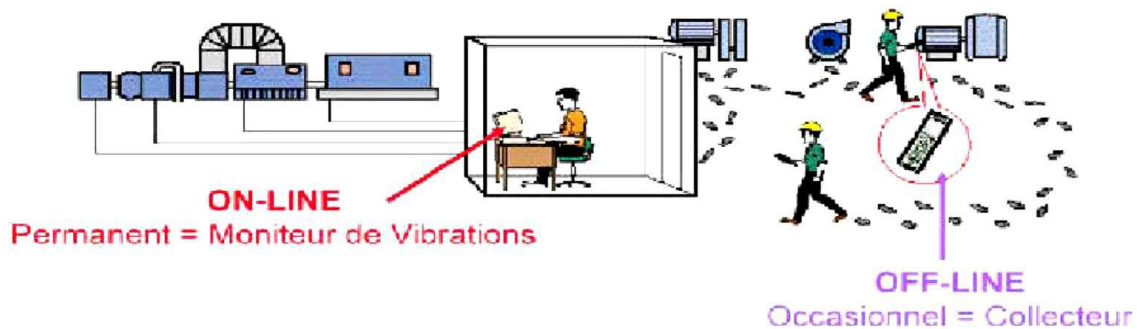


Figure II.2: Les Types de surveillance des machines [6]

II.2.3.2. Détection :

La détection est une étape clé de la maintenance préventive conditionnelle, intervenant après la surveillance du système. Elle implique l'identification des caractéristiques et signatures de défaillances, permettant de décider si le système fonctionne correctement ou non en comparant les mesures du procédé avec le fonctionnement normal. Essentielle pour le diagnostic, cette étape constitue une partie intégrante de la surveillance et assure une gestion proactive de l'état du système.

II.2.3.3. Diagnostic :

Il utilise des outils mathématiques plus avancés et intervient suite à une variation anormale des vibrations détectée pendant la surveillance. Son rôle est d'identifier la composante défectueuse de la machine. Le diagnostic est effectué uniquement après que la surveillance ait détecté une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. Il nécessite une expertise approfondie en mécanique et une formation spécialisée en analyse du signal.

La Figure II.3 représente la méthodologie du diagnostic.

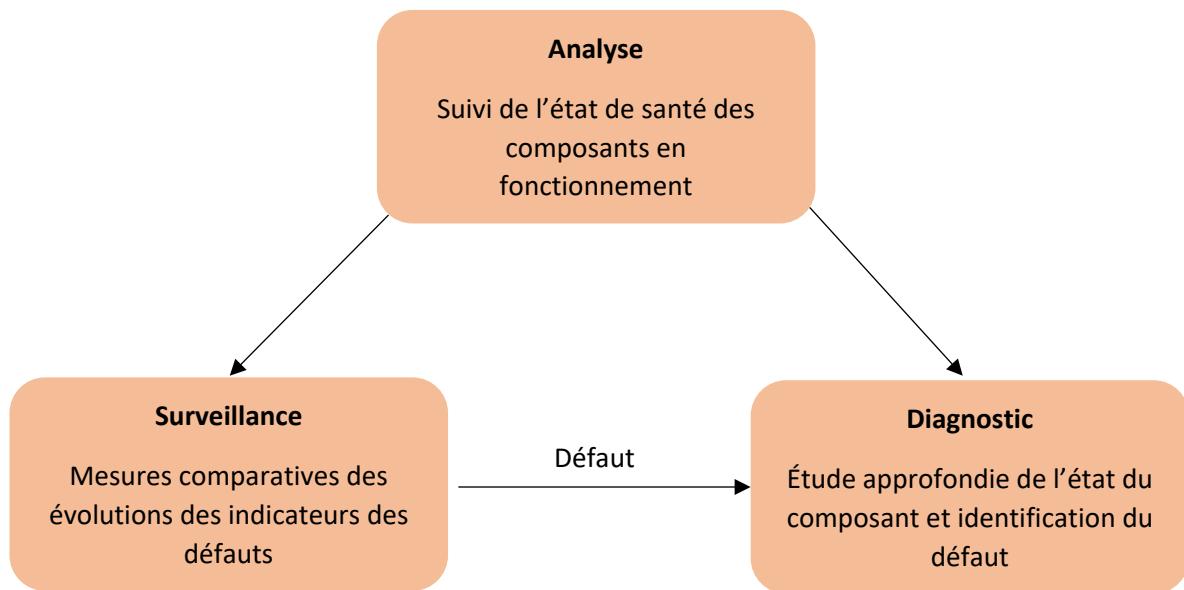


Figure II.3: Méthodologie du diagnostic

II.2.4. Structure des signaux vibratoires :

Les vibrations dans les machines tournantes résultent d'une combinaison de processus périodiques et aléatoires, engendrés par la rotation de la machine et son interaction avec l'environnement. Les signaux sont complexes, composés de parties cycliques liées à la rotation des arbres et aux mouvements des engrenages, ainsi que de parties aléatoires dues aux phénomènes parasites. Ces signaux ne sont pas stationnaires en raison du vieillissement du système, des chocs internes, de la variabilité des efforts transmis et des imperfections des surfaces de contact.

Les types des signaux sont :

II.2.4.1. Signaux harmoniques :

Les vibrations périodiques peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur, tel que celui d'un diapason, ou, de manière plus générale, à un mouvement complexe périodique décomposable en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser. Ces mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés composantes harmoniques, et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié, désignée comme la fréquence fondamentale ou la fréquence de l'harmonique d'ordre 1.

Une vibration harmonique est caractérisée par un diagramme amplitude- temps représenté par une sinusoïde, comme illustré par la figure II.4. L'exemple le plus typique d'une telle vibration est celle produite par le balourd d'un rotor en mouvement.

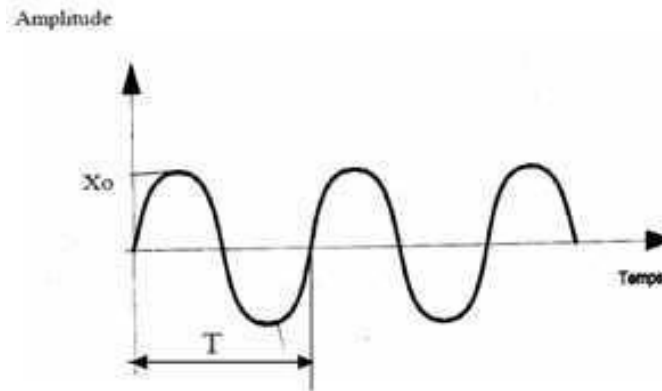


Figure II.4: Représentation d'un signal harmonique [7]

$$X(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \tag{2.1}$$

II.2.4.2. Signaux périodiques non harmonique :

Une vibration périodique se reproduit exactement après une certaine durée, appelée période, et résulte d'une excitation elle-même périodique. Ce type de vibration est couramment observé dans les machines tournantes et est constitué de plusieurs vibrations harmoniques. Ainsi, un signal périodique non harmonique est la somme de signaux harmoniques ayant différentes amplitudes maximales constantes, mais dont les pulsations sont des multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme illustré par la figure II.5. Le signal, connu à l'instant 't', se retrouve rigoureusement identique à l'instant $t \pm nT$.

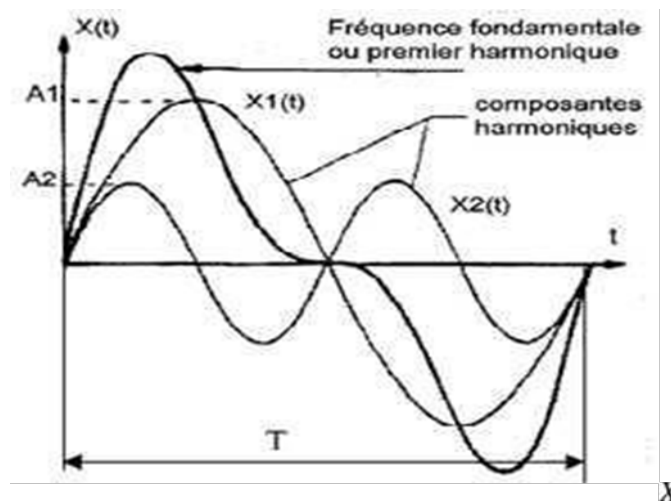


Figure II.5: Représentation d'un signal périodique non harmonique et ses deux composantes harmoniques [7]

$$X(t) = X_0 \cdot \sin(\omega t) + X_0/2 \cdot \sin(2\omega t) \tag{2.2}$$

II.2.4.3. Signaux aléatoires :

Une vibration a périodique présente un comportement temporel quelconque, sans reproductibilité dans le temps. Par conséquent, les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par des relations de probabilités, nécessitant théoriquement un temps infini pour leur analyse. On peut considérer qu'une fonction aléatoire est une fonction périodique avec une périodicité infinie, composée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie continuellement. Cela s'observe, par exemple, lors de chocs enregistrés sur un broyeur.

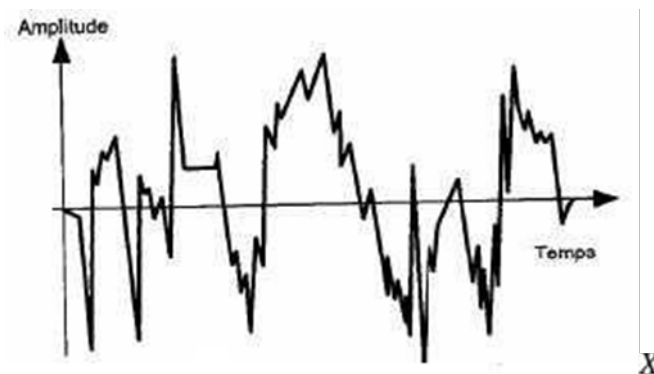


Figure II.6: Représentation d'un signal aléatoire [7]



Figure II.7: Exemple d'un signal transitoire et un signal aléatoire

$$X(t) = \sum [X_o * \sin(\omega_o * t + \phi_o)] \quad (2.3)$$

II.2.5. La nature des vibrations :

La nature des vibrations d'une machine tournante en fonctionnement peut être classée comme suit :

II.2.5.1. Vibrations périodiques :

Sinusoïdales simples (Figure II.8 a) ou complexes (Figure II.8 b), représentatives du fonctionnement normal ou anormal des organes mécaniques. Peuvent résulter de déséquilibres, désalignements, déformations, instabilités des paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, etc.

II.2.5.2. Vibrations périodiques impulsionnelles :

(Figure II.8 c) Caractérisées par des forces brutales, brèves et périodiques. Peuvent être causées par des événements normaux tels que les presses automatiques, les broyeurs à marteaux, les compresseurs à pistons, ou des événements anormaux comme l'écaillage de roulements, des défauts sur les engrenages, un jeu excessif.

II.2.5.3. Vibrations aléatoires impulsionnelles :

(Figure II.8 d) : Peuvent être générées par des défauts de lubrification sur les roulements, la cavitation d'une pompe, etc... [8].

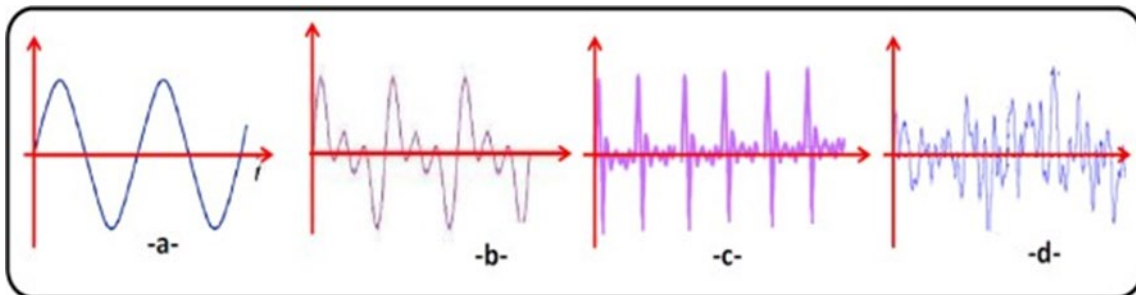


Figure II.8: La Nature des vibrations

II.2.6. Les outils de la surveillance et du diagnostic par l'analyse vibratoire :

Nous présentons dans ce paragraphe les différents outils de traitement du signal adéquats à la détection des défauts d'engrenages par l'analyse vibratoire. Il s'agit de décrire les outils principalement disponibles, tels que les méthodes fréquentielles (l'analyse spectrale, cepstrale, l'analyse du signal enveloppe, l'analyse du signal d'ondelette) et les méthodes temporelles tels que les indicateurs scalaires (facteur crête, RMS, kustosis).

II.2.6.1. Les outils du diagnostic :

II.2.6.1.1. Analyse spectrale :

L'analyse spectrale repose sur la transformation du signal dans le domaine des fréquences, offrant ainsi l'avantage d'identifier et d'isoler facilement certains composants fréquentiels d'intérêt par rapport à l'analyse temporelle. Cette méthode permet de mettre en évidence les différentes périodicités du signal d'origine [9], en appliquant la transformée de Fourier pour obtenir le spectre $X(f)$ de $x(t)$ selon l'équation donnée :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.4)$$

II.2.6.1.2. Analyse cepstrale :

L'analyse cepstrale est une méthode complémentaire d'analyse, qui comprend plusieurs variantes, les plus courantes étant le cepstre complexe [9], défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal du module de la transformée de Fourier, représenté par l'équation :

$$C = TF^{-1}[\text{Ln } |X(f)|] \quad (2.5)$$

Et le cepstre de puissance, défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal du module carré de la transformée de Fourier du signal, comme indiqué dans l'équation :

$$C = TF^{-1} [\text{Ln } |X(f)|]^2 \quad (2.6)$$

II.2.6.1.3. Analyse d'enveloppe :

La technique repose sur la transformée d'Hilbert, un outil largement employé dans le diagnostic des machines rotatives. Cette transformée génère un signal temporel complexe [10], $Z(t)$, défini comme :

$$Z[X(t)] = x(t) + jH[x(t)] \quad (2.7)$$

II.2.6.1.4. Analyse temp-fréquence :

L'analyse temps-fréquence harmonise les avantages de l'analyse spectrale et de l'analyse temporelle, en décrivant le signal vibratoire à la fois en termes de temps et de fréquence. Elle est une analyse précise qui permet de repérer des altérations inhabituelles dans la répartition fréquentielle d'une signature vibratoire à un moment spécifique du cycle. En outre, elle propose une solution pour distinguer des signatures vibratoires similaires qui se chevauchent dans le temps et/ou en fréquence.

Le développement de l'analyse temps-fréquence s'est concentré sur les signaux non stationnaires. L'approche traditionnelle de l'analyse temps-fréquence utilise des distributions

pour représenter l'énergie ou la puissance des signaux dans les deux dimensions du temps et de la fréquence, afin de mettre en lumière les meilleurs modèles de diagnostic [10].

II.2.6.1.5. Analyse de la cyclostationnarité :

En traitement du signal, il est courant de distinguer deux grandes catégories de signaux : les signaux stationnaires, dont les moments statistiques de la densité de probabilité sont indépendants du temps, et les signaux non-stationnaires, dont les moments statistiques varient avec le temps. Parmi ces derniers, on trouve une classe particulière appelée signaux cyclostationnaires. Un processus est qualifié de cyclostationnaire d'ordre η_c si tous ses moments statistiques jusqu'à l'ordre η_c dépendent du temps de manière périodique avec une période T. Un signal stationnaire se caractérise par le fait qu'il ne contient que des composantes fréquentielles décorréelées, car son autocorrélation ne varie pas avec le temps.

II.2.6.2. Les outils de surveillance :

II.2.6.2.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) :

Le RMS est largement utilisé dans l'industrie en raison de sa simplicité et de sa rapidité. Une variation excessive du niveau RMS indique généralement un changement de l'état de fonctionnement, pouvant conduire à une défaillance. Cependant, l'un des principaux inconvénients du RMS est son retard dans la détection des défauts, notamment pour les roulements, où les variations du signal sont masquées par d'autres composantes d'amplitude plus élevée [11].

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad (2.8)$$

II.2.6.2.2. Facteur de crête :

Le facteur crête (FC) est un indicateur plus spécifique qui permet d'examiner de près le signal vibratoire. En surveillant le facteur crête, on peut détecter les défauts plus tôt en mesurant le rapport entre la valeur maximale du module du signal (valeur crête) et la valeur efficace, comme le montre l'équation [11] :

$$FC = \frac{V_C}{V_{RMS}} \quad (2.9)$$

$$V_C = 20 \log \left(\frac{Am}{\sigma_x} \right) \quad (2.10)$$

II.2.6.2.3. Le kurtosis :

Le Kurtosis est une mesure statistique utilisée spécifiquement dans la détection des défauts de roulements. Il permet d'analyser la forme du signal en indiquant s'il est pointu ou plat. Le Kurtosis est dérivé du moment statistique d'ordre quatre et est défini comme le rapport de la valeur moyenne du signal élevée à la puissance 4 sur le carré de son énergie. Une distribution gaussienne a un Kurtosis de 3, ce qui est la référence pour évaluer le degré d'aplatissement par rapport à une distribution normale.

$$K_U = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma_x^4} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_1^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (2.11)$$

Cet indicateur adimensionnel permet de caractériser l'aplatissement d'une distribution de signal vibratoire, indépendamment des variations de vitesse de rotation et de charge de la machine [8].

II.3. Synthèses bibliographiques :

Djebala.A,et al [12] , ont proposé une méthodologie pour optimiser l'utilisation des indicateurs scalaires dans la surveillance vibratoire des machines tournantes, afin de détecter les défauts induisant des forces impulsives, comme ceux des roulements et des engrenages. L'objectif est de choisir un indicateur sensible aux chocs et d'optimiser les paramètres pour assurer la fiabilité de la détection. La validation expérimentale, réalisée sur des roulements défectueux, confirme que le choix approprié des paramètres améliore la sensibilité du kurtosis. Les résultats montrent qu'une vitesse de rotation faible, une large bande de fréquence, et un filtrage passe-bande aux hautes fréquences maximisent le kurtosis, permettant une détection précoce des défauts.

M.Nabti [13], ont fait une étude sur l'évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques. L'objectif était de maîtriser les techniques d'analyse spectrale, cepstrale, d'enveloppe et de kurtosis spectral, et de valider les résultats sur des signaux de roulements et de boîtes de vitesses d'un hélicoptère de la NAVY - Université de Pennsylvanie. Plusieurs méthodes de traitement du signal pour la surveillance et le diagnostic

basés sur des mesures vibratoires ont été présentées et classées : analyse temporelle, analyse de Fourier, analyse cepstrale, analyse d'enveloppe, analyse temps-fréquence et kurtosis spectral. L'analyse cepstrale, qui améliore la détection des défauts de type choc sur les réducteurs à engrenages, permet de détecter les défauts et d'identifier la roue endommagée. Le kurtosis spectral, une nouvelle technique pour diagnostiquer les défauts de roulement, est également utilisé pour déterminer la meilleure bande de démodulation pour l'analyse d'enveloppe.

I.Touafek [14], ont étudié l'extraction d'indicateurs robustes pour diagnostiquer les défauts mécaniques, en se concentrant sur des indicateurs statistiques (kurtosis, facteur de crête, valeur efficace) et spectraux (analyse de Fourier, analyse d'enveloppe). Des méthodes d'ondelettes et de décomposition en mode empirique (EMD) ont été utilisées pour prétraiter les données et améliorer la sensibilité des indicateurs. L'étude visait à évaluer la robustesse des indicateurs face aux variations et au bruit, ainsi qu'à appliquer des prétraitements pour augmenter leur sensibilité. Les résultats montrent que le kurtosis et le facteur de crête sont plus sensibles que la valeur efficace, avec le kurtosis étant le plus sensible pour détecter les défauts.

II.4. Conclusion

L'analyse vibratoire est une technique essentielle pour le diagnostic et la surveillance des systèmes mécaniques.

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la définition de l'analyse vibratoire, de ses caractéristiques, signaux, types et nature des vibrations et de son lien étroit avec la maintenance préventive.

Enfin, nous avons parlé de synthèses bibliographiques sur l'analyse vibratoire.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical line on the left and a horizontal line at the top and bottom. The corners are rounded with scroll-like flourishes.

CHAPITRE III

***ETUDE SUR LES
ENGRENAGES ET
SYNTHESES
BIBLIOGRAPHIQUES***

III.1. Introduction :

Le but de tout système mécanique est de transférer et d'ajuster l'énergie mécanique d'une source d'énergie vers une application spécifique. Parmi les systèmes de transmission mécanique de puissance, on trouve des engrenages cylindriques ou coniques, des systèmes roues et vis-sans-fin, des systèmes roues-crémaillères contenu dans l'équipement d'entraînement tels que les moteurs, les générateurs et les pompes

Cet équipement est des dispositifs essentiels dans de nombreuses applications industrielles. Une panne inattendue de la pompe à engrenages peut avoir un effet significatif sur ses performances. Il y aura donc des pertes économiques. En conséquence, le diagnostic des défauts dans les engrenages a fait l'objet de recherches intensives, parce qu'il est vulnérable à de nombreux problèmes physiques tels que des piqûres, des éraflures, des effritements, des fissures, de l'usure et un jeu excessif [15]. Ces problèmes peuvent provoquer un déséquilibre du rotor et un niveau de vibrations élevé.

Ce chapitre a été consacré à une meilleure compréhension de ces aspects. Nous avons commencé par définir les engrenages, suivis de leurs avantages et inconvénients, puis nous avons présenté leurs types et leurs caractéristiques géométriques Enfin, nous avons évoqué une synthèse bibliographique des engrenages.

III.2. Les engrenages :

III.2.1. Définition :

Un engrenage est un des mécanismes élémentaires les plus utilisés pour transmettre du mouvement, et adapter les vitesses de rotation entre organes moteurs et récepteurs. Il est constitué de deux roues dentées : la petite roue se nomme le pignon, la grande roue à denture externe s'appelle la roue et la grande roue à denture interne s'appelle la couronne. Mobiles autour d'axes de rotation, et dont l'une entraîne l'autre par l'action de dents successivement en contact. Une distinction essentielle se rapporte à la position relative des axes entre lesquels il s'agit d'établir une transmission de mouvement, à ce nouveau point de vue, trois cas sont possibles [16].

III.2.2. Les avantages des engrenages :

- Les engrenages maintiennent un rapport de vitesse constant au cours du temps, on parle d'une transmission de puissance homocinétique et cela quel que soit la charge.
- Transmission de puissance des plus petites aux plus grandes machines.
- Disposition quelconque des axes des roues, même si les axes parallèles restent la meilleure solution.
- Sécurité de service et durée de vie élevée.
- Entretien restreint (graissage).
- Compacité et encombrement faible.

III.2.3. Les inconvénients des engrenages :

- Prix de revient relativement élevé (par rapport à d'autres solutions).
- Niveau sonore parfois gênant (dépend du type d'engrenages).
- Transmission rigide entre les arbres.
- Amortissement peu efficace des à-coups et des vibrations.
- Interchangeabilité limitée (même module nécessaire).

III.3. Les différents types des engrenages :

Les divers types d'engrenages courants peuvent être classés par catégorie comme suit :

- a. Les engrenages à axes parallèles (les 2 arbres sont parallèles).
- b. Engrenage à axes concourants (les 2 arbres sont tels que leurs prolongements se Coupent).
- c. Engrenage gauche (les 2 arbres occupent une position relative quelconque).

III.3.1. Les engrenages à axes parallèles (engrenages cylindriques) :

Les engrenages reliant des axes parallèles représentent les types les plus simples de mécanismes de transmission. Leur fabrication est généralement relativement facile, et malgré leur simplicité, ils sont capables de transmettre efficacement de grandes quantités de puissance avec un rendement élevé.

III.3.2. Engrenage cylindrique à denture droite :

Les engrenages droits sont employés pour relier des arbres parallèles. Ils peuvent être visualisés comme deux surfaces cylindriques en contact, dont les circonférences sont modifiées pour incorporer des dents. Ces dents s'engrènent les unes dans les autres, permettant une transmission par glissement tout en maintenant un rapport de vitesse constant de 1 entre la roue motrice et la roue menée.

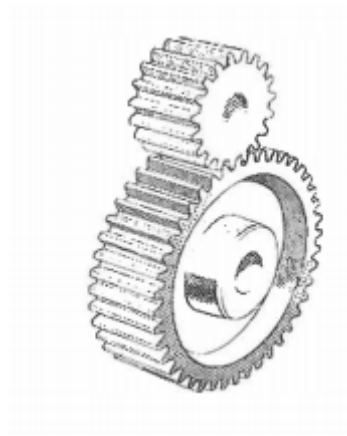


Figure III.1: Caractéristiques d'une denture [17]

III.3.2.1. Caractéristiques des dentures :

Le cercle primitif est celui représentant le diamètre de la roue de friction. Le cercle de tête est le diamètre extérieur de la roue dentée au sommet des dents, le cercle de pied est à la base des dents :

Cercle de tête = cercle de pied + 2 x hauteur des dents

III.3.3. Engrenage cylindrique à denture hélicoïdale :

Autre sorte d'engrenages droits, caractérisés par des dents en spirale plutôt que cylindriques. Une roue dentée à chevrons comporte deux rangées de dents inclinées en directions opposées. Ce type de denture. présente l'avantage d'être plus silencieux que la denture droite, réduisant ainsi les vibrations et améliorant le confort d'utilisation.

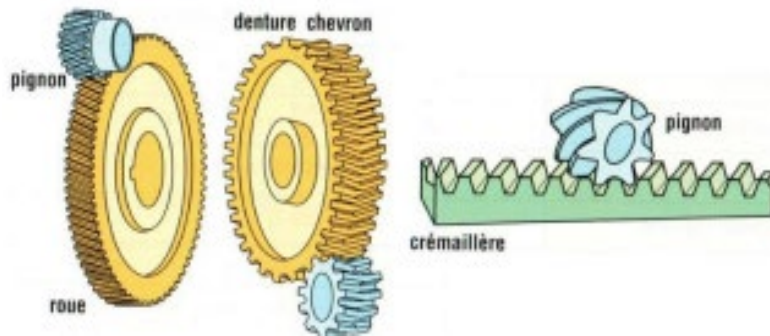


Figure III.3: Engrenages hélicoïdaux [18]

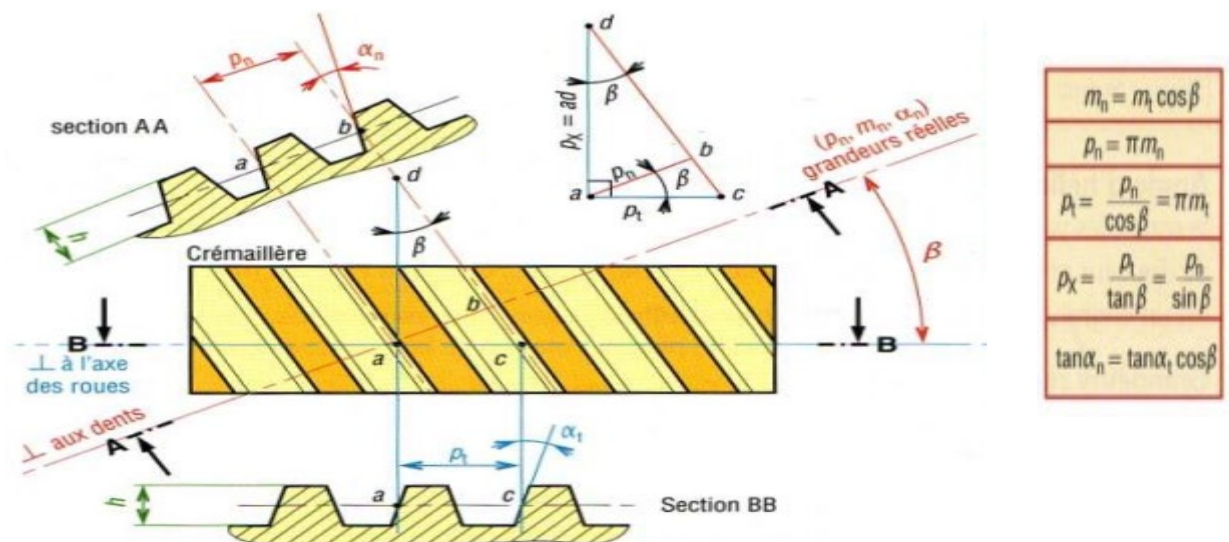


Figure III. 4: Caractéristiques des engrenages à denture hélicoïdale

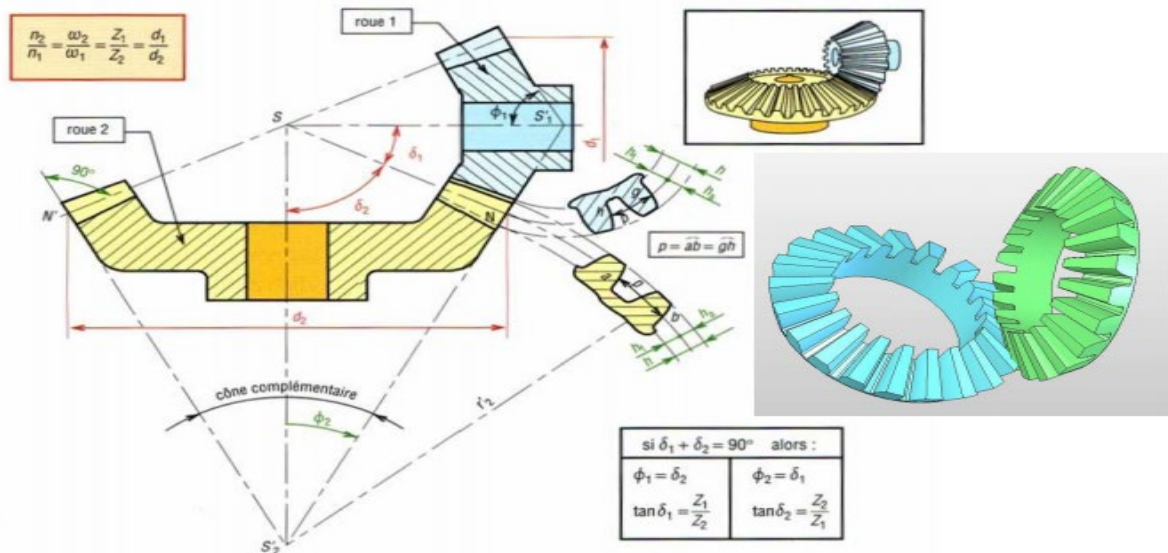
Désignation	symbole	Formule
Module réel	M	Par un calcul de RDM
Nombre de dent	Z	par le rapport des vitesses
Angle d'hélice	β	Entre 20° et 30°
Module apparent	m_t	$m_t = m_n \div \cos \beta$
Pas apparent	p_t	$p_t = p_n \div \cos \beta$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi m_n$
Diamètre primitif	d	$d = m_t Z$
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d + 2m_n$
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d - 2,5m_n$
Saillie	h_a	$h_a = m_a$
Creux	h_f	$h_f = 1,25m_n$
Hauteur de dent	h	$h = 2,25m_n$

Tableau III. 2: Les caractéristiques des engrenages cylindriques à denture hélicoïdales

III.3.4. Engrenage à axes concourants (engrenage conique) :

Un engrenage concourant se caractérise par des axes qui se croisent en un point commun. Dans ce type d'engrenage, les cônes primitifs de fonctionnement roulent sans glisser l'un sur l'autre.

Les engrenages coniques facilitent la transmission du mouvement entre deux arbres concourants, où le point de rencontre est nécessairement le sommet des deux cônes primitifs. Ainsi, chaque rapport de vitesse d'un couple conique est associé à un unique couple de surfaces coniques conjuguées, sans nécessiter de changement simultané des deux engrenages. La figure III.5 illustre ce type d'engrenage conique ou à axes concourants.



IFigure III.5: Caractéristiques des engrenages coniques à denture droite [19]

Caractéristique	Symbole ISO	Observations, définitions formules
vitesse angulaire	ω	en rad.s^{-1} ; $\omega = \pi N/30$
nombre de tours	n	n en tours par minute ou tr. min^{-1} ;
nombre de dents	Z	$Z_1(\text{roue1})$ et $Z_2(\text{roue 2})$
module	m	nombre normalisés : voir tableaux des valeurs des engrenages droits à dentures droites
pas (pas primitif)	p	$p = \pi m$ (remarque $p_1 = p_2 = p$)
angle primitif	δ	$\delta_1(\text{roue1})$, $\delta_2(\text{roue 2})$
rayon primitif	r	$r_1 = \frac{1}{2}mZ_1 = \frac{1}{2}d_1$; $r_2 = \frac{1}{2}mZ_2 = \frac{1}{2}d_2$
diamètre primitif	d	$d_1 = mZ_1$; $d_2 = mZ_2$
angle de pression	α	valeur usuelle: $\alpha = 20^\circ$
angle de tête	δ_a	$\delta_a = \delta + \theta_a$
angle de pied	δ_f	$\delta_f = \delta - \theta$
angle saillie	θ_a	$\tan \theta_a = 2m \cdot \sin \delta / d$
angle de creux	θ_f	$\tan \theta_f = 2.5m \cdot \sin \delta / d$
angle de hauteur	θ	$\theta = \theta_a + \theta_f$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m \cdot \cos \delta$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2.5m \cdot \cos \delta$
saillie	h_a	$h_a = m$
creux	h_f	$h_f = 1,25m$
hauteur de dent	h	$h = 2,25m = h_a + h_f$
Longueur génératrice primitive	L	$L = d_1/2 \sin \delta_1 = d_2/2 \sin \delta_2$
largeur de dent	b	$L/4 \leq b \leq L/3$ (raisons de taillage)
δ_1 Erreur défini. + $\delta_2 = 90^\circ$! Signet non	$\delta_1 + \delta_2 > 90$ $\delta_2 < 90$

Tableau III.3: Les caractéristiques des engrenages coniques

III.3.5. Engrenage gauche (système roue et vis sans fin) :

Les engrenages de cette catégorie sont souvent les plus complexes à concevoir et à fabriquer en raison de leur géométrie plus avancée. Cependant, les types plus simples, discutés précédemment, sont relativement faciles à fabriquer et abordables. Malgré leur accessibilité, ils ne sont pas adaptés pour supporter des charges importantes.

La vis sans fin, caractérisée par un cylindre étroit avec des dents en hélice, s'engage avec une roue à denture hélicoïdale. Contrairement aux engrenages classiques, les dents de la vis sans fin glissent continuellement sur celles de la roue, ne leur appliquant pas de force de rotation directe. Leur fonction principale est de réduire la vitesse lors de la transmission de rotation entre deux axes orthogonaux.

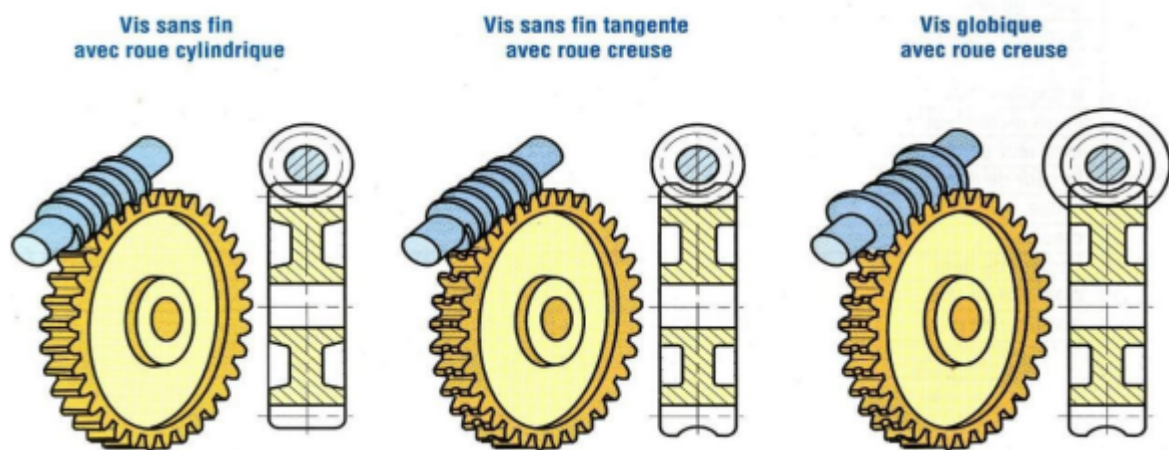


Figure III.6: Engrenages roues et vis sans fin [18]

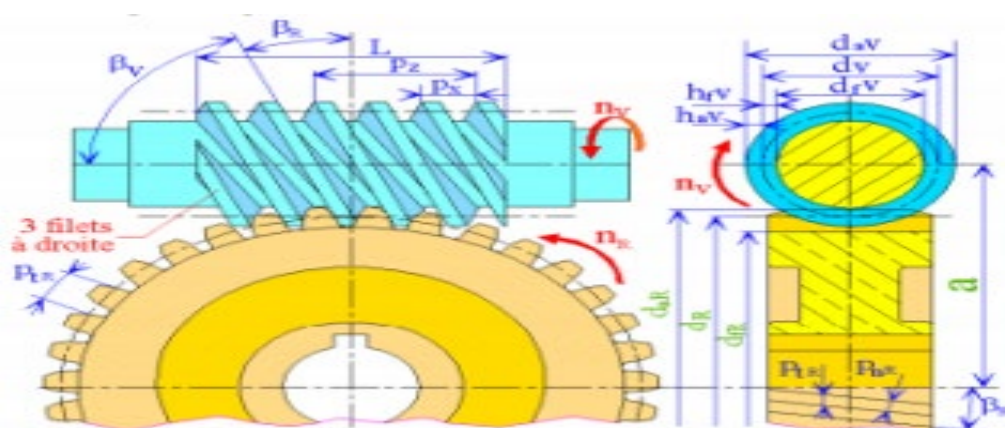


Figure III. 7: Caractéristiques des engrenages roues et vis sans fin.

Désignation	symbole	valeur
Module réel	M	Par un calcul de RDM
Nombre de filets	Z	par le rapport des vitesses
Angle d'hélice	β	Entre 20° et 30°
Module axial	m_x	$m_x = m_n \div \cos \gamma$
Pas axial	p_x	$p_x = p_n \div \cos \gamma$
Pas réel	p_n	$p_n = \pi m_n$
Pas de l'hélice	p_z	$p_z = p_x Z$
Diamètre primitif	d	$d = p_z \div \pi \tan \gamma$
Diamètre extérieur	d_a	$d_a = d + 2m_n$
Diamètre intérieur	d_f	$d_f = d - 2,5m_n$
Longueur de la vis	L	$4p_x < L < 6p_x$

Tableau III.4: Les caractéristiques des engrenages roues et vis sans fin

III.3.6. Engrenage à roue et crémaillère :

Le mécanisme de crémaillère et de pignon est utilisé pour convertir le mouvement rotatoire en mouvement linéaire, et vice versa. Il repose sur l'engrènement d'un pignon droit rond (le pignon) avec une crémaillère dotée de dents alignées le long d'une ligne droite.

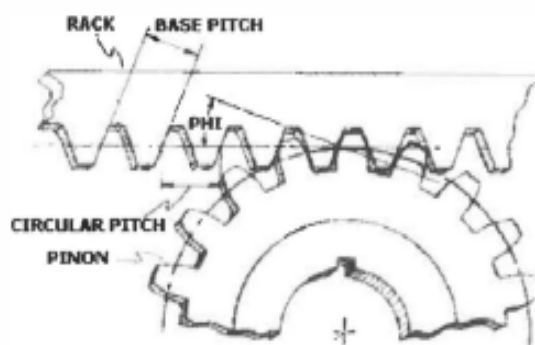


Figure III.8: Engrenages à crémaillère et pignon [17]

III.4. Profil des dents :

Les dents des roues dentées doivent garantir un contact continu entre les deux roues, permettant ainsi une rotation fluide de l'une par rapport à l'autre, sans perturber le fonctionnement de l'engrenage. Il est important de noter que le profil d'une dent de roue dentée n'est ni une droite ni un arc de cercle, mais plutôt une forme complexe conçue pour assurer une transmission efficace de la puissance tout en minimisant l'usure et les contraintes mécaniques.



Figure III.9: Profil d'une dent en comparaison avec une droite et un arc de cercle [19]

III.5. Ligne d'engrènement ou ligne d'action :

La ligne d'action des dents de roue est tangente aux deux cercles de base et supporte en permanence l'effort de contact entre les deux roues. Le point de contact (M) entre les dents est toujours situé sur cette ligne et est perpendiculaire à la ligne T_1T_2 . Ce contact entre les dents est caractérisé par un mélange de roulement et de glissement. [20] [18].

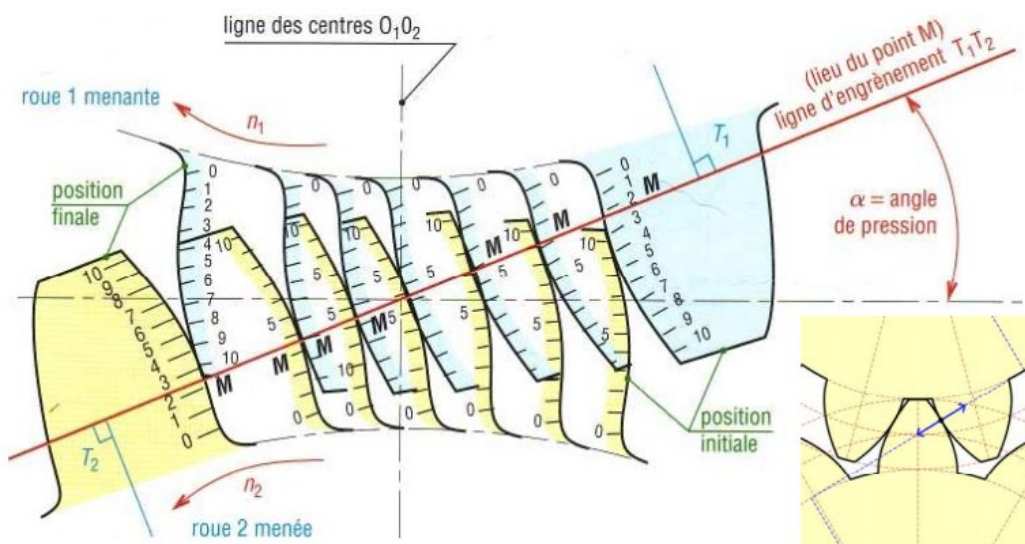


Figure III.10: Positions successives de deux dents en contact au cours de l'engrènement

III.6. Cycle de fonctionnement d'un engrenage parallèle extérieur a denture droite :

III.6.1. Début de l'engrènement :

Le point de contact 'A' marque le commencement de l'engrènement, étant l'intersection entre la ligne d'action et le cercle primitif du pignon mené. (Figure III.11)

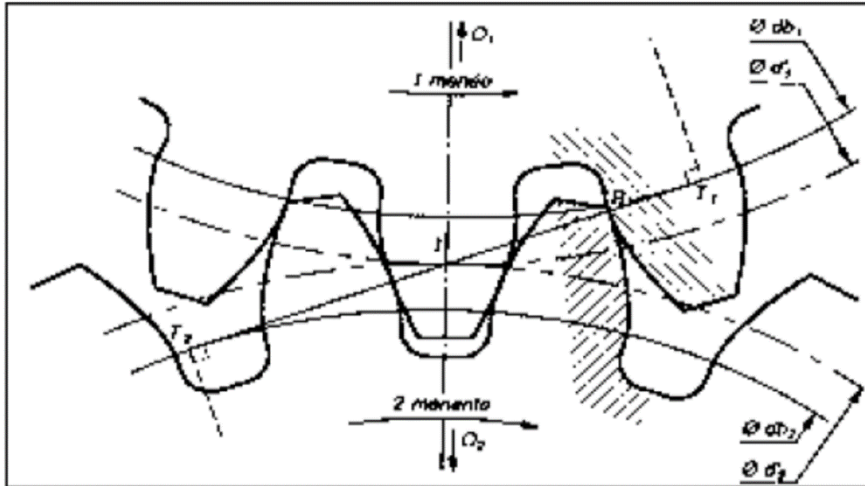


Figure III.11: Début de l'engrènement [21].

III.6.2. Début du contact unique :

Le point V marque le début du contact unique, indiquant que la dent précédente se sépare du contact avec le pignon 1. (Figure III.12)

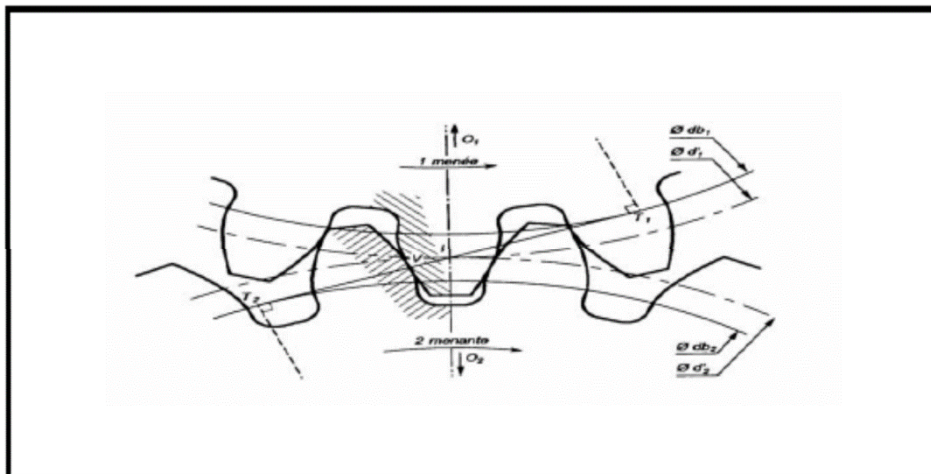


Figure III.12: Début de contact unique [21].

III.6.3. Fin du contact unique :

Le point W marque la fin du contact unique, marquant le moment où la dent suivante entre en contact avec le pignon 1. (Figure III.13)

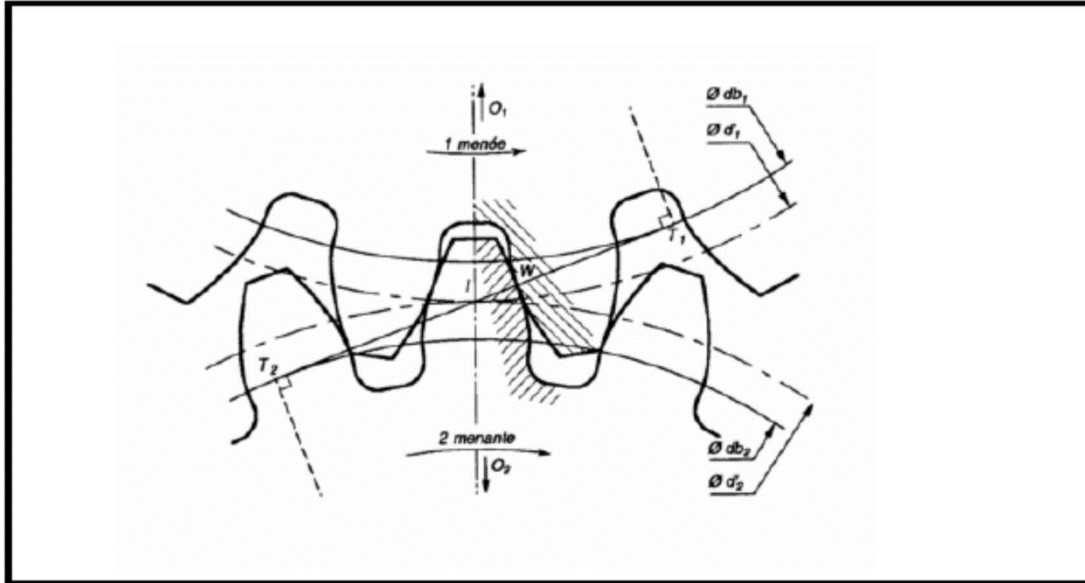


Figure III.13: Fin de contact unique [21].

III.6.4. Fin de l'engrènement :

Le point B marque la fin de l'engrènement, étant l'intersection entre la droite d'action et le cercle de tête de la roue menante. (Figure III.14)

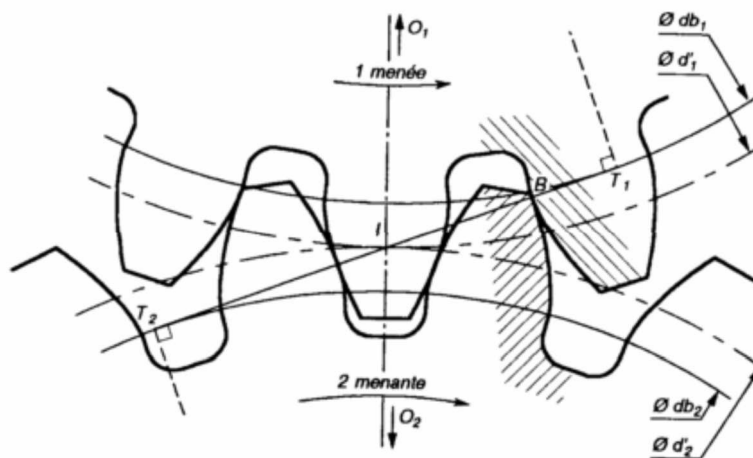


Figure III.14: Fin de l'engrènement [21].

III.7. Période d'approche et de retraite :

La période d'approche est définie comme la phase pendant laquelle le point de contact C entre une paire de dents sur la ligne d'action se déplace de T1 à O, c'est-à-dire du début du contact jusqu'au point primitif. La période de retraite est définie comme la phase pendant

laquelle le point de contact C entre une paire de dents sur la ligne d'engrènement se déplace de O à T2, c'est-à-dire du point primitif jusqu'à la fin du contact.

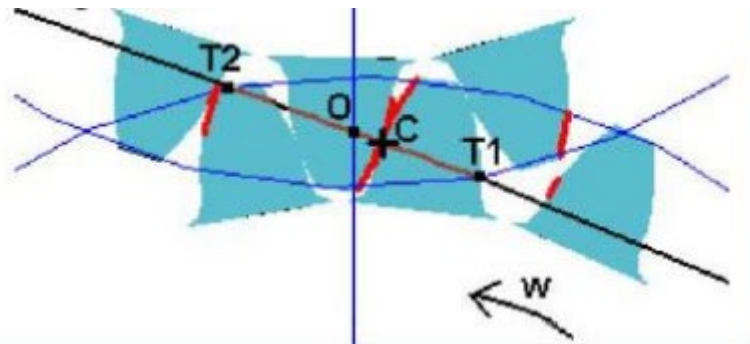


Figure III.15: Approche et retraite dans un couple d'engrenage [22].

III.8. Efforts sur les dentures :

La figure III.16 présente un engrenage entre la roue et le pignon. L'action de la denture du pignon sur la roue se traduit par une force $F_{2/1}$ dirigée suivant la normale commune aux dentures en leur point de contact.

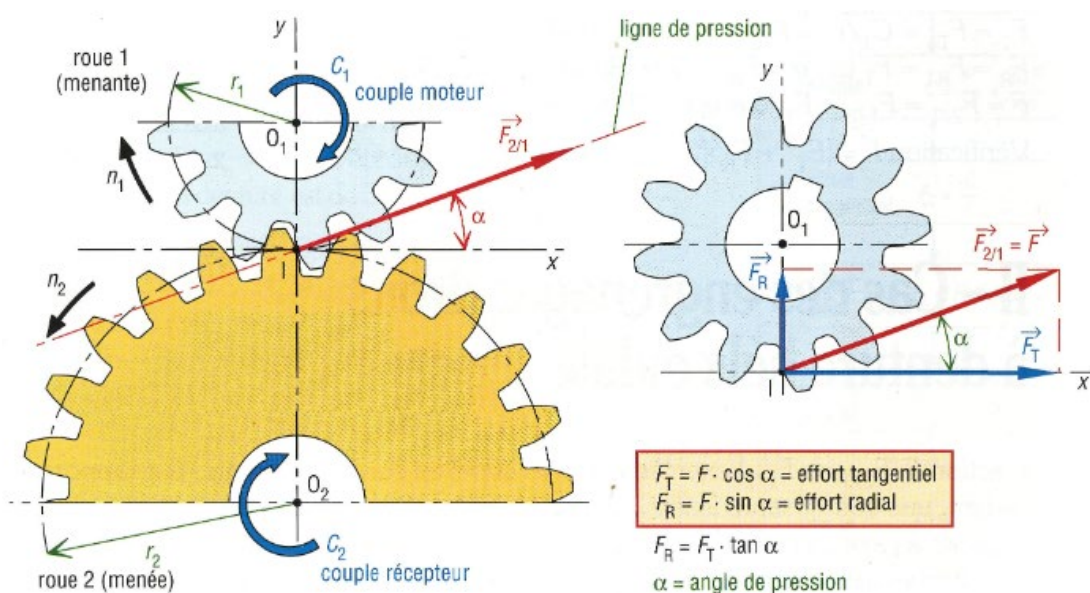


Figure III.16: Efforts sur une denture droite [20]

$F_{2/1}$: a comme support la ligne d'action et elle se décompose en une force tangentielle F_T et une force radiale F_R .

III.8.1. Action de contact $F_{2/1}$:

Elle schématise l'action exercée par la roue 2 sur la roue 1. Elle est toujours portée par la ligne de pression.

III.8.2. Effort tangentiel F_T :

Il est obtenu en projetant $F_{2/1}$ sur la tangente en I aux cercles primitifs. F_T est à l'origine du couple transmis.

$$F_T = F_{2/1} \cdot \cos \alpha / C1 = F_T \cdot r_1 / C_2 = F_T \cdot r_2$$

III.8.3. Effort radial F_R :

Perpendiculaire à F_T , il est obtenu en projetant $F_{2/1}$ sur O_1O_2 . Parfois appelé effort de séparation, il ne participe pas à la transmission du couple son action a tendance à séparer les deux roues et se traduit par un fléchissement des arbres.

$$F_R = F_{2/1} \cdot \sin \alpha$$

III.9. Interférence de fonctionnement :

Lorsqu'un pignon avec peu de dents (et donc des creux de denture étroits) s'engage avec une roue ayant beaucoup de dents (et donc des sommets de dent larges), le fonctionnement peut devenir impossible si les sommets des dents de la roue ne peuvent pas se déplacer dans les creux de denture du pignon. Dans cette situation, on parle d'une interférence de fonctionnement.

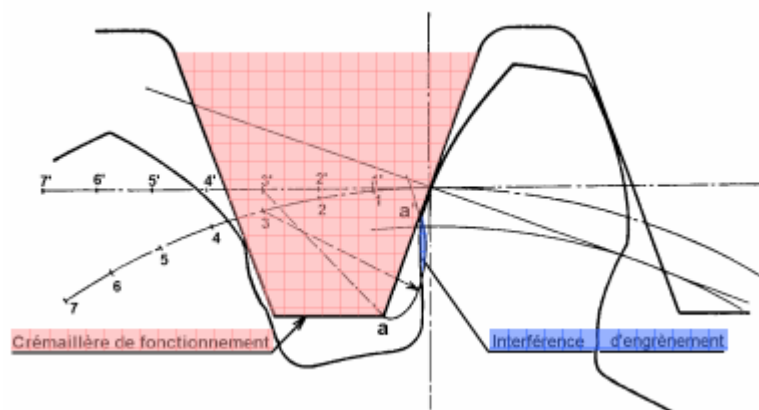


Figure III.17: Interférence de fonctionnement

III.9.1. Principe de l'interférence : [23]

Pendant l'engrènement, le contact entre les dents suit la ligne d'action ($T_1 T_2$), inclinée à l'angle de pression (α) par rapport à la tangente commune aux deux cercles primitifs au point de contact I. Lorsque le nombre de dents du pignon est réduit, la couronne principale du pignon peut sortir de la ligne d'action, entraînant une interférence dans l'engrènement. Ce phénomène est influencé par l'angle de pression (α). Pour un angle de 20° , il survient lorsque le pignon a

moins de 17 dents et la roue en a plus de 17, ou lorsque le pignon a moins de 13 dents, quel que soit le nombre de dents de la roue.

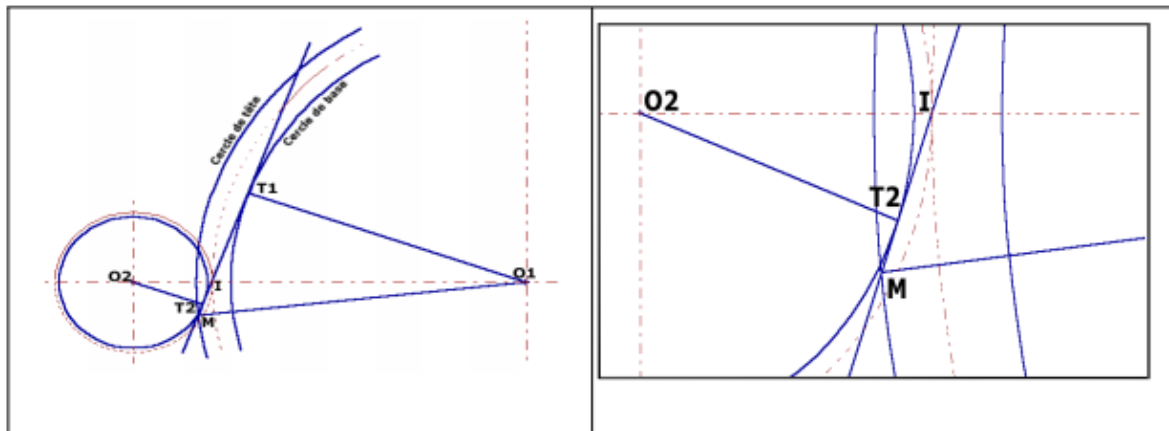


Figure III.18: Détail de la zone de contact d'interférence

III.10. L'apparition des défauts des engrenages :

Les défauts peuvent se manifester par des variations dans l'amplitude ou la fréquence des composantes cinématiques, comme la rotation ou l'engrènement. Ces variations produisent des bandes latérales de faible amplitude autour des composantes dans le domaine spectral. L'augmentation de la puissance du signal est minime pour les modulations d'amplitude dues à des défauts d'excentricité et nulle pour les modulations de fréquence causées par des fluctuations périodiques de couple ou de vitesse.

III.11. Défauts des engrenages :

III.11.1. Défauts de fabrication :

III.11.1.1. Défaut de taillage :

La précision des engrenages taillés dépend particulièrement des erreurs d'exécution suivantes :

- Conception de la machine.
- État de la machine.
- L'exactitude géométrique des outils.
- Conception des montages.

III.11.1.2. Erreur de pas :

C'est le défaut de localisation angulaire d'une dent par rapport à sa position théorique. Deux grandeurs représentatives de la qualité de réalisation d'un engrenage sont associées à cette erreur : l'erreur de pas individuelle et l'erreur de pas cumulée.

III.11.2. Défauts de rectification :

Une opération de rectification avec une avance ou une profondeur de passe excessive peut provoquer des criques dues à un échauffement localisé, pouvant amorcer des ruptures, notamment au pied des dents et dans le sens longitudinal.

III.11.3. Défauts de montage :

- Défaut d'alignement ou de parallélisme.
- Les défauts d'excentricités.[24]

III.11.4. Défauts de fonctionnement :

On peut principalement distinguer deux catégories de défauts : ceux qui affectent l'ensemble des dents, tels que l'usure et les piqûres, et ceux qui sont localisés sur des dents spécifiques, comme la fissuration et l'écaillage. Les défauts situés sur des dents particulières peuvent rapidement entraîner leur rupture, contrairement aux défauts courants tels que l'usure normale.

III.11.4.1. Défauts répartis sur toutes les dents :

III.11.4.1.1. L'usure :

L'usure, causée par le frottement entre deux surfaces, est influencée par la charge, la vitesse de glissement et les éléments abrasifs dans le lubrifiant. L'usure normale progresse graduellement et diminue avec la dureté de la denture, tandis que l'usure anormale, due à un lubrifiant contaminé ou corrosif, peut entraîner des dysfonctionnements ou la défaillance de l'engrenage.

L'usure normale progresse lentement et n'affecte pas significativement la performance de l'engrenage pendant sa durée de vie attendue. En général, elle ne nécessite ni vérifications spécifiques ni suivi systématique, à moins qu'un changement notable ne soit observé après une période de fonctionnement définie.

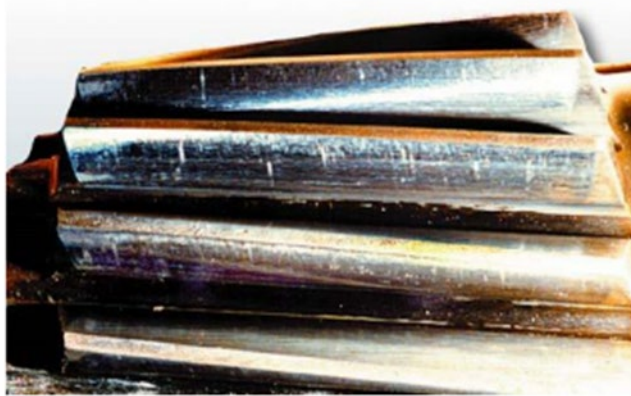


Figure III.19: Usure normale

L'usure anormale, causée par la contamination ou la corrosion du lubrifiant, peut entraîner un dysfonctionnement de l'engrenage.

Une usure excessive nécessite une enquête approfondie sur ses causes avant de remplacer les composants endommagés pour éviter la répétition du problème. Il est essentiel d'examiner la nature, la consistance, la viscosité du lubrifiant et son application dans les zones de contact.



Figure III.20: Usure excessive

III.11.4.1.2. Les piqûres (pitting) :

La piqûre se manifeste par des creux peu profonds sur toutes les dents d'un engrenage, principalement en acier de faible dureté. Elle est moins probable avec un lubrifiant de haute viscosité et survient lorsque le film lubrifiant est trop fin par rapport à la rugosité des surfaces, entraînant des contacts entre les aspérités.



Figure III.21: La piquûre [25]

III.11.4.2. Défauts localisés sur certaines dents :

III.11.4.2.1. L'écaillage :

L'écaillage, caractérisé par des trous plus profonds et étendus que ceux des piquûres, est typique des engrenages cémentés utilisés pour transmettre des couples élevés avec des dimensions réduites. Contrairement à l'usure, ces engrenages montrent peu de signes d'usure, mais l'écaillage évolue rapidement vers la rupture, principalement en raison d'une pression superficielle excessive.



Figure III.22: L'écaillage [25]

III.11.4.2.2. Le grippage :

Le grippage, causé par la rupture soudaine du film d'huile sous chaleur due au frottement, est accentué par des vitesses élevées, des modules importants, et un faible contact entre les dents. L'état du lubrifiant et les conditions de fonctionnement influencent également sa probabilité.

- **Le grippage à froid :**

Le grippage à froid survient lorsque des pressions de contact élevées se combinent avec de faibles vitesses de glissement. Il est généralement dû à un manque de lubrifiant et est accentué par une surface de contact inadéquate, favorisant la formation de microsoudures et l'aggravation du grippage.

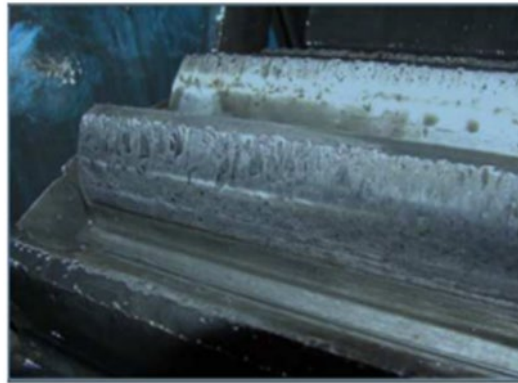


Figure III.23: Grippage à froid [25]

- **Le grippage à chaud :**

La coloration de surface est souvent due à une rupture du film d'huile causée par un échauffement excessive, surtout dans les zones à forte vitesse de glissement. Si ces traces restent légères et peu profondes, elles peuvent être acceptables car elles s'atténuent avec le temps. Cependant, si elles deviennent plus graves, elles peuvent entraîner des dommages et même la rupture des dents de l'engrenage à court terme. Il est donc essentiel de surveiller de près ces marques pour prévenir des dommages plus importants [10].



Figure III.24: Grippage à chaud [25]

III.11.4.2.3. Fissuration :

La fissuration évolue progressivement à chaque charge, souvent commençant près du pied de la dent. Elle est fréquente sur des aciers fins renforcés par traitement thermique, sensibles aux contraintes concentrées. Ces fissures résultent de contraintes dépassant la limite de fatigue du matériau.

III.12. L'influence des défauts d'engrenages sur la structure des signaux :

Les engrenages sont les principaux composants de la transmission de puissance, leur défaillance affecte les vibrations du système. Les vibrations générées par les engrenages ont de grandes amplitudes.

Même en l'absence de défauts, l'impact de chaque intervention se traduira par des vibrations induites par des chocs.

Les défauts d'usinage des dents, les déformations d'arbre provoquent une modulation d'amplitude, alors que les variations de vitesse (usure des dents de l'engrenage) entraînent une modulation de phase. Ces phénomènes existent même pour un engrenage sain. Le spectre présente alors des raies de modulation sur une bande étroite autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques.

III.13. Gravité des défauts des engrenages :

La difficulté avec les engrenages réside dans l'évaluation de la gravité de leurs défauts. Même sur une machine en bon état, des images peuvent être observées. Seule l'augmentation des amplitudes des raies mentionnées permet de détecter une détérioration.

On peut néanmoins retenir deux règles toujours vérifiées :

- Si les amplitudes du peigne de raies ne dépassent pas celle de la fréquence centrale, f_e l'engrènement peut être considéré comme en bon état.
- Un zoom présentant une image dissymétrique des modulations autour de la fréquence centrale caractéristique d'un engrènement dégradé.

III.14. Fréquence d'engrènement :

Un engrenage est composé de deux roues dentées possédant un certain nombre de dents (noté Z) tournant à des vitesses différentes.

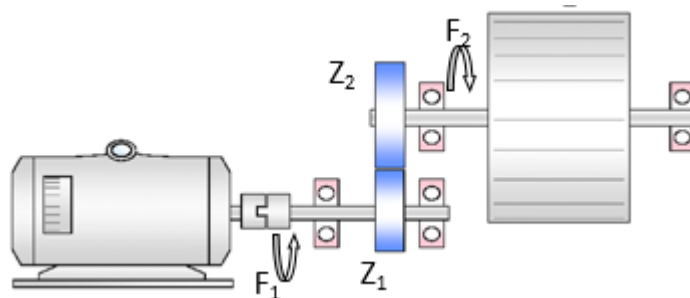


Figure III.25: réducteur à engrenage

Un réducteur ou un multiplicateur peut être composé de plusieurs engrenages. L'engrènement se fait au rythme d'engagement des dents selon une fréquence d'engrènement F_e égale à la fréquence de rotation multipliée par le nombre de dents : $F_e = Z \times F_{rot}$

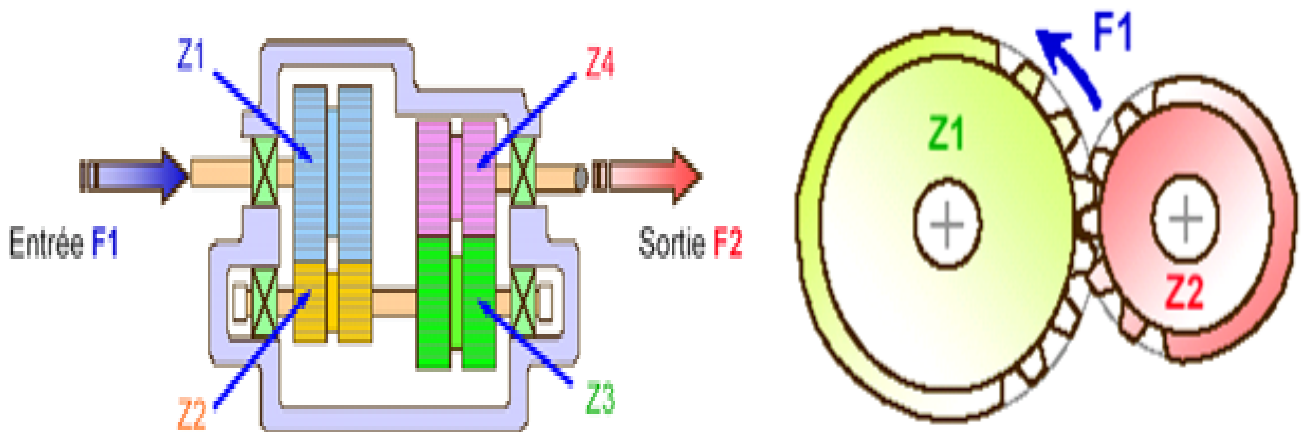


Figure III.26: engrènement de réducteur

Ici, l'arbre n°1 tourne à la fréquence de rotation F_1 .

$$\text{Donc } F_{e1} = Z_1 \cdot F_1 \tag{3.1}$$

L'arbre n°2 tourne à la fréquence de rotation F_2 .

$$\text{Donc } F_{e2} = Z_2 \cdot F_2 \tag{3.2}$$

Or F_2 et F_1 sont liés par le nombre de dent. Donc :

$$F_{e2} = Z_2 \cdot \frac{Z_1 \cdot F_1}{Z_2} = Z_1 \cdot F_1 = F_{e1} \tag{3.3}$$

$F_{e2} = F_{e1}$. Il n'y a qu'une seule fréquence d'engrènement pour un engrenage.

$$F_e = Z_2 \cdot F_1 = Z_1 \cdot F_2 \quad (3.4)$$

Si la denture est correcte et si aucun phénomène parasite ne vient perturber l'engrènement, le spectre vibratoire figure III.27 est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement F_e et ses harmoniques.

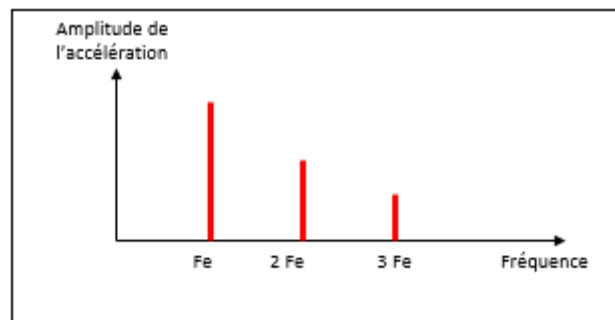


Figure III.27: Spectre théorique d'un engrenage sain [26]

Les défauts d'engrènement pouvant apparaître dans les engrenages sont de 2 sortes :

- Deterioration d'une dent
- Excentricité d'un pignon

III.14.1. Détérioration de dent :

Si l'une des roues possède une dent détériorée, il se produit un choc périodique à la fréquence de rotation de la roue considérée.

Le spectre montrera donc, non seulement la fréquence d'engrènement, comme précédemment, mais aussi et surtout un pic à la fréquence de rotation (par exemple F_1 si le défaut est sur la roue 1) et de nombreuses harmoniques.

Les nombreuses harmoniques de la fréquence constituent ce que l'on appelle un peigne de raie.

Elles sont dues au phénomène de chocs. Dès qu'un défaut se traduit par des chocs, cela se retrouve sur le spectre par un peigne de raie dont la fréquence est celle du défaut.

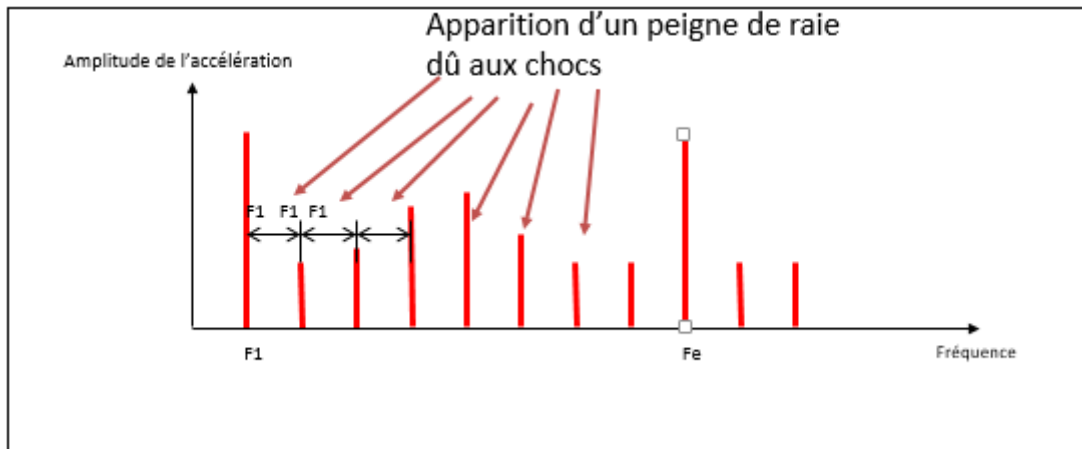


Figure III.28: Spectre théorique d'un engrenage présentant une dent détériorée [26]

III.14.2. Défaut d'excentricité :

Si l'arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou de faux rond, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation due à la modulation de l'effort d'engrènement.

L'image vibratoire théorique de ce type de défaut présente autour de la fréquence d'engrènement ou de ses harmoniques, des raies latérales dont le « pas » correspond à la fréquence de rotation de l'arbre qui porte le défaut.

C'est ce qu'on appelle des bandes latérales de modulation d'amplitude. Les amplitudes des bandes latérales sont généralement très faibles devant l'amplitude de la fréquence d'engrènement.

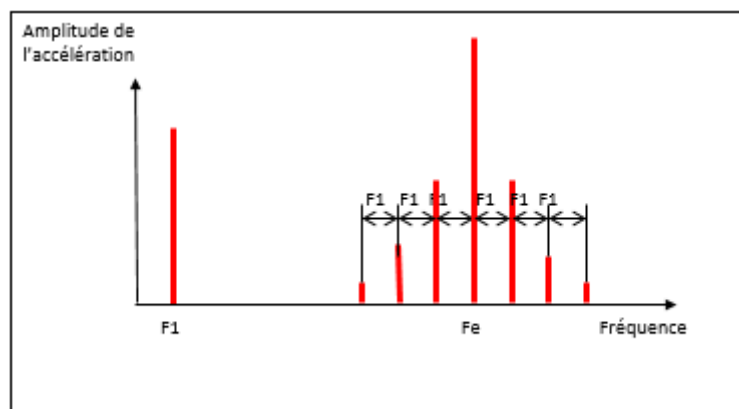


Figure III.29: Spectre théorique d'un engrenage présentant un défaut d'excentricité [26]

III.15. Synthèses bibliographiques :

Dans cette partie, nous présentons une synthèse de quelques travaux de recherches sur les défauts détectés sur les engrenages, sont les études qui ont étudié les défauts combiné :

A. Belsak, J. Flaker [27], ont mené une étude expérimentale pour améliorer la détection des fissures dans les racines des dents d'engrenages. Des fissures de fatigue ont été simulées sur deux engrenages droits avec des profondeurs de 4,5 mm et 1,1 mm, en utilisant un appareil d'essais dynamiques. Les paramètres de chargement ont été déterminés par la méthode des éléments finis. Les signaux vibratoires, captés par des accéléromètres sur les boîtiers des engrenages (un fissuré et un intact), ont été analysés par la transformée de Fourier à court terme (STFT). Les résultats montrent que la STFT est très efficace pour détecter les fissures, avec un taux de réussite de 75 % même en présence de bruit.

Benchaabane. C, et al [28], Ils ont proposé une méthodologie numérique et expérimentale pour la détection et le suivi vibratoire des défauts d'écaillage sur les dentures d'engrenage. Pour ce faire, des points de mesure situés sur les paliers de roulements du banc d'essai ont été utilisés, permettant une surveillance vibratoire efficace. L'analyse des signaux permettra de choisir les moyens de mesure et de traitement nécessaires à la définition d'indicateurs de défaillance, tels que l'analyse spectrale et les indicateurs scalaires (kurtosis, RMS, facteur de crête, etc.).

F. Chaari, T. Fakhfakh et M. Haddar [29], ont proposé d'analyser ou de simuler numériquement le comportement d'une transmission par engrenages droits simple étage, avec et sans défauts de denture localisés et répartis. Le modèle développé inclut un mode de corps rigide, représentant le roulement sans glissement et la transmission, et un mode élastique, résultant de la flexion des dents et causant des erreurs de transmission. La réponse dynamique du mode élastique est obtenue via un algorithme d'intégration numérique. La transmission est modélisée par un système à deux degrés de liberté à raideur variable dans le temps, influencé par la fréquence d'engrènement et ses harmoniques. La réponse du modèle montre une modulation d'amplitude des composantes de la fréquence d'engrènement, avec des raies latérales apparaissant autour de cette fréquence en cas de défauts localisés. Les techniques utilisées incluent l'analyse spectrale et le cepstre. Les résultats indiquent que l'analyse cepstrale est plus efficace pour détecter des défauts localisés, car elle extrait la fréquence de rotation de la roue avec le défaut, tandis que l'analyse spectrale suffit pour détecter des défauts répartis, signalés par une augmentation de l'amplitude de la réponse.

Spectra Quest Inc. (2007) [30], a mené un travail expérimental pour la simulation de dynamique de boîte de vitesses. Il s'agit d'étudier le diagnostic de défaut d'engrenage d'une transmission à engrenages parallèles à deux étages avec et sans charge. Trois défauts ont été commis : petite encoche de dents, grande encoche de dents et dents manquantes. Lorsque la charge est appliquée (dans les engrenages sains et défectueux), une amplitude de vibration plus élevée apparaît par rapport à la condition sans charge. Les dents ébréchées et les dents manquantes génèrent un impact à chaque révolution. Par conséquent, des bandes latérales autour des fréquences de maillage apparaissent. L'intervalle de fréquence est la vitesse de l'arbre d'entrée. Le niveau de gravité de la puce affecte les amplitudes de la bande latérale. Dans certains cas, les amplitudes des bandes latérales sont même supérieures à celle de la composante fréquentielle d'engrènement, ce qui est assez différent du comportement d'un engrenage sain.

III.16. Conclusion :

Il existe différents types d'engrenage permettant l'accomplissement des différents objectifs qui sont dictés par la spécificité de chaque installation industrielle.

Cette polyvalence fait de l'engrenage un élément essentiel pour toutes les industries il permet d'accomplir des travaux de précision ou des tâches qui demandent de la puissance.

Dans ce chapitre, nous avons parlé des types d'engrenages, notamment des engrenages cylindriques à denture droite : (définition, caractéristique des dentures, le fonctionnement, les efforts sur les dents, ...etc.). Ces efforts qui sont exercés sur la denture provoquent des avaries tels que usure, écaillage, fissure, rupture,...

A decorative border resembling a scroll, with rounded corners and a vertical strip on the left side that also has rounded ends. The border is drawn with a thin black line.

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction :

Les systèmes de surveillance ont pour fonction de détecter une détérioration du fonctionnement de la machine et d'identifier le composant endommagé. Le but est de limiter les interventions, qui immobilisent la machine et optimiser la périodicité des contrôles.

Dans ce chapitre, nous allons étudier des signaux vibratoires mesurés sur un banc d'essai dans le but de faire un diagnostic des défauts d'engrenages par les indicateurs scalaires.

IV.2. Analyse de la base CETIM :

Le diagramme de diagnostic du banc d'essai CETIM, présenté dans la figure 01, offre une structure hiérarchique pour évaluer la santé et les performances des systèmes mécaniques de manière méthodique.

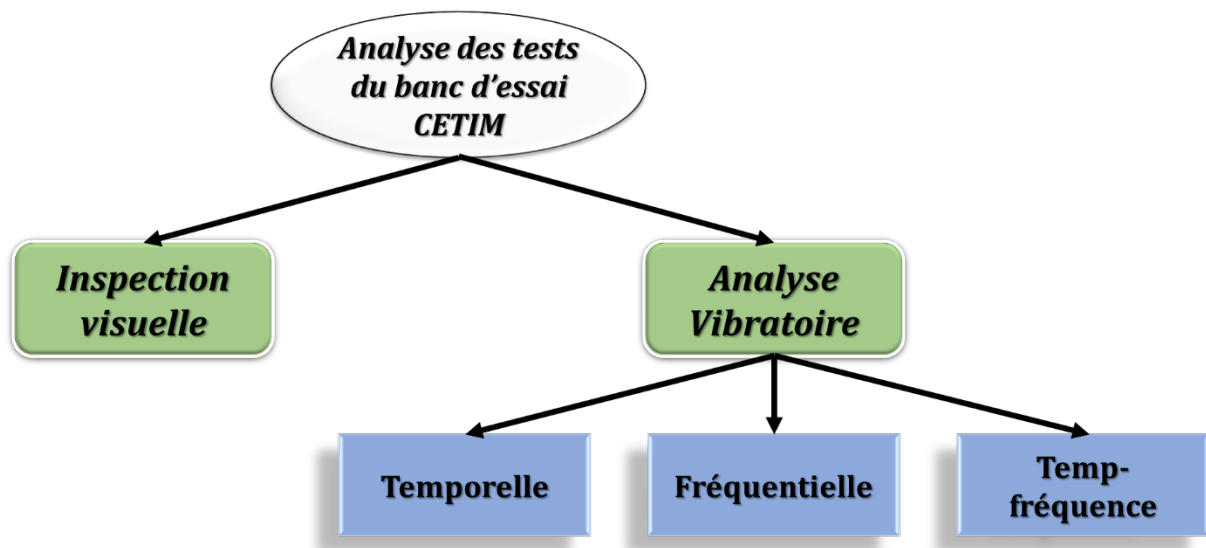


Figure IV.1 : Diagram du diagnostic du banc d'essai CETIM

Tout d'abord, l'inspection visuelle constitue la première étape, permettant une évaluation directe des composants pour détecter les signes visibles de dommages ou d'usure. Cette méthode initiale offre souvent des indices tangibles sur l'état global du système. En parallèle, l'analyse vibratoire se subdivise en trois étapes : l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle et l'analyse temporelle-fréquentielle.

Dans l'analyse temporelle, deux approches sont utilisées : l'indicateur scalaire et le signal temporel. L'indicateur scalaire fournit des mesures quantitatives sur des paramètres spécifiques, tandis que l'analyse du signal temporel identifie des tendances ou des anomalies dans le comportement du système au fil du temps. L'analyse fréquentielle, repose sur le spectre du FFT (Transformée de Fourier Rapide), qui permet de décomposer le signal en ses composantes

fréquentielles. Cela peut révéler des signatures caractéristiques de défauts ou de modes de défaillance spécifiques. Enfin, l'analyse en temp-fréquence qui combine les avantages des analyses temporelle et fréquentielle en examinant le spectre d'enveloppe du signal. Cette approche permet de détecter des changements dans la composition fréquentielle du signal au fil du temps, offrant ainsi une compréhension plus approfondie de l'évolution des défauts.

IV.3. Description de banc d'essai :

Notre dispositif expérimental est un bon d'essai de deux réducteurs 20/21 dents et 40/42 dents d'engrenages droit, dont nous allons essayer de faire un diagnostic à l'aide des outils de surveillances (Kurtosis, Crête à Crête, Facteur Crête, etc.....).

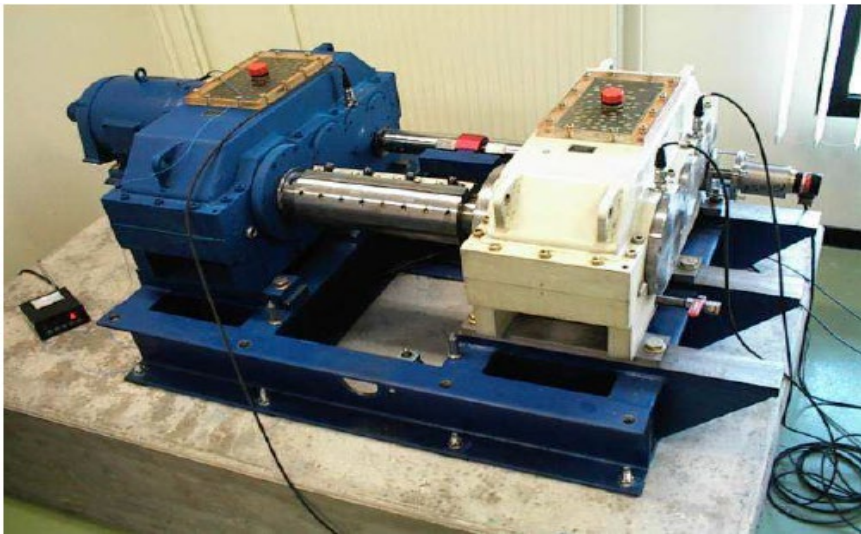


Figure IV.2: Vu d'ensemble du banc d'essai

Les tests ont été effectués sur un banc d'essai de grandeur industrielle fonctionnant 24h/24h. Vu d'ensemble du banc d'essai, on vous montre un schéma cinématique de ce système.

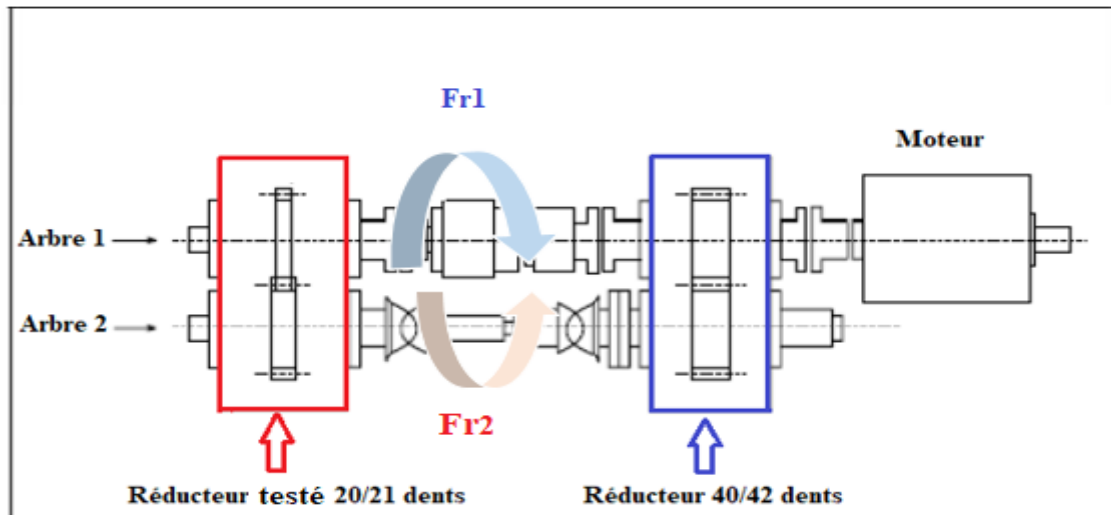


Figure IV.3:Schéma cinématique du banc d'essai CETIM

Le dimensionnement (Tableau IV.1) du réducteur testé de rapport 20/21 dents d'engrenage droit cémenté trempé, ainsi que leurs conditions de fonctionnement (vitesse, couple) ont été fixés de façon à obtenir un écaillage sur toute la longueur d'une dent.

Vitesse (tr/mn)	1000	
Couple (daN.m)	200	
Engrenages cylindriques à denture droite	Roue	Roue (roue testé)
Nombre de dents	21	20
Largeur (m)	0.03	0.015
Module	0.01	
Angle de pression (°)	2.0	
Coefficient de creux	1.4	
Coefficient de saillie	1.0	
Coefficient de déport	0	

Tableau IV.1: Caractéristiques nominales du réducteur testé

IV.4. Acquisition des signaux :

Les valeurs calculées des indicateurs scalaires ont été obtenus en utilisant un capteur accélérométrique piézoélectrique installé sur l'arbre1. Les enregistrements sont réalisés en utilisant le logiciel LabView. À chaque relevé, une inspection visuelle de l'engrenage est effectuée pour vérifier le début et l'évolution du défaut d'écaillage pendant 12 jours.

IV.4.1. Inspection visuelle :

Le tableau IV.2 présente les observations effectuées lors de la surveillance visuelle d'un banc d'essai sur une période de douze jours. Les observations sont accompagnées de classifications d'état qui indiquent le niveau de défaut détecté dans le système.

Jour	Observation	Classification de l'état
01	Premier jour d'acquisition, pas d'anomalie	Pas de défaut
02	Pas d'anomalie	
03	Pas d'anomalie	
04	Pas d'anomalie	
05	Pas d'anomalie	
06	Pas d'anomalie	
07	Écaillage sur le profil de la dent 1/2	Petit Défaut
08	Pas d'évolution	
09	Dent ½ pas d'évolution, dent 15/16 début d'écaillage	Moyen défaut
10	Évolution de l'écaillage dent 15/16	
11	Évolution majeure de l'écaillage dent 15/16	Grand défaut
12	Évolution majeure de l'écaillage dent 15/16	

Tableau IV.2: Rapport d'inspection visuelle de la dégradation du défaut

IV.4.2. Analyse temporelle :**IV.4.2.1. Les indicateurs scalaires :**

Notre étude débute par une analyse statistique des indicateurs scalaires, car leur évolution temporelle peut révéler des informations cruciales sur l'aggravation des défauts. Le tableau IV.3 présente les valeurs calculées de ces indicateurs à partir des divers signaux temporels collectés.

Jour	Indicateur scalaires calculées						
	Kurtosis	Crête à Crête	RMS	Facteur Crête	Energie	Valeur crête	Facteur K
01	2.666	0.680	0.099	3.261	596.647	0.355	0.035
02	2.644	0.630	0.095	3.145	543.137	0.331	0.031
03	2.857	0.713	0.093	3.317	525.697	0.402	0.037
04	2.884	0.644	0.088	3.304	473.326	0.351	0.031
05	2.973	0.691	0.091	3.365	502.968	0.383	0.035
06	2.924	0.635	0.090	3.093	492.604	0.355	0.032
07	2.989	0.696	0.090	3.669	495.677	0.362	0.033
08	2.923	0.635	0.086	3.482	443.274	0.335	0.028
09	3.029	0.752	0.091	4.370	506.084	0.401	0.036
10	3.024	0.693	0.091	3.894	498.377	0.355	0.032
11	13.619	1.870	0.146	5.943	1.285 ^e +03	1	0.146
12	13.944	1.869	0.146	5.929	1.290 ^e +03	1	0.146

Tableau IV.3: Les valeurs des indicateurs scalaires

Le kurtosis et le facteur de crête sont des indicateurs sensibles à la forme du signal, et non à son énergie. On observe que le kurtosis varie de manière significative au cours de l'étude, atteignant des valeurs élevées aux jours 11 et 12, tandis que le facteur de crête montre également des fluctuations importantes. Ces variations dans les valeurs de ces indicateurs peuvent être interprétées comme des signes de changements dans la forme des signaux enregistrés, indiquant potentiellement une aggravation du défaut. Cette observation est cohérente avec les résultats présentés dans les histogrammes des 2 figures, où l'augmentation de la gravité du défaut est associée à une augmentation des valeurs de kurtosis et du facteur de crête.

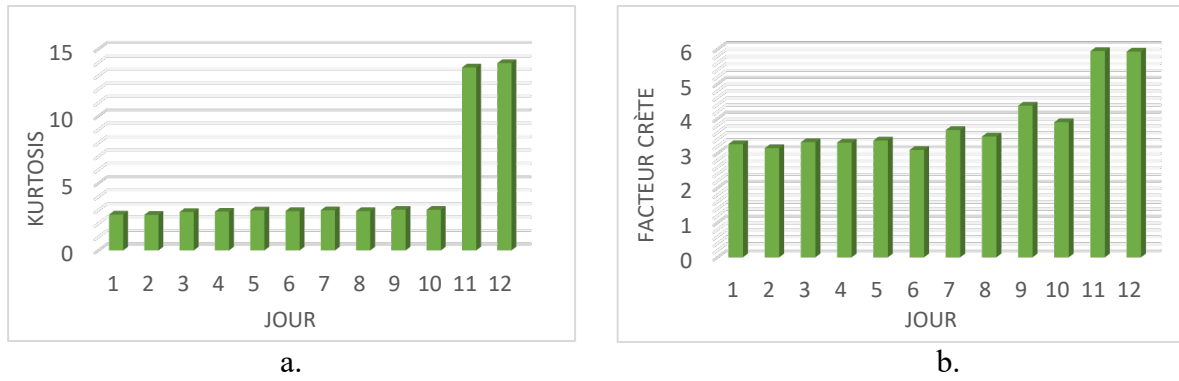
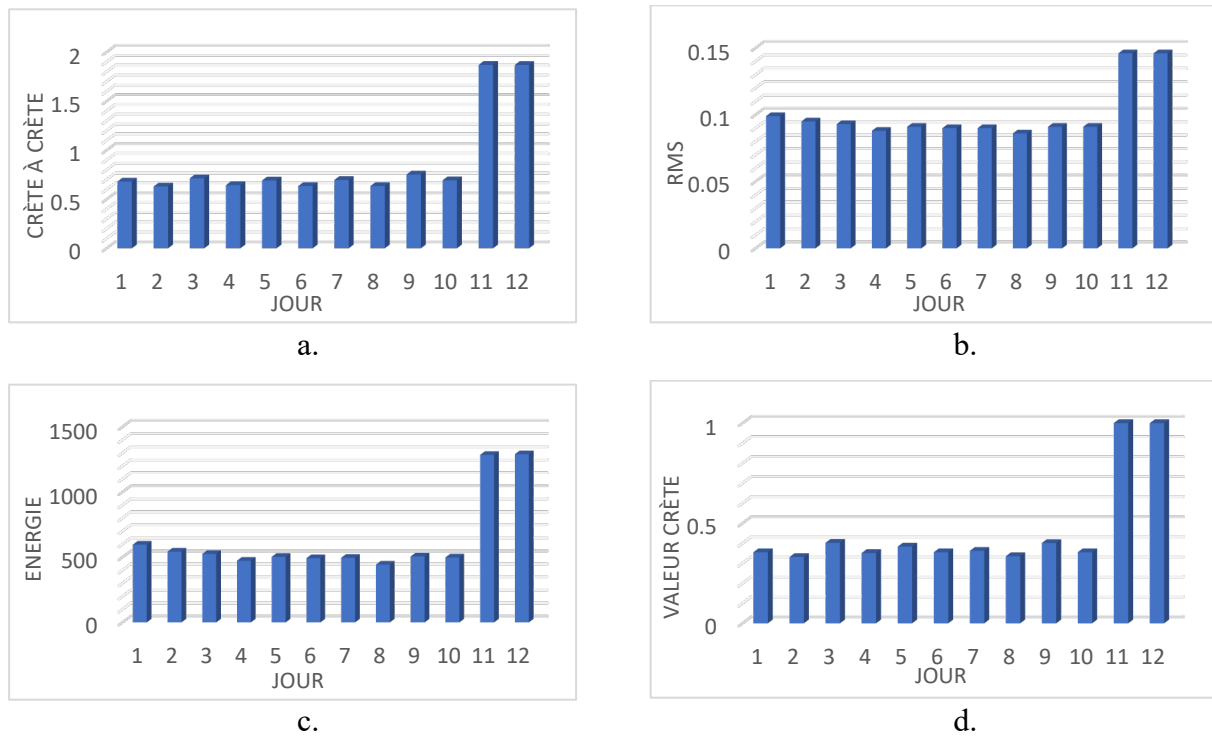
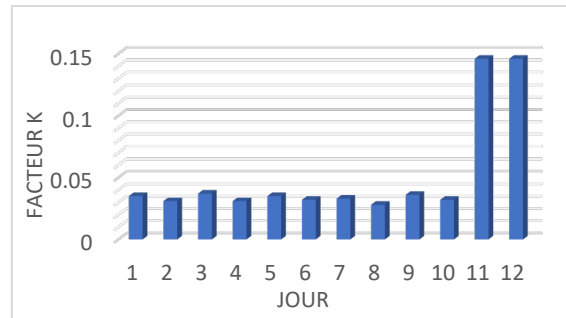


Figure IV. 4: Indicateurs sensibles à la forme du signal : a. le Kurtosis, b. le Facteur crête.

Les autres indicateurs, tels que la valeur crête, la crête à crête, le RMS, l'énergie et le facteur K, sont sensibles à l'énergie du signal, comme le démontrent les valeurs présentées dans le tableau IV.3. Une analyse approfondie de ces indicateurs révèle des variations significatives au fil des jours, notamment une tendance à l'augmentation des valeurs aux jours 11 et 12. Cette observation est cohérente avec les résultats précédemment obtenus et présentés dans les histogrammes de la figure IV.5. Dans cette figure, une augmentation de la gravité du défaut est clairement associée à une augmentation des valeurs de ces indicateurs, soulignant ainsi leur sensibilité à la santé du système. Ces constatations renforcent l'idée que ces indicateurs fournissent des informations précieuses sur l'évolution des défauts et peuvent être utilisés pour évaluer la gravité des anomalies détectées dans le système étudié.





e.

Figure IV. 5: Indicateurs sensibles à l'énergie du signal : a. Crête à crête, b. RMS, c. Energie, d. Valeur crête et e. Facteur K

L'analyse des indicateurs scalaires révèle que les signaux mesurés peuvent être regroupés en deux états distincts : un état sans défaut ou un défaut mineur qui peut ne pas être détecté par l'analyse des indicateurs, et un état de grand défaut. Cette classification est basée sur les variations observées dans les valeurs des indicateurs scalaires au fil du temps comme présenté dans le tableau IV.3. Il est important de noter que cette analyse offre un aperçu sur l'évolution de la dégradation du défaut plutôt que sur sa nature spécifique. En d'autres termes, les changements dans les valeurs des indicateurs scalaires fournissent des informations sur la gravité de la détérioration du système, mais ne permettent pas nécessairement d'identifier la cause sous-jacente du défaut. Cependant, cette approche fournit une base précieuse pour surveiller la santé du système et prendre des décisions appropriées en matière de maintenance et de réparation.

IV.4.2.2. L'analyse des signaux temporelle

L'analyse des signaux temporels offre une perspective révélatrice sur l'évolution des défauts dans notre étude. Une observation marquante émerge du 11^{ème} jour, où l'apparition d'un défaut significatif est clairement identifiable. Cependant, malgré la richesse des données fournies par les signaux temporels, il est intéressant de noter, comme illustré dans la figure IV.6, qu'une détection précoce des défauts s'avère difficile. Les signaux temporels présentent principalement un motif périodique distinct, attribuable au défaut, qui se manifeste sous forme d'impacts périodiques à partir du 11^{ème} jour.

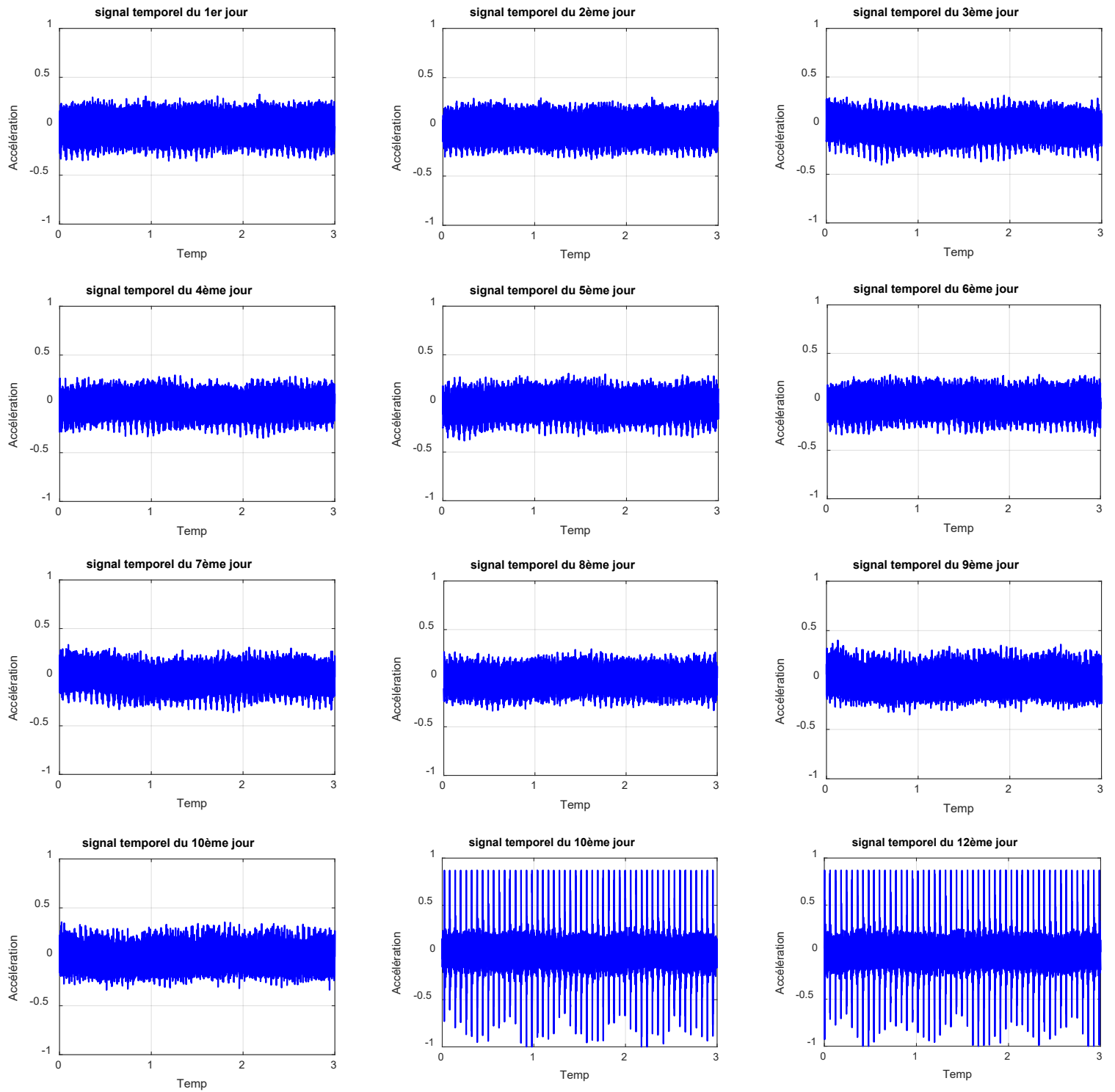


Figure IV.6: Signaux temporelle mesurés pour les 12 jours

La mesure de cette période comme présenté dans la figure IV.7, révèle une fréquence d'environ 16 Hz, soit une période d'environ 0,062 s. En considérant cette observation, nous catégorisons les signaux de la 1^{ère} au 9^{ème} jour comme appartenant à la première classe,

caractérisée par l'absence de défaut. En revanche, les signaux du 11^{ème} et du 12^{ème} jour sont attribués à la deuxième classe, marquée par la présence d'un défaut notable. Cette approche de classification permet de mieux comprendre l'évolution temporelle des défauts dans le système étudié, soulignant à la fois les défis de la détection précoce et l'importance de surveiller attentivement les signaux pour anticiper les éventuels problèmes de défaillance.

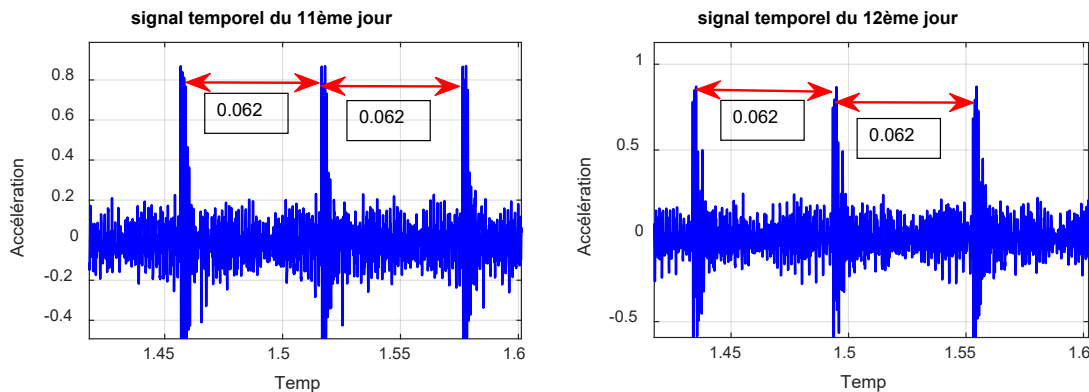


Figure IV.7: Un zoom sur les signaux temporels du 11^{ème} et 12^{ème} jour

IV.4.3. Analyse Fréquentielle :

L'analyse fréquentielle revêt une importance cruciale dans l'évaluation de la santé d'un système mécanique. Cette étape est souvent réalisée en utilisant la transformée de Fourier, qui permet de convertir les signaux du domaine temporel au domaine fréquentiel.

En examinant les spectres de fréquence résultants, présentés dans la figure IV.8, on peut observer la présence caractéristique des harmoniques de la fréquence d'engrènement [Fe , $2Fe$ et $3Fe$], ainsi que des bandes latérales autour de ces fréquences. Nous constatons la dominance de la 2^{ème} harmonique de la fréquence d'engrènement $2Fe$ par rapport au Fe , ce qui traduit par une insuffisance d'entraxe entre les roues résultants d'un montage incorrecte des roues. Ce défaut crée un jeu insuffisant au fond de la denture, La dent menante force à l'engagement et au déengagement ce qui provoque une usure des deux côtés de la denture avec le temps.

À partir du 9^{ème} jour il est possible de voir l'augmentation du nombre des bande latéral autour des harmoniques de Fe indiquons l'apparition du défaut sur les dents, et Au cours des deux derniers jours, le défaut est devenu nettement plus apparent, comme en témoigne le spectre qui présente une richesse en harmoniques de la fréquence de rotation. De plus, on observe la présence de bandes latérales autour de la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques.

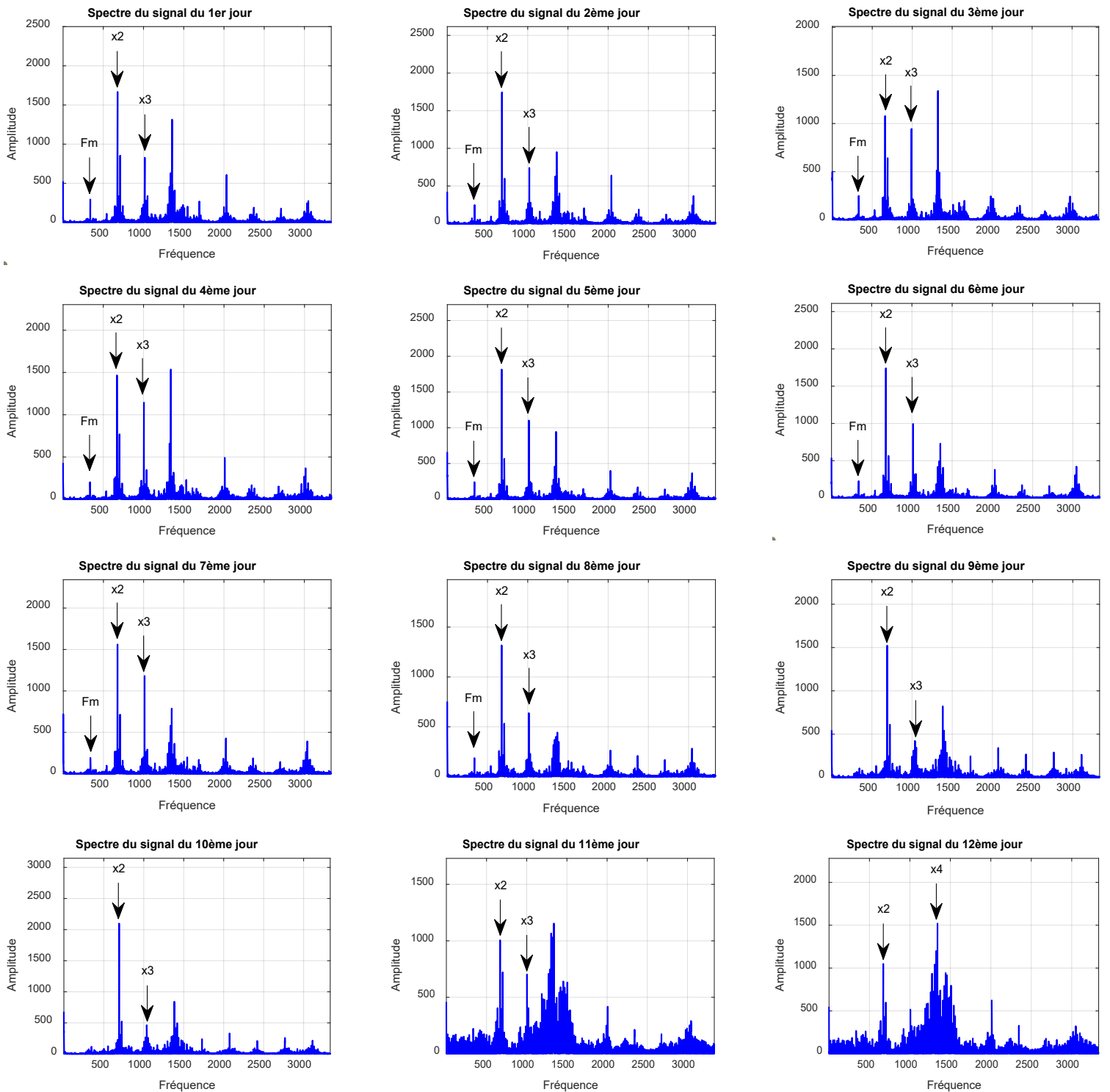


Figure IV.8: Les spectres des signaux

Grâce à l'analyse spectrale, nous avons pu identifier l'insuffisance d'entraxe ainsi que le défaut d'engrenage, indépendamment de sans gravité. Cette détection a été rendue possible par

l'observation d'une amplitude vibratoire remarquable à la fréquence de l'arbre porteur de défaut, démontrant ainsi notre capacité à classifier les signaux en trois catégories distinctes : les huit premiers jours l'absence du défaut sur la dent, l'apparition du défaut le neuvième jour, et les deux derniers jours présentant un grand défaut.

IV.4.4. Analyse en temp-fréquence :

Passons maintenant à l'analyse temporelle-fréquentielle, qui offre une perspective encore plus approfondie sur le comportement dynamique du système étudié. Cette analyse combine les avantages de l'analyse temporelle et de l'analyse fréquentielle en examinant comment les caractéristiques fréquentielles du signal évoluent dans le temps. Elle permet de détecter les variations de fréquence associées à l'apparition ou à l'aggravation des défauts, offrant ainsi une compréhension plus détaillée de leur dynamique temporelle. En utilisant le spectre d'enveloppe, nous pouvons identifier les changements dans les caractéristiques fréquentielles du signal au fil du temps, ce qui facilite la détection précoce des défauts et la prise de décision en matière de maintenance.

L'analyse des spectres d'enveloppe, comme présentée dans la figure IV.9, révèle l'apparition de la fréquence de rotation $Fr1 = 16$ Hz et de ses harmoniques au cours des sept premiers jours. Une observation intéressante est l'augmentation de l'amplitude de l'harmonique par rapport à $Fr1$, en particulier au 2^{ème} jour. Cette tendance, selon le spectre typologique, suggère la présence d'un désalignement d'arbre. Par le biais de l'analyse fréquentielle, nous avons pu identifier une insuffisance d'entraxe comme étant la cause sous-jacente de ce désalignement.

Dans le spectre d'enveloppe du 8^{ème} jour, une augmentation significative du nombre d'harmoniques de $Fr1$ est observée, ce qui suggère le début d'un défaut au niveau de la dent. Les 9^{ème} et 10^{ème} jours révèlent une dégradation continue de l'état de la dent, avec des signes croissants de détérioration. Les deux derniers jours présentent une détérioration notable de la dent, caractérisée par une augmentation remarquable de l'amplitude des pics de la fréquence de rotation et de ses harmoniques, jusqu'à dix fois supérieure aux autres jours. De plus, le spectre d'enveloppe met en évidence une multitude d'harmoniques, soulignant ainsi l'ampleur de la détérioration.

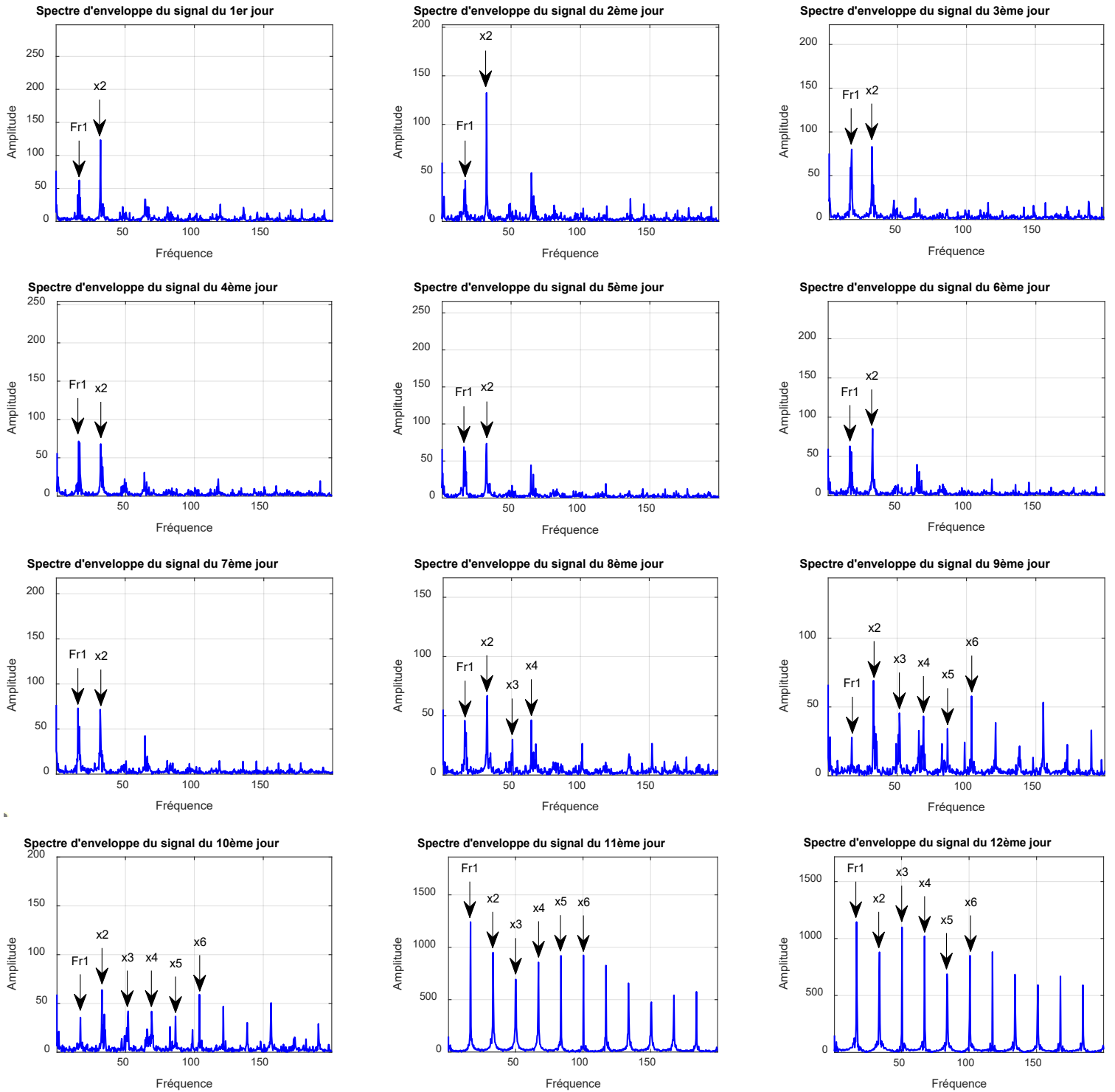


Figure IV.9: Spectres d'enveloppe des signaux

IV.5. Conclusion :

L'analyse des enveloppes des signaux a été essentielle pour classifier les différents états de santé des dents du système étudié. Cette analyse a permis de distinguer 4 états distincts :

sans défaut dans la dent, petit défaut, moyen défaut et grand défaut. En examinant les variations dans les spectres d'enveloppe au fil du temps, nous avons pu identifier les signes précurseurs de défauts, tels que des changements dans l'amplitude des pics de fréquence et l'apparition de nouvelles harmoniques. Cette classification des états de santé des dents est cruciale pour évaluer la gravité des défauts et prendre des décisions éclairées en matière de maintenance et de réparation.

En conclusion, cette discussion a couvert une analyse exhaustive du banc d'essai CETIM, mettant en lumière plusieurs étapes essentielles dans l'évaluation de la santé du système. Nous avons débuté par une analyse approfondie des signaux temporels, révélant des variations significatives dans les indicateurs scalaires au fil du temps. Cette analyse nous a permis de détecter une insuffisance d'entraxe, un défaut de montage, qui a été identifié comme la cause sous-jacente de l'usure de la dent et de sa détérioration ultérieure. Cette conclusion a été renforcée par l'analyse des spectres d'enveloppes, qui a corroboré les résultats de l'inspection visuelle en mettant en évidence les signes caractéristiques de défauts dans les dents du système. En outre, l'analyse vibratoire s'est avérée être un outil de diagnostic précoce et fiable, offrant des informations cruciales pour anticiper les problèmes de défaillance et guider les décisions en matière de maintenance. En combinant ces différentes méthodes d'analyse, nous avons pu obtenir une évaluation complète de la santé du système, soulignant ainsi l'importance d'une approche holistique dans le domaine du diagnostic des défauts dans les systèmes mécaniques.

Conclusion générale

La surveillance des machines tournantes connaît un essor constant et demeure une priorité essentielle pour les entreprises, car elle garantit la disponibilité et la sécurité des équipements. Parmi les diverses techniques de surveillance, l'analyse vibratoire se distingue comme un outil particulièrement efficace pour la détection précoce des défauts. Cette méthode est directement intégrée dans la politique de maintenance des machines tournantes. Pour optimiser l'analyse vibratoire, il est crucial d'examiner les spectres fréquentiels, qui permettent de déterminer la nature des défauts spécifiques. Dans notre cas l'utilisation d'indicateurs scalaires s'est avérée capable de détecter les défauts des engrenages.

Nous avons présenté dans le premier chapitre généralités sur la maintenance avec une mention de ses techniques les plus importantes. Dans le 2^{ème} chapitre nous avons présenté l'analyse vibratoire avec ses principale caractéristiques et les méthodes utilisées dans le diagnostic et la surveillance. Le 3^{ème} Chapitre est un définition générale des engrenages avec les défauts que rencontrent fréquemment les engrenages. Le dernier chapitre est une étude expérimentale avec un banc d'essai ce qui nous a permis d'observer de plus près l'apparition progressive des défauts aux engrenages, et cela nous permet de prendre toutes les mesures pour éviter la survenance de ces défauts dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle.

Références bibliographiques :

- [1] Association Française de Normalisation (AFNOR), “Norme X 60-010 Maintenance Industrielle”, 2002.
- [2] S. Bensaada, D.Feliachi, « la maintenance industrielle », polycopie de l’OPU, 2002
- [3] K. Irinislmane, « diagnostic et surveillance », polycopié de cours d’université M’hamed Bouguerra Boumerdes, 2021.
- [4] M.Zani, « La surveillance des machines tournantes », Guide d’achat, Mesures mécaniques, mesures 757, 77-84, Septembre 2003.
- [5] A. Boulenger, C. Pachaud, « Surveillance des machines par analyse des vibrations, du dépistage au diagnostic », AFNOR, Paris, 2ème tirage, 1998.
- [6] H. Berkous, « Détection des défauts d’engrenage par analyse vibratoire », thèse de master, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [7] A. Soualmi, Modélisation du comportement vibratoire d’un système d’engrenage, thèse de master, Université de Blida1, 2013-2014.
- [8] R. Chevalier, « Etat de l’art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF », RFM, 2001.
- [9] I. Khelf, « Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l’intelligence artificielle », thèse de doctorat- Université Badj Mokhtar – Annaba- 2014.
- [10] M.Dembri, Y. Sadou, « Etude du Diagnostic des défauts d’engrenage basé sur l’analyse vibratoire », thèse de master, Université de Jijel 2015
- [11] Y. Debbah, «mécanique de vibration», polycopié de cours d’université des Frères Mentouri Constantine.
- [12] A. Djebala ,N.Ouelaa ,S.Guenfud, « optimisation de l’utilisation des indicateurs scalaires dans le cadre de la maintenance prédictive des paliers à roulements» ,congres algérien de mécanique de construction alger,2007.
- [13] M. Nabti, « étude de l’évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques », Université Ferhat Abbes, sétif,2011.
- [14] I.Touafek, « Extaction d’indicateurs robustes pour le diagnostic des défaut mécanique, Comparaison de L’EMD et des ondelettes (WT) », université ferhatabbes, stif, 2018.

- [15] A. Osman, M. Gobran, F. Mahmoud, «Vibration signature of Normal Notched Tooth Gear Pump», European Scientific Journal May 2019 édition Vol.15, No.15.
- [16] V. Liguine, « Essai d'une classification des engrenages », Nouvelles annales de mathématiques 2E série, tome13(1874), p. 497-507.
- [17] M. Anzieh. « étude des caractéristiques de tribologie et modélisation CAO pour la prévision du comportement des engrenages en plastique», mémoire université du Québec, 2005.
- [18] J-L. Fanchon, « Guide des sciences de technologies industrielles», AFNOR Nathan, pp333-354.
- [19] M. Melih, B. Ounadjela, « Automatisation du calcul des dimensions Géométriques d'un engrenage », faculté de Technologie, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, memoire En vue de l'obtention du diplôme de MASTER, 2018.
- [20] E. Presta, « Étude des engrenages », <https://www.e-presta-formation.fr> ,pp 49–50.
- [21] M. ElBadaoui. « Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale ». Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 1999. Français.
- [22] Engrenages. Transports - Énergie - Mouvement. JP Schenfele - MAZAMET. _ 13 _ ACT6 Engrenages Distribution énergie
- [23] [L. FAURE] – «Aspect des dentures d'engrenages après fonctionnement», Senlis (Oise), CETIM, 1993, pp128
- [24] B. Ibtissam M. Sarra, « Diagnostic des défauts d'engrenages à base de la transformée en paquet d'ondelette», mémoire de master, Université Akli mohand Oulhadj, Bouira, 2019.
- [25] W. Krika, « Suivi et diagnostic précoce des avaries des pièces machines basés sur l'analyse des huiles», thèse de doctorat à l'université 20 Août 1955-Skikda, 2019.
- [26] <https://www.silanus.fr> « Analyse vibratoire des machines tournantes», pp515-517.
- [27] A.Belsak, & J.Flasker, (2007). «Detecting cracks in the tooth root of gears. In Engineering Failure Analysis (Vol. 14, Issue 8, pp. 1466–1475). Elsevier BV.
- [28] C.Benchaabane, A. Djebala, N. Ouelaa et S. Guenfoud, « Diagnostic vibratoire des défauts d'engrenages basé sur les indicateurs scalaires », congrès Algérien de Mécanique CAM 2009 Biskra, novembre 2009.
- [29] F. Chaari, T.Fakhfakh, M.Haddar, « Simulation numérique du comportement dynamique d'une transmission par engrenages en présence de défauts de dentures». Mechanics & Industry ,2005.

[30] Matsuo.K, Suzuki.Y, Hongu.J, Iba.D Et Moriwaki.I. Detecting nicked automotive transmission gears in the final inspection by multi-scale time synchronous averaging». Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 17, No.2, 2023.