

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaïa



Faculté de Technologie
Département de Génie électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

THEME

**Diagnostic multi-capteurs de système mécanique
sous contrainte variable**

Réalisé par :

Mr. TAFOUK Toufik

Mr. ACHOURI Safouane

Composition du Jury :

- ❖ Mr LAGGOUNE R. Président
- ❖ Mr LARBAAA M. Examinateur
- ❖ Mr IMAOUCHEN Y. Encadreur

Année universitaire

2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : Achourzi

Prénom : Sofiane

Matricule : 131933009779

Spécialité et/ou Option : Electromécanique option Maintenance Industrielle

Département: Génie électrique

Faculté: Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé: Diagnostic multi - capteurs de système mécanique
..... Sous contrainte variable

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
13/07/2025

Signature de l'intéressé
(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : TAFOUNI

Prénom : TOUFIK

Matricule : 191933008854

Spécialité et/ou Option : Electromécanique option Maintenance Industrielle

Département : genie électrique

Faculté : Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé: Diagnostic multi - capteurs de système mécanique
sous contrainte variable

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
13 / 07 / 2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Remerciement

La réalisation de ce Projet de Fin d'Études représente l'aboutissement de plusieurs mois de travail, d'efforts et de recherches. Elle n'aurait pu être menée à bien sans le soutien, l'aide et les précieux conseils de nombreuses personnes, à qui je souhaite exprimer ma sincère gratitude.

Le grand remerciement revient à Allah qui nous a donné la force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement **Mr Y. IMAOUCHEN**, mon encadrant pédagogique à Université Abderrahmane Mira-Bejaïa département génie électrique. Sa disponibilité, ses conseils avisés, son expertise et ses encouragements constants ont été déterminants à chaque étape de ce projet. Sa patience et sa confiance en ma capacité à surmonter les défis ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Je remercie également l'ensemble du jury de soutenance, qui a bien voulu consacrer de son temps pour évaluer ce travail. Leurs questions et leurs commentaires constructifs seront sans aucun doute bénéfiques pour mes futures recherches.

J'adresse ma profonde gratitude à l'ensemble du corps professoral d'Université Abderrahmane Mira-Bejaïa département génie électrique, pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de mon cursus. Les connaissances et compétences acquises ont été les fondations indispensables à la réalisation de ce PFE.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance à ma famille pour leur amour inconditionnel, leur soutien moral indéfectible et leur patience tout au long de ces années d'études. Leur confiance en mes capacités a été une source de motivation inestimable. Je remercie également mes ami(e)s et collègues pour leur camaraderie, leur soutien et les moments partagés qui ont rendu cette période d'étude plus agréable.

À toutes ces personnes, merci du fond du cœur.

Sommaire

Sommaire	II
Liste des figures	V
Liste des tableaux	IX
Abréviations et notations.....	X
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Diagnostic des machines tournantes

1. Introduction	2
2. Les machines tournantes et leurs défaillances	2
2.1. Les différentes machines tournantes	2
2.2. Les défaillances fréquentes	3
2.3. Cas d'étude : boite à engrenages.....	3
3. Techniques de diagnostic.....	4
3.1. Analyse des mesures électriques.....	4
3.1.1. L'analyse du courant statorique	4
3.1.2. Analyse de la tension.....	4
3.1.3. Mesure de la puissance.....	5
3.2. Analyse des mesures mécanique et acoustique.....	5
3.2.1. L'analyse vibratoire.....	5
3.2.2. L'analyse vitesse de rotation	5
3.2.3. L'analyse de couple.....	5
3.2.4. L'analyse Acoustique	5
4. Méthodes de traitement de signal	6
4.1. Analyse temporelle	6
4.2. Valeur efficace (V_{rms}).....	6
4.3. Le Kurtosis (Ku)	7
4.4. Le facteur de crête (Fc)	7
4.5. Variance(Var).....	8
4.6. La moyenne (mean)	8
4.7. Indicateur composé (HI)	8
4.2. Analyse fréquentielle	9
4.2.1. L'analyse spectrale	9
4.2.2Analyse cepstrale.....	10

4.2.3. Analyse d'enveloppe	10
4.2.4. Transformée de Hilbert	11
4.3. Analyse temps-fréquence.....	11
6. Le Kurtosis spectral et le Kurtogramme.....	12
7. Conclusion	12

Chapitre 2 : Analyse statistiques des mesures mécaniques et électriques :

Cas de défauts de roulement et d'engrenage

1. Introduction	13
2. Données de mesures utilisées	13
2.1. Description de bancs d'essai.....	13
2.2. Méthodes d'obtention des données.....	13
3. Analyse des signaux de mesures	15
3.1. Analyse des valeurs du RMS	15
3.2. Analyse des valeurs du kurtosis	18
3.3. Analyse des valeurs de la moyenne	22
3.4. Analyse les valeurs facteurs crête	25
3.5. Analyse les valeurs kurtosis*var^2.....	29
3.6. Analyse les valeurs de la variance	32
4. Influence de la charge sur les indicateurs	37
5. Influence de la vitesse sur les indicateurs.....	37
6. Limites de l'analyse statistique.....	37
7. Conclusion	38

Chapitre 3 : Diagnostic de défauts multi modes de la boîte à engrenages dans des conditions de travail variables

1. Introduction	39
2. Données de mesures utilisées	39
2.1. Description du banc d'essai	39
2.2. Description des données de mesures.....	40
3. Analyse des signaux de mesures	42
3.1. Analyse des signaux mesurés à vitesse variable	42
3.1.1. Cas d'absence de défaut	42
3.1.2. Cas d'un défaut de cassure d'une dent d'engrenage	44
3.1.3. Cas composé de défauts de bague interne de roulement et cassure d'une dent d'engrenage	45

3.2. Analyse des signaux mesurés à couple variable	46
3.2.1. Cas d'absence de défaut	46
3.2.2. Cas d'un défaut de cassure d'une dent	47
3.2.3. Cas composé de défauts de bague interne de roulement et cassure d'une dent d'engrenage	49
4. Méthode proposée pour la détection des défauts dans les signaux	50
4.1. Étapes de la méthode.....	50
4.2. Détection des défauts lors de la vitesse variable.....	50
4.2.1. Cas d'absence de défaut	50
4.2.2. Cas de défaut de dent cassée sur le pignon examiné.....	52
4.2.3. Cas composé de défaut de bague interne de roulement et une dent cassée du pignon examiné	53
4.3. Détection des défauts lors de couple variable.....	54
4.3.1. Cas d'absence de défauts.....	54
4.2.2. Cas de défaut de dent cassée sur le pignon examiné.....	54
4.3.3. Cas composé de défaut de bague interne de roulement et une dent cassée du pignon examiné	55
5. Conclusion	55
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	58
Résumé	61

Liste des figures

Figure 1.1: Forme d'onde du signal vibratoire en temporel : sain et avec défaut [9].	6
Figure 1.2 : Spectre du signal vibratoire d'engrenages en fonctionnement sain (a) défaut(b).	9
Figure 2.1 Banc d'essai (la boratoire LASPI) [30]	13
Figure 2.2. Valeurs du RMS pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration, (b) courant et (c)tension	15
Figure 2.3.Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne (a)vibration, (b) courant et (c)tension	15
Figure 2.4. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe (a)vibration, (b)courant et (c)tension	16
Figure 2.5. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (dent cassé):(a)vibration, (b)courant et (c)tentions.....	16
Figure 2.6. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) : (a)vibration, (b) courant et (c)tension	16
Figure 2.7. Valeurs de 'RMS'pour les mesures de la machine défaut mixte (baguie interne et dent cassé) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	17
Figure 2.8. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine avec Défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	17
Figure 2.9. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration, (b) courant et (c)tentions	18
Figure 2.10. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a) vibration, (b) courant et (c) tension	19
Figure 2.12. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (dent cassé) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	19
Figure 2.13. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (Défaut de surface) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	20
Figure 2.14. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine avec défaut mixte (baguie interne et dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	20
Figure 2.15. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension... ..	21
Figure 2.16. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en état sain :(a) vibration, (b) courant et (c) tension	22
Figure 2.17. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a) vibration, (b) courant et (c) tentions	22
Figure 2.18. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	23
Figure 2.19. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension	23
Figure 2.20. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	24
Figure 2.21. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine avec défaut mixte (baguie interne et dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	24

Figure 2.22. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface)) :(a) vibration, (b) courant et (c)tension	25
Figure 2.23. Valeur de facteur crête pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration et (b) courant et (c)tension	26
Figure 2.24. Valeurs de ‘facteur crête ‘pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne : (a) vibration, (b) courant et (c) tension	26
Figure 2.25. Valeurs de ‘facteur crête ‘pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	27
Figure 2.26. Valeur de ‘facteur crête ‘pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage(dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	27
Figure 2.27. Valeur de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (défaut de surface) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension	27
Figure 2.28. Valeur de ‘facteur crête ‘pour les mesures de la machine Défaut mixte (défaut de roulement interne et défaut d’engrenage (dent cassé)) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension	28
Figure 2.29 Valeur de ‘facteur crête ‘pour les mesures de la machine avec Défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d’engrenage (surface)) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension	28
Figure 2.30. Valeurs de kurtosis*var^2 pour les mesures de la machine en état sain : (a) vibration, (b) courant et (c) tension	30
Figure 2.31.Valeurs de ‘kurtosis*var^2’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a)vibration, (b) courant et (c)tension	30
Figure 2.32. Valeurs de ‘kurtosis*var^2’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a)vibration, (b) courant et (c)tension	31
Figure 2.33. Valeurs de ‘kurtosis*var^2 ’ pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage(dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	31
Figure 2.34.Valeurs de ‘kurtosis*var^2’ pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	31
Figure 2.35. Valeurs de ‘kurtosis*var^2’ pour les mesures de la machine Défaut mixte (bagu interne et dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	32
Figure 2.36. Valeurs de ‘kurtosis*var^2’ pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d’engrenage (surface))::(a)vibration, (b)courant et (c)tension	32
Figure 2.37. Valeur de la variance pour les mesures de la machine en état sain :(a) vibration, (b) courant et (c) tension	34
Figure 2.38.Valeurs de ‘variance’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a)vibration, (b) courant et (c)tentions	34
Figure 2.39. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a)vibration, (b) courant et (c)tension.....	34
Figure 2.40. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension	35
Figure 2.41. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (défaut de surface): (a) vibration, (b) courant et (c) tension	35

Figure 2.42. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut mixte (bague interne et dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension.....	35
Figure 2.43. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension	35
Figure 3.1. Banc d'essai de l'univerité de Tsinghua, Chine [30].....	39
Figure 3.2. La structure interne de la boite à engrenages.....	40
Figure 3.3. Evolution de la vitesse et de la charge	41
Figure 3.4. Allure des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration.....	43
Figure 3.5. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	43
Figure 3.6. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut de cassure d'une dent du pignon: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	44
Figure 3.7. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défaut de cassure d'une dent d'engrenage : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	45
Figure 3.8. Allure des signaux de mesures sur la machine avec défauts composés: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration.....	45
Figure 3.9. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine avec défauts composés: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration.....	46
Figure 3.10. Allure des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts :	46
Figure 3.11. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	47
Figure 3.12. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut de cassure d'une dent du pignon: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	48
Figure 3.13. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défauts de cassure: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	48
Figure 3.14. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut combiner: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration.....	49
Figure 3.15. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défauts de combine: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration	49
Figure 3.16. Extraction du tronçon du signal vibratoire mesuré en absence de défaut.....	51
Figure 3.17. Kurtogramme du signal extrait dans le cas d'absence de défaut	52
Figure 3.18. Analyse du signal filtré par le kurtogramme : (a) signal filtré dans l'intervalle de fréquences détecté, (b) spectre du signal filtré.....	52
Figure 3.19. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence d'une dent cassée : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré et (c) son spectre.....	53
Figure 3.20. Kurogramme du tronçon de signal vibratoire mesuré lors de défauts composés	53
Figure 3.21. (a) signal filtré entre [1200-1300Hz], (b) son spectre, (c) signal filtré entre [3600-3700 Hz] et (d) son spectre	54
Figure 3.22. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence d'une dent cassée : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) Spectre du signal filtré	54

Figure 3.23. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence d'une dent cassée : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) Spectre du signal filtré	55
Figure 3.24. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence de défauts composés : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) spectre du signal filtré	56

Liste des tableaux

Tableau 2.1 récapitulatif de l'indicateur RMS-comparaison entre états sain et défauts	18
Tableau 2.2 récapitulatif de l'indicateur kurtosis-comparaison entre états sain et défaut	21
Tableau 2.3 récapitulatif de l'indicateur moyenne-comparaison entre états sain et défauts....	25
Tableau 2.4 récapitulatif de l'indicateur facteurs crête-comparaison entre états sain et défauts	28
Tableau 2.5 récapitulatif de l'indicateur- kurtosis*var ² ' comparaison entre états sain et défauts	32
Tableau 2.6 récapitulatif de l'indicateur variance-comparaison entre états sain et défaut.....	36
Tableau 3.1 Les paramètres spécifiques du roulement ER16K utilisé.....	41
Tableau 3.2 Les détails des paramètres de défaut de roulement.	42
Tableau 3.3 Les détails des paramètres de défaut de l'engrenage	42

Abréviations et notations

- R : Rapport de vitesse entre les deux roues dentées.
- Z_1 : Nombre de dents de la roue menée.
- Z_2 : Nombre de dents de la roue menante.
- f_{eng} : Fréquence d'engrenement.
- f_1, f_2 : Fréquences de rotation de pignon Z_1 et Z_2 Respectivement
- N : Nombre total d'échantillons.
- N_1, N_2 : vitesse de rotation en .
- C_1, C_2 : couple
- x_i : i-ème valeur du signal.
- \bar{x} (Mean) : Moyenne des amplitudes du signal.
- σ (sigma) : Écart-type du signal.
- Var (variance) : Variance du signal.
- Ku : Kurtosis (coefficient d'aplatissement).
- Fc : Facteur de crête (Peak Factor).
- $|\max(x)|$: Valeur maximale absolue du signal.
- Vrms : Valeur efficace (Root Mean Square).
- HI : Indicateur composé (Health Indicator).
- Nm : Newton-mètre (unité de couple).
- mm : Millimètre (unité de distance).
- FFT : Transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform).
- $S(f)$: Transformée de Fourier du signal $x(t)$.
- t ou T : Variable temps.
- f : Variable fréquence.
- τ : Paramètre de temps (en secondes), appelé « Quéférence ».
- $H[s(t)]$: Transformée de Hilbert du signal $s(t)$.
- STFT : Transformée de Fourier à court terme (Short-Time Fourier Transform).
- HFRT : High Frequency Resonance Technique (Technique de résonance haute fréquence).
- TFR : Représentation temps-fréquence

Introduction générale

Introduction générale

En raison du besoin constant de couple important et de réduction de vitesse élevée ou le contraire, les systèmes de transmission à base de boîte d'engrenages ont été largement adoptés dans les applications industrielles. Ainsi, les réducteurs à engrenages sont des éléments importants dans le contexte de l'industrie étant donné qu'ils assurent le fonctionnement des machines tournantes et se retrouvent donc dans la plupart des domaines (robotique, automobile, aéronautique, ingénierie, énergétique...). Par exemple, au niveau de la turbine éolienne basée sur les générateurs à induction à rotor bobiné, le temps d'arrêt le plus élevé est relatif au train d'engrenages multi-étage qui relie les ailes du rotor aux aérogénérateurs à travers l'arbre principal. Un autre exemple est la chaîne de traction du bogie ferroviaire dans lequel le train d'engrenages relie les moteurs de traction aux roues de la locomotive.

Ainsi, les engrenages constituent des éléments cruciaux des systèmes mécaniques et leur état de santé conditionne le bon fonctionnement de l'ensemble du mécanisme à un niveau de sécurité et de fiabilité élevé. Aussi, l'état des engrenages admet des considérations de rentabilité importantes. Étant donné les implications économiques qui interviennent dans le secteur industriel, le diagnostic précoce des éventuels dysfonctionnements d'engrenages et les roulements prend alors une importance particulière.

L'objectif de ce travail est donc de permettre la mise en œuvre des processus de maintenance nécessaires en temps opportun et ainsi minimiser les conséquences financières néfastes des défauts roulements et engrenage. Ce travail a pour but d'appliquer le traitement de signal dans la maintenance, en faisant un diagnostic pour la détection et la caractérisation des défauts qui peuvent affecter les différents éléments de roulements et engrenage par la méthode d'analyse des indicateurs statique et analyse temps-fréquence.

Le premier chapitre expose les défaillances des machines tournantes, ensuite donne un aperçu sur les différentes techniques d'analyse et de surveillance. Le deuxième chapitre, permet l'analyse dans le domaine temporel des indicateurs statiques calculés pour des mesures mécaniques et électriques afin de détecter différents défauts mécaniques avec différentes conditions de fonctionnement. Le troisième chapitre, propose des méthodes de traitement de signal dans le domaine fréquentiel et temps-fréquence. Les signaux analysés sont non-stationnaires vu qu'ils sont mesurés dans des conditions de fonctionnements variables : vitesse ou couple variables, afin de détecter des défauts mécaniques : roulements et engrenages.

Chapitre 1 : Diagnostic des machines tournantes

1. Introduction

Les machines tournantes jouent un rôle souvent stratégique dans un procédé de fabrication ce qui exige le choix d'une bonne procédure, de garder et de maintenir les machines industrielles dans un bon état de fonctionnement et d'augmenter leur durée de vie et ainsi économiser beaucoup de temps et d'argent concernant leur maintenance. Pour cela, la connaissance des organes mécaniques et de leurs défauts aide à atteindre ce but. L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu théorique sur les machines tournantes, nous présentons leurs différents types et leurs principaux défauts, ainsi que les différentes techniques utilisées au diagnostic de ces défauts.

2. Les machines tournantes et leurs défaillances

Les machines tournantes, utilisées dans diverses industries telles que la production énergétique, l'automobile et l'aéronautique, sont soumises à des conditions de fonctionnement exigeantes qui peuvent engendrer des défaillances. Ces dernières peuvent entraîner des pertes économiques importantes, une réduction de la fiabilité et dans certains cas des risques pour la sécurité des équipements et des opérateurs.

Ces derniers combinent une série de mécanismes et de composants conçus pour convertir de l'énergie ou transmettre le mouvement. Ces mécanismes entrelacés ne peuvent fonctionner sans jeu, tension, forces dynamiques et chocs. Ces effets se manifestent principalement sous la forme de vibrations et de bruit. Tout changement dans l'importance de ces jeux, de ces contraintes, efforts ou chocs, se traduit par une modification de l'intensité ou des fréquences de ces vibrations. Or, cette modification de comportement vibratoire constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie affectant la machine, cause potentielle à terme de dégradations, voire de pannes [1].

2.1. Les différentes machines tournantes

Les machines tournantes sont des équipements dont le fonctionnement repose sur un mouvement de rotation. Elles sont largement utilisées dans l'industrie pour diverses applications.

Voici les différentes machines tournantes :

- Turbines à vapeur: Convertissent l'énergie de la vapeur en travail mécanique, souvent utilisées dans la production d'électricité.
- Compresseurs centrifuges : Augmentent la pression des gaz en utilisant un rotor à grande vitesse.
- Générateurs électriques: Transforment l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Pompes centrifuge: Assurent le déplacement des liquides dans les systèmes hydrauliques.
- Ventilateurs: Utilisés pour la circulation de l'air et le refroidissement.

- Moteurs électriques: Convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique pour entraîner divers équipements.

2.2. Les défaillances fréquentes

Les machines tournantes peuvent être sujettes à plusieurs types de défaillances fréquentes qui affectent leur performance et leur fiabilité. Voici quelques-unes des plus courantes :

- **Défauts de roulements** : Les roulements sont des composants critiques, et leur usure ou leur mauvaise lubrification peut entraîner des vibrations excessives et des pannes ;
- **Désalignement**: Un mauvais alignement des arbres rotatifs peut provoquer des contraintes mécaniques et une usure prématuée des composants ;
- **Balourd**: Une répartition inégale de la masse sur un rotor peut générer des vibrations importantes et endommager les supports ;
- **Défauts électriques** : Dans les moteurs et générateurs, des problèmes d'isolation ou de surtension peuvent causer des défaillances ;
- Problèmes de lubrification : Un manque ou un excès de lubrifiant peut entraîner une surchauffe et une usure accélérée des pièces mécaniques ;
- **Engrenage** : Les engrenages sont globalement soumis à des couples élevés et des conditions de fonctionnement sévères provoquant ainsi des défaillances qu'il faut surveiller.

A cet effet, il est nécessaire de connaître les différents types de défauts rencontrés. Les principales avaries qui surviennent par exemple au niveau des engrenages d'une boîte à engrenages sont des défaillances réparties sur toutes les dentures et des défauts localisés sur une partie des dentures. Ce sont des dégradations qui apparaissent principalement lors de la transmission. Les défauts de fabrication tels que l'erreur de profils des dents et l'excentricité de roues ainsi que les défauts d'installation comme les défauts de parallélisme ne feront pas partie de cette étude [2].

2.3. Cas d'étude : boîte à engrenages

Une boîte à engrenages est un dispositif mécanique utilisé pour transmettre et modifier le mouvement rotatif d'un moteur ou d'un autre système mécanique. Elle est composée de plusieurs engrenages qui permettent de réduire ou augmenter la vitesse, modifier le couple et changer la direction du mouvement.

Les engrenages ont deux opérations majeures qui sont soit la réduction, soit la multiplication de la vitesse de rotation (N_1) de transmission et du couple (C_1) moteur associé. La vitesse de rotation augmente si la roue menée possède un nombre de dents supérieur à la route menante et elle diminue si le nombre de dents est inférieur. Ainsi, le rapport de vitesse R entre les deux roues est donné par l'équation (1.1).

$$R = \frac{z_1}{z_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

Où Z_1 le nombre de dents de la roue menée et Z_2 le nombre de dents de la roue menant.

Soit un engrenage regroupant deux roues dentées dotées de Z_1 et Z_2 nombre de dents et tournants aux fréquences F_1 et F_2 respectivement. Quand une dent de la roue menante s'engrène dans la roue menée, il se crée une prise de charge périodique au rythme d'engrènement des dents [8]. Ce choc se produit selon la fréquence d'engrènement f_{eng} qui est égale à la fréquence de rotation de la roue en question multipliée par son nombre de dents, comme le montre l'équation (1.2).

$$F_{eng} = F_1 \cdot Z_1 = F_2 \cdot Z_2 \quad (1.2)$$

3. Techniques de diagnostic

3.1. Analyse des mesures électriques

3.1.1. L'analyse du courant statorique

Cette technique est un procédé prometteur pour le suivi d'un large éventail de défauts mécaniques, particulièrement les phénomènes impliquant des fluctuations de couple ou de vitesse de rotation, en supplément aux défaillances de nature électrique. Le signal de courant électrique du moteur d'entraînement est sensible aux modulations induites par les excitations dynamiques notamment les oscillations de couple. A partir de là, il est possible de quantifier les fréquences et les formes des modulations afin de localiser l'origine du défaut. Cette technique est basée sur les transformateurs de courant ou les capteurs à effet hall pour une mesure qui a l'avantage d'être non-invasive et peu coûteuse [4].

Les applications globales de l'analyse du courant dans le domaine scientifique et industriel, domaines principaux [5] :

- Le domaine le plus commun est le diagnostic des équipements et les réseaux électriques. La majeure partie de ces installations sont déjà contrôlées depuis plusieurs années en termes de mesures électriques usuelles comme les contrôles des isolements et des alimentations. Récemment, la nouveauté consiste à rajouter aux contrôles systématiques classiques, l'analyse conditionnelle des modulations des courants électriques dans l'optique de caractériser localement le fonctionnement des éléments du système.
- L'analyse des courants est aussi exploitée dans l'étude des défauts de lignes des arbres de rotation. Ces défaillances surviennent sous la forme de défauts de cadrans, jeux d'accouplements ou jeux de clavettes ou encore des résonnances torsionnelles et introduisent des fluctuations anormales de vitesse de rotation et de couple mécanique.

3.1.2. Analyse de la tension

Des variations anormales peuvent indiquer un problème d'alimentation ou une instabilité du système mécanique [6].

3.1.3. Mesure de la puissance

Une perte significative d'énergie peut révéler une dégradation interne du moteur ou une mauvaise efficacité des composants de boîte à engrenage [6].

3.2. Analyse des mesures mécanique et acoustique

Les boîtes à engrenages jouent un rôle dans la transmission de mouvement et de puissance. Pour garantir leur fonctionnement et éviter les pannes, plusieurs mesures mécaniques et acoustiques sont employées.

3.2.1. L'analyse vibratoire

C'est la technique la plus connue et la plus largement employée. Il faut dire qu'elle permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes, Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou Endommagé..., se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine, et donc à une modification de son comportement vibratoire. En plaçant des accéléromètres aux endroits où se transmettent ces efforts, c-à-dsur les paliers des machines, on peut alors suivre l'état de santé de l'équipement. L'analyse vibratoire est une technique utilisée pour le suivi des machines tournantes en fonctionnement, cette dernière engendre des efforts qui seront souvent la cause des défaillances ultérieures (turbulence, chocs, instabilité), ces efforts sont à leur tour causes de vibrations qui vont endommager les structures et les composants des machines. La mesure de ces vibrations va permettre d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, Avant qu'ils causé de dommage irréversible [7].

Ces vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état disfonctionnement de certains composants mécaniques, constituants la machine analysée. L'analyse vibratoire a comme avantages : Les mesures sont faciles à prendre, les défauts sont détectés à un stade précoce, et il est possible de réaliser un diagnostic approfondi.

3.2.2. L'analyse vitesse de rotation

La vitesse de rotation permet de trouver les composants défectueux en reconnaître les fréquences caractéristiques ou principale (roulements, engrenages, etc.). Elle est également utilisée pour coordonner les signaux de vibration ou de synchronisé dans le temps, essentiel pour une analyse correcte.

3.2.3. L'analyse de couple

Le couple est l'effort transmis par la machine. Un changement de couple anormal peut indiquer une usure des engrenages, de désalignement, de dégagement de la lubrification. En suivi du couple sur temps ou en régime transitoire, peut être repère des pertes d'efficacité ou d'une friction excessive.

3.2.4. L'analyse Acoustique

L'analyse acoustique repose sur l'étude des sons que ce soit en basse fréquence ou en haute fréquence via l'émission acoustique basée sur les ultrasons (des sons dont la fréquence

dépasse 20 KHz) pour définir l'état de santé des matériaux. Cette technique est capable de détecter différents phénomènes tels que la propagation des fissures et les frottements au sein des éléments tournants.

De nombreuses analogies existent entre l'analyse vibratoire et l'émission acoustique. En effet, l'émission acoustique est causée par des déformations statiques ou dynamiques au sein d'un élément mécanique sous contrainte de tensions. Ces déformations créent des micro-déplacements internes produisant ainsi des ondes à hautes fréquences. L'atténuation rapide de ces ondes oblige à placer le capteur acoustique à proximité de la source. Cette contrainte introduit des erreurs de sensibilité, surtout vis-à-vis du bruit ambiant. Ainsi, cette analyse est souvent difficile à mettre en œuvre et présente des problèmes inhérents à la répétabilité des mesures [8].

4. Méthodes de traitement de signal

4.1. Analyse temporelle

L'analyse dans le domaine temporel vise à exploiter l'information temporelle ainsi que l'information relative aux amplitudes contenue dans les signaux pour détecter les défauts. La variation d'amplitude du signal reflète la présence du défaut et la périodicité peut indiquer la source possible du défaut [9]. Les approches dans le domaine temporel sont appropriées quand des composantes périodiques sont observées et quand les défauts engendrent de larges bandes fréquentielles suite aux impulsions périodiques. Comme montré dans la figure 1.1, les formes d'ondes temporelles permettent de voir les changements des signatures de défaut mais il est souvent difficile de diagnostiquer la source des défaillances.

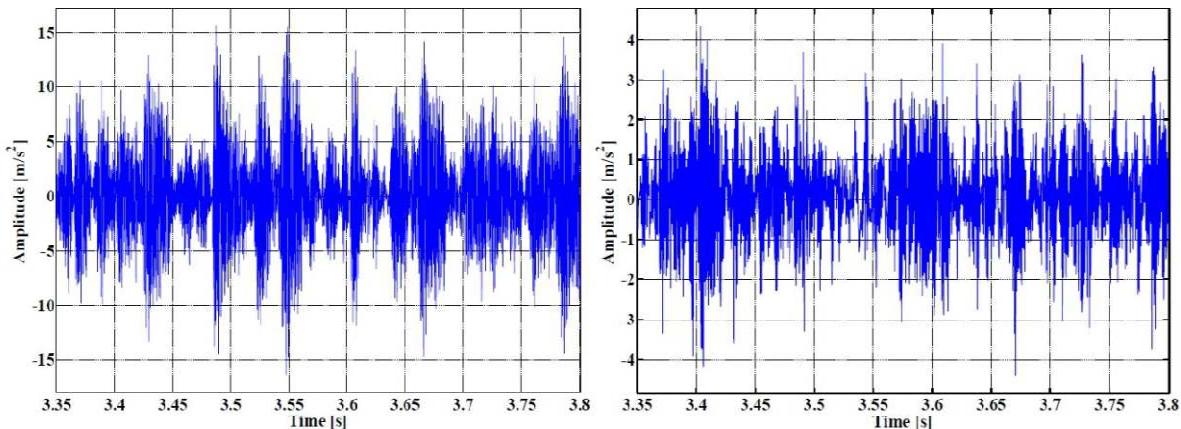


Figure 1.1: Forme d'onde du signal vibratoire en temporel : sain et avec défaut [9].

4.2. Valeur efficace (V_{rms})

C'est l'indicateur scalaire le plus couramment utilisé, il permet de mesurer l'énergie moyenne du signal, permet de détecter des dissipations d'énergie anormalement élevées accompagnant la naissance d'un défaut. La valeur RMS, grâce à sa simplicité et sa rapidité d'exécution, est l'un des premiers indicateurs utilisés dans l'industrie. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc

éventuellement une défaillance [10]. Ceci rendant la détection précoce difficile est un point faible pour la maintenance conditionnelle.

La valeur efficace ou V_{rms} (root mean square), donnée par l'expression suivante :

$$V_{rms}(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1.3)$$

Avec : N : est le nombre d'échantillons,

x_i : la valeur de d'échantillons considéré.

4.3. Le Kurtosis (Ku)

Le kurtosis, aussi appelé coefficient d'aplatissement est une mesure statistique de la forme d'une distribution de données [11]. Il évalue l'importance des valeurs extrêmes (pics) par rapport à une distribution normale. Le kurtosis d'une distribution normale est égal à 3, il est supérieur à 3, si la distribution devienne plus centrée, ce qui indique la présence d'un défaut et il est inférieur à 3 si la distribution est aplatie. Il est donné par l'expression suivante :

$$Ku(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4} \quad (1.4)$$

Avec : \bar{x} est la moyenne des amplitudes,

σ : L'écart-type de la distribution.

4.4. Le facteur de crête (Fc)

Un facteur de crête voisin de $\sqrt{2}$, alors qu'une vibration de type impulsif aura un facteur de crête plus important. Lorsqu'il n'y a pas de défaut, le facteur de crête reste proche de trois « 3 », sans être aussi stable, et il faut rappeler que l'apparition d'un défaut entraîne l'augmentation du facteur de crête.

Le facteur de crête est défini comme étant le rapport de la valeur crête sur la valeur efficace de l'amplitude enregistrée [12] :

$$Fc(x) = \frac{|max(x)|}{V_{rms}(x)} \quad (1.5)$$

Avec : $|max(x)|$ est la valeur maximale (crête) du signal $x(t)$.

4.5. Variance(Var)

La variance en vibration est une mesure statistique qui permet de quantifier la dispersion ou la variabilité d'un signal de vibration et courant et tension autour de sa moyenne. En d'autres termes, elle mesure la variation des amplitudes et les différentes fréquences, et elle donne une idée de la stabilité du signal. Plus la variance est élevée, plus les variations d'amplitude sont importantes. C'est un indicateur de la régularité du comportement du système [1]. Une variance élevée peut signaler un problème ou une anomalie dans le fonctionnement de la machine. La variance est définie comme la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne d'un ensemble de données selon théorème de *König-Huygens*. Elle est exprimée comme suit :

$$\text{Var}(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.6)$$

4.6. La moyenne (mean)

L'indicateur "moyenne" pour la vibration est simplement la valeur moyenne des mesures de vibration prises sur une période de temps donnée [13]. C'est une mesure qui donne l'intensité moyenne de la vibration et le courant et tension pendant cette période. Ce calcul peut être effectué sur différentes grandeurs physiques liées à la vibration et courant et tension. L'indicateur de moyenne peut être un bon point de départ pour évaluer l'état général d'une machine tournante.

La moyenne de ces valeurs peut être calculée selon la formule classique de la moyenne arithmétique :

$$\text{Moyenne}(x) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.7)$$

Où :

- $\int_0^T x(t) dt$: C'est l'intégrale définie du signal $x(t)$ par rapport au temps t , évaluée sur l'intervalle allant de 0 à T .
- T : C'est un facteur de normalisation. Il divise le résultat de l'intégrale par la durée totale de l'intervalle de temps T . Cela assure que la moyenne est bien une "valeur moyenne" par unité de temps.

4.7. Indicateur composé (HI)

On propose d'utiliser l'indicateur proposé dans le travail d'article [14]. Ce dernier combine l'indicateur statistique « kurtosis » et la variance au carré il permet d'obtenir un indicateur plus robuste qui prend en compte. Il est appelé indicateur de santé HI (en anglais Healthy indicator) et donné par l'expression :

$$HI(x) = \text{ku} \cdot \text{Var}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^4}{(N-1)\sigma^4} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.8)$$

4.2. Analyse fréquentielle

4.2.1. L'analyse spectrale

L'analyse spectrale ou l'analyse de fréquence, c'est la technique la plus ancienne. Ses bases mathématiques remontent au dix-septième siècle suite aux travaux de Sir Isac Newton, le premier qui a introduit le mot spectre comme terme scientifique. Ce n'est qu'en 1822 que l'ingénieur et le physicien Français Jean Baptiste Joseph Fourier introduisit sa célèbre transformée appliquée aux signaux non-périodiques, cette transformée est la généralisation de la série de Fourier appliquée aux signaux périodique discrets, et elle permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Le développement en 1965 par les deux Américains J.W. Cooley et J.W. Tukey d'un algorithme célèbre appelé transformée de Fourier rapide (FFT) a rendu la transformée de Fourier discrète très attractive [15].

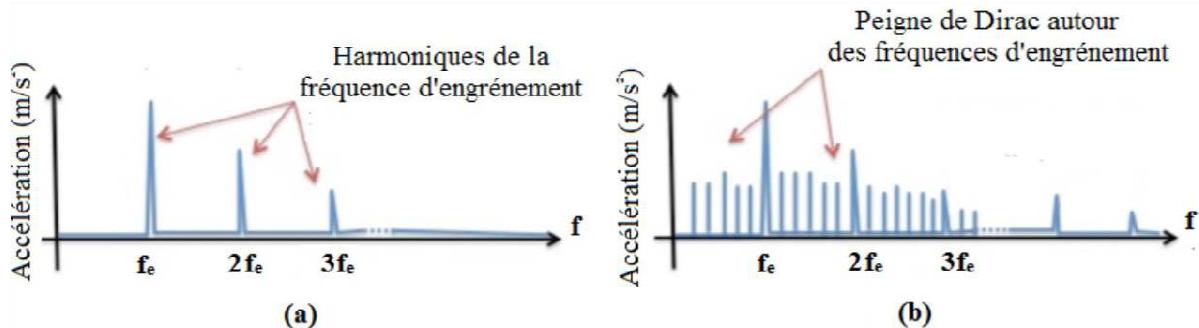


Figure 1.2 : Spectre du signal vibratoire d'engrenages en fonctionnement sain (a) défaut(b).

La technique d'analyse la plus commune est la transformée de Fourier (FFT) et qui est utilisée afin de réaliser le passage dans le domaine spectral. Cependant, cette méthode n'est valable que lorsque le contenu spectral du signal mesuré ne varie pas au cours du temps et qu'il n'y a donc pas de variations au niveau de la vitesse de rotation de la machine. Pour les machines fonctionnant à vitesse constante, les fréquences des excitations produites par chaque élément du système peuvent être déterminées dans une bande fréquentielle donnée comme montré dans la figure 12. Ainsi, les bandes latérales générées par les modulations d'amplitude ou de fréquence peuvent fournir des informations utiles à la détection du défaut. Les modulations d'amplitude sont généralement associées à une dégradation naturelle des dents d'engrenages qui produit des pulsations à un rythme égal à la vitesse de rotation. D'autre part, les modulations de fréquence sont attribuées à des défauts de fabrication et quelques fois aux défauts de fissure [16].

L'équation de transformée de Fourier rapide est donnée par [1] :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1.9)$$

Où : $S(f)$ est la transformée de Fourier du signal $x(t)$,

T : La variable temps,

f : La variable fréquence.

4.2.2 Analyse cepstrale

Le « cepstre » (anagramme du mot « spectre ») est un opérateur mathématique qui, associé à un spectre, permet d'identifier et de quantifier immédiatement toutes les structures périodiques (peignes de raies ou familles de bandes latérales) contenues dans ce spectre. L'une des premières applications du cepstre en 1963, fut l'étude des signaux contenant des échos acoustiques [17]. Il a aussi été utilisé en analyse vocale pour la détection du contenu harmonique et des formants de la voix [18]. Différentes, approches théoriques dans ce domaine ont été réalisés dans les références [17-19]. Boulenger dans la référence [19] définit le cepstre comme le spectre du logarithme de son spectre et parmi les définitions possibles de cet opérateur, deux facilitent la compréhension des propriétés de cet opérateur.

Le cepstre d'un signal $s(t)$ peut être défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier directe (spectre complexe) :

$$c[s(t)] = c(\tau) = TF^{-1}[\log TF[s(t)]] \quad (1.10)$$

τ : a dimension d'un temps, en (s)appelé « Quéference », (anagramme du mot Fréquence).

Cette définition est particulièrement intéressante dans le cas d'un signal vibratoire, puisqu'une vibration est le produit de convolution d'une force d'excitation par la réponse impulsionnelle de la structure au point de fixation du capteur [19].

4.2.3. Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe ou la HFRT (High Frequency Resonance Technique) s'avère une technique complémentaire à celle du cepstre qui est pénalisé par sa grande sensibilité au bruit et aux fluctuations aléatoires de la vitesse de rotation, comme le cepstre, la HFRT permet d'assurer la détection et le suivi d'évolution de défauts induisant des forces impulsionales périodiques mais dans une plage fréquentielle considérablement plus étendue. La HFRT repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la Transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure. En général, les composantes fréquentielles les plus énergétiques dans le spectre du signal. Ainsi, il devient alors possible d'extraire des informations basses fréquences difficiles

à détecter sur une porteuse haute fréquence. Puisque le filtrage passe-bande nécessite la connaissance au préalable des fréquences de résonance du système, ce qui n'est pas toujours évident à déterminer à partir du spectre large bande. Le problème de la HFRT réside dans le choix du type du filtre (passe-bande,Chebytchev, Butterworth, ...etc.).La première étape est le filtrage du signal est effectué afin d'éliminer les composantes indésirables (bruit). Ensuite, l'enveloppe est calculée : il s'agit en quelque sorte d'un redressement du signal. A ce moment, nous disposons d'une information temporelle. Enfin, en ayant recourt à la transformée de Fourier, on obtient le spectre de l'enveloppe qui est un graphe d'amplitude de vibration en fonction de la fréquence. C'est à partir de ce spectre que les conclusions vont être tirées. Elle s'est avérée être un excellent outil de détection des anomalies de fonctionnement de systèmes mécaniques, et sert surtout à dépister et à diagnostiquer les défauts naissants dans les roulements et les boîtes de transmission des puissances dans les machines tournantes considérées vitales pour la production [20-23].

4.2.4. Transformée de Hilbert

La HFRT repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert, Mathématiquement est donnée par [24] :

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} \quad (1.11)$$

Avec $H[s(t)]$ la transformée de Hilbert du signal $s(t)$.

L'analyse d'enveloppe a pour principaux champs d'application:

- Démodulation d'amplitude (détection par représentation spectrale et temporelle du signal de modulation).
- Identification spectrale (fréquence d'apparition) et temporelle (à quel endroit du cycle) des impulsions associées à des défauts mécaniques en développement dans les machines tournantes [25].

4.3. Analyse temps-fréquence

L'analyse des signaux dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel produisent des caractéristiques de signaux relatives exclusivement à leurs domaines respectifs. Quand le signal dans le domaine temporel est transformé dans le domaine fréquentiel, l'information détaillée concernant le domaine temporel est perdue. Ainsi, il est souvent difficile de clairement détecter les symptômes de défauts d'engrenages si la moyenne synchrone, par exemple, est utilisée de façon isolée. Ce genre de techniques est aussi parfois incapable de détecter et de différentier entre les défauts, particulièrement les défauts multiples présents de façon simultanée dans le train d'engrenages [26].

De nombreux travaux s'intéressent à l'analyse des signaux dans le domaine temps-fréquence dans le but d'avoir une représentation plus complète du signal. Les différences majeures entre ces transformées sont leurs résolutions temporelles et fréquentielles respectives. Ainsi, l'analyse temps-fréquence couvre les deux domaines temporels et fréquentiels de façon à réduire le compromis entre leurs résolutions. Les signaux non-stationnaires et modulés sont les plus appropriés pour la distribution temps-fréquence, dont le principe est de donner la distribution de l'énergie du signal dans un espace bidimensionnel temps-fréquence [27]. Ainsi, l'intérêt fondamental de l'analyse temps-fréquence est l'étude des signaux non-stationnaires.

L'une des méthodes les plus utilisées dans l'analyse temps-fréquence est la transformée de Fourier à court terme (STFT). Cette méthode permet le suivi du changement du contenu fréquentiel en fonction du temps, ce qui implique que le défaut devient localisable temporellement. Cette transformée se base sur une fenêtre glissante qui effectue le fenêtrage du signal autour d'un instant particulier et calcule la transformée de Fourier à chaque instant du signal. La transformée de Fourier à court terme nécessite une capacité de calcul importante pour obtenir une résolution de meilleure qualité [28]. De plus, cette technique dépend sensiblement de la largeur du fenêtrage utilisé ce qui limite grande mention champ d'application. Ainsi, malgré son efficacité en général, l'analyse de Fourier à court terme ne se révèle pas optimale dans le contexte des signaux non-stationnaires.

6. Le Kurtosis spectral et le Kurtogramme

Le kurtosis spectral constitue un outil très utile pour caractériser les signaux non stationnaires, dans la plupart des études, cet outil est utilisé pour déterminer la largeur de la bande de fréquence de résonance lors du diagnostic des roulements par analyse d'enveloppe. La bande choisie est celle qui minimise le rapport signal- bruit (SNR : Signal to Noise Ratio). Le kurtogramme est défini comme une cascade du Kurtosis spectrale calculés avec plusieurs fenêtres glissantes [29].

7. Conclusion

La connaissance de nos machines et leur rôle dans la chaîne de production, les types des différentes pièces nous aident à déterminer ce qui est propre de maintenance appropriée pour éviter en fait au maximum les pannes.

Pour deuxième chapitre, il a été question de présenter une étude détaillée notamment l'analyse vibratoire et l'analyse des signatures du courant et tension du moteur asynchrone triphasé appliquée à la détection des défauts mécaniques d'engrenages et roulement, Ce chapitre s'est donc articulé autour de l'étude théorique.

Chapitre 2 : Analyse statistiques des mesures mécaniques et électriques :

Cas de défauts de roulement et d'engrenage

1. Introduction

Les systèmes électromécaniques sont largement exploités et se retrouvent dans tous les types d'industries et de procédés, tels que l'automobile (boîtes de vitesses), l'aéronautique (hélicoptères), les cimenteries ou encore les raffineries. Ces systèmes incluent des éléments mécaniques fortement sollicités, complexes à dimensionner et à réaliser (calculs, choix et traitements des matériaux, taillage des dents, etc.), et susceptibles de présenter des défaillances pouvant limiter leur durée de vie [30].

Dans le cadre de ce travail, le système étudié est composé d'un moteur asynchrone triphasé entraînant une boîte de vitesses. Sept expériences ont été réalisées, chacune correspondant à un état de fonctionnement particulier des composants. Chaque état de santé a été testé dans des conditions de fonctionnement différentes.

2. Données de mesures utilisées

2.1. Description de bancs d'essai

Dans le cadre de ce travail de mémoire, nous présentons un jeu de données issu des mesures de courant, de tension et de vibration d'un système d'entraînement électromécanique. Ce système est composé d'un moteur asynchrone triphasé qui actionne une boîte de vitesses. La boîte de vitesses elle-même est constituée de roulements et d'engrenages, qui sont des composants critiques susceptibles de subir des pannes [31].

Pour étudier ces composants, sept expériences ont été menées, chacune correspondant à un état spécifique de santé des roulements et des engrenages. Ces états de santé ont été testés dans diverses conditions de fonctionnement, permettant ainsi d'évaluer leur impact sur le système dans différents scénarios opérationnels. Cette approche permet de mieux comprendre le comportement du système sous diverses conditions, ce qui est essentiel pour le diagnostic et la maintenance préventive.

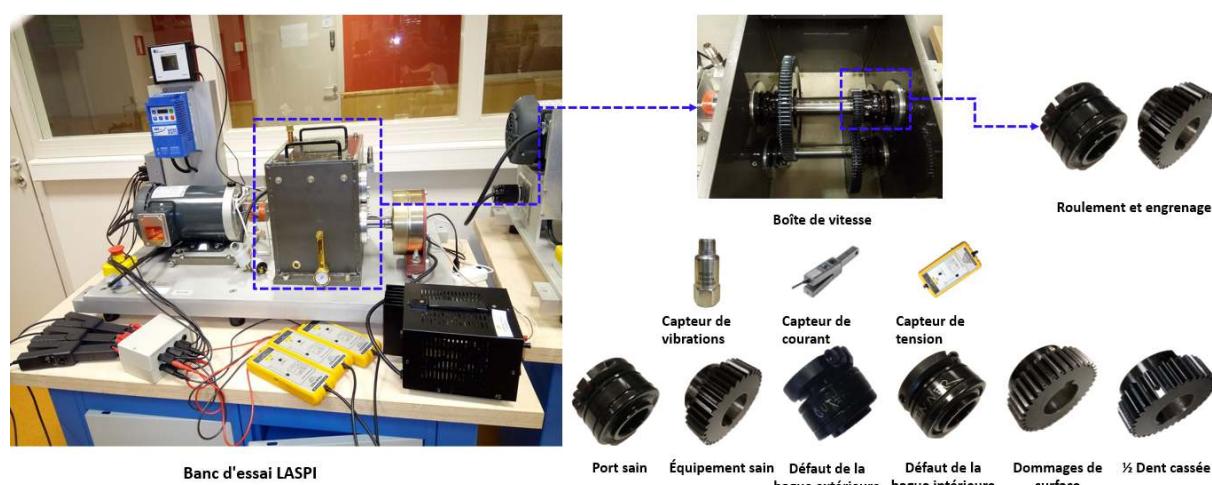


Figure 2.1 Banc d'essai (la boratoire LASPI) [30]

2.2. Méthodes d'obtention des données

Le banc d'essai LASPI est utilisé pour détecter les défauts des roulements et des engrenages d'une boîte de vitesses. Il est constitué d'un onduleur triphasé qui alimente et contrôle un moteur à induction triphasé de 1,5 kW. Ce moteur entraîne un réducteur sur lequel sont positionnés les composants étudiés. Un frein électromagnétique est également relié à la boîte de vitesses, permettant de simuler une charge sur le moteur.

Le réducteur comprend trois arbres : l'arbre d'entrée, l'arbre intermédiaire et l'arbre de sortie. L'arbre d'entrée, directement connecté à l'arbre du moteur, comporte un engrenage et deux roulements placés de chaque côté de la boîte de vitesses. L'engrenage situé du côté du frein possède 29 dents. Les roulements contiennent chacun 9 billes d'un diamètre de 0,3125 pouce, avec un diamètre primitif de 1,5157 pouce et un angle de contact nul. L'arbre intermédiaire dispose également de deux roulements aux mêmes caractéristiques que ceux de l'arbre d'entrée, ainsi que de deux engrenages : le premier, côté moteur, possède 36 dents, tandis que le second, côté frein, en compte 100. Enfin, l'arbre de sortie, directement relié au frein électromagnétique, est équipé des mêmes roulements que les précédents et d'un engrenage côté moteur avec 90 dents.

Le banc d'essai est doté de plusieurs capteurs et d'un système d'acquisition pour collecter les données nécessaires au contrôle. Il comporte trois capteurs mesurant le courant et la tension en sortie de l'onduleur alimentant le moteur, ainsi qu'un accéléromètre placé au plus près des composants étudiés sur l'arbre intermédiaire. Les données sont acquises via des cartes National Instrument 9234 en mode permanent sur une période de 10 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 25,6 kHz. Ces données sont enregistrées dans des fichiers au format .csv contenant sept colonnes : les trois premières représentent les signaux de courant triphasé avec un gain réduit par un facteur 100 ; la quatrième colonne correspond au signal de vibration avec une sensibilité de 100 mV/g ; enfin, les colonnes cinq à sept contiennent les signaux de tension des trois phases avec un gain réduit par un facteur 200.

Sur la base des équipements du banc d'essai décrits ci-dessus, 84 expériences ont été réalisées pour surveiller séparément les défauts des roulements et des engrenages ainsi que leurs combinaisons. Sept états de santé ont été étudiés : un état sain des roulements et des engrenages ; un défaut de surface sur l'engrenage ; une rupture sur une demi-dent ; un défaut sur la bague intérieure des roulements ; un défaut sur la bague extérieure des roulements ; une combinaison entre le défaut de surface sur l'engrenage et celui sur la bague intérieure des roulements ; enfin, une combinaison entre la rupture d'une demi-dent et le défaut sur la bague extérieure des roulements. Chaque état a été testé sous trois vitesses différentes (1500 rpm, 2100 rpm et 2700 rpm) et quatre niveaux de charge (0 %, 25 %, 50 % et 75 %), permettant ainsi une analyse approfondie du comportement du système en fonction des conditions opérationnelles.

3. Analyse des signaux de mesures

3.1. Analyse des valeurs du RMS

La figure 2.2 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

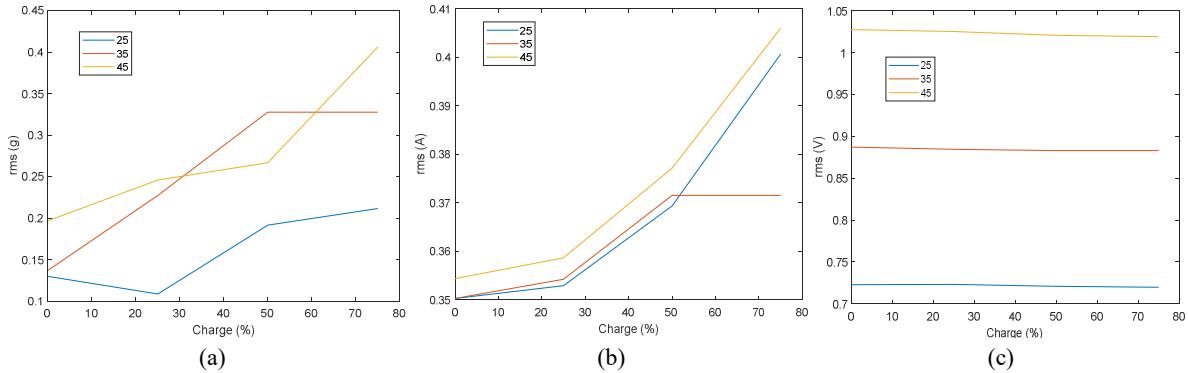


Figure 2.2. Valeurs du RMS pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.3 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

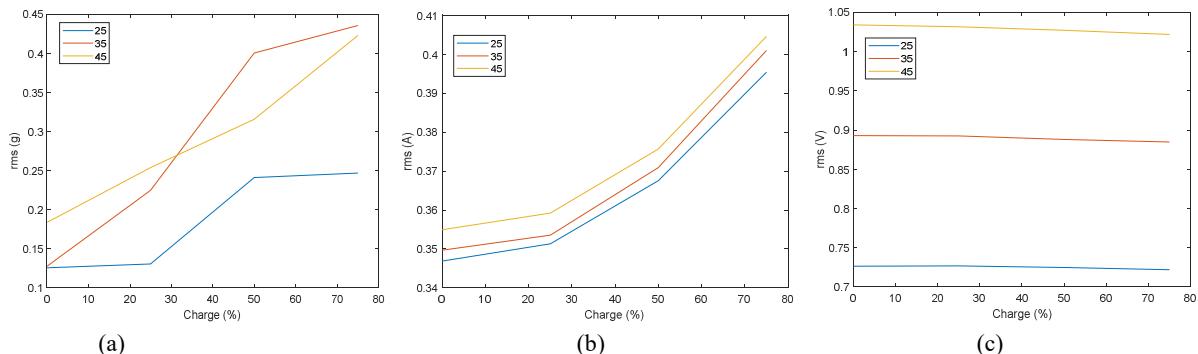


Figure 2.3.Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.4 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements externe en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, la figure 2.5 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (une dent cassé), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

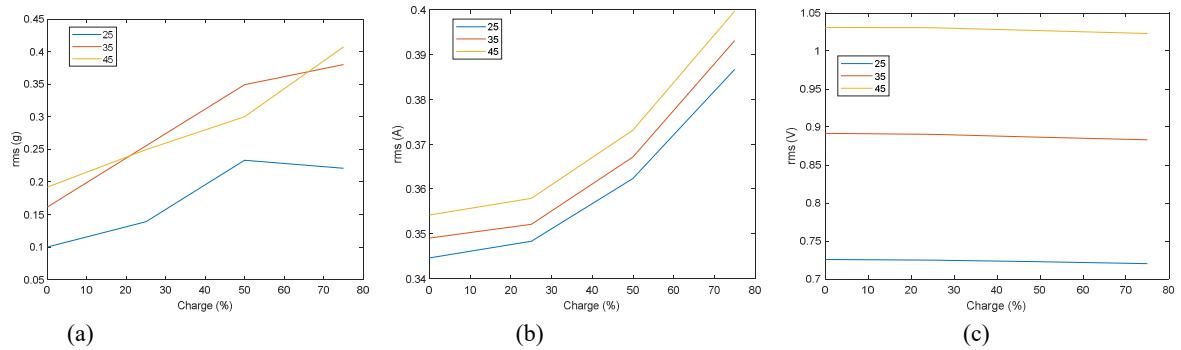


Figure 2.4. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe : (a)vibration, (b) courant et (c)tensions

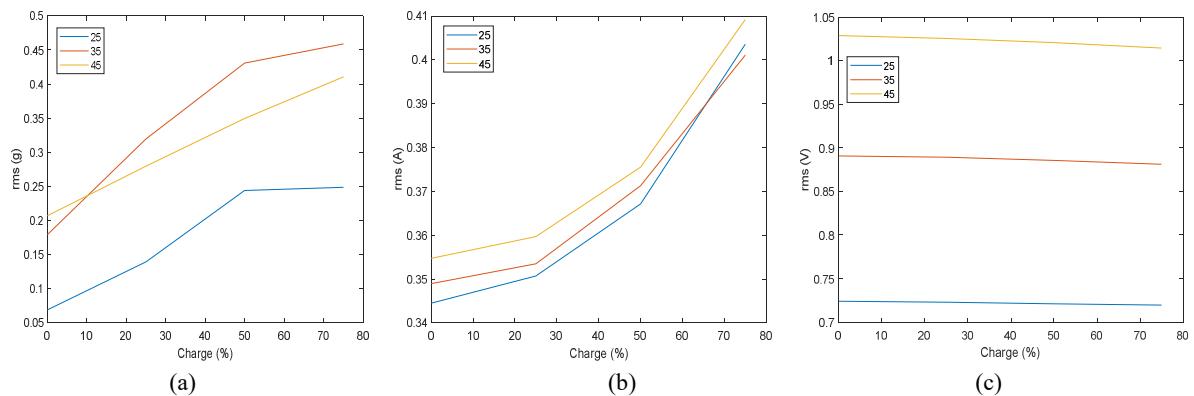


Figure 2.5. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (dent cassé):(a)vibration, (b)courant et (c)tensions

La figure 2.6 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (défaut de surface-écaillage sur une dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

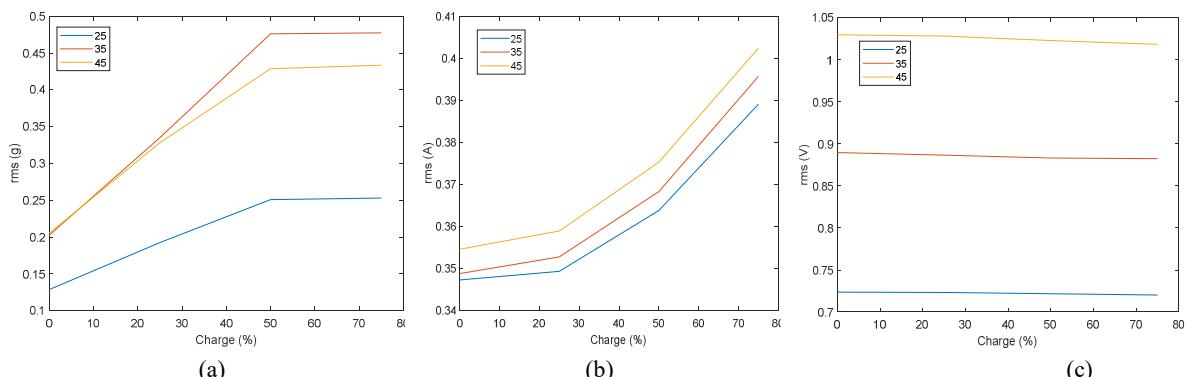


Figure 2.6. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) :(a)vibration, (b) courant et (c)tensions

La figure 2.7 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de bague interne de

roulement et défaut d'une dent cassée d'engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

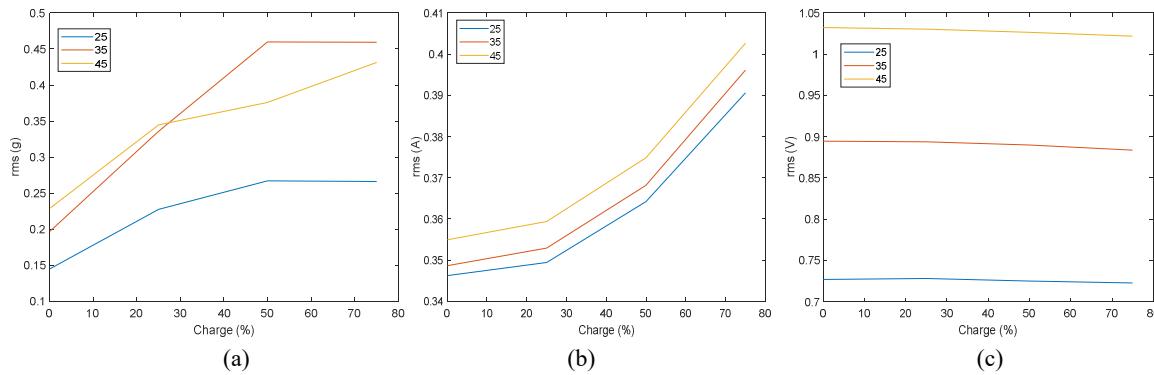


Figure 2.7. Valeurs de ‘RMS’ pour les mesures de la machine défaut mixte (baguette interne et dent cassée) : (a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.8 représente les valeurs efficaces ‘RMS’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec d'un défaut mixte (défaut de roulement externe et surface d'une dent usée d'engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

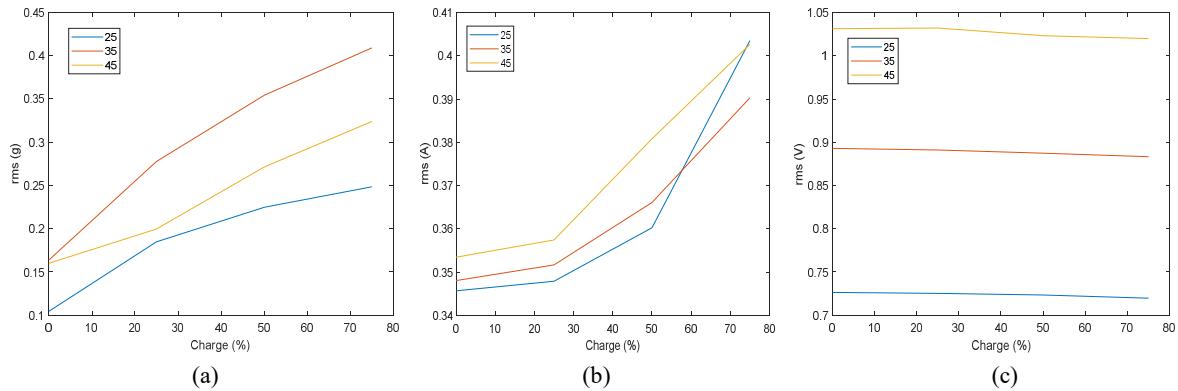


Figure 2.8. Valeurs de RMS pour les mesures de la machine avec Défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface)) : (a)vibration, (b) courant et (c)tension

Le tableau 2.1 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type d'anomalie	Analyse de vibration	Analyse de courant	Analyse de Tension
Machine saine	Faible RMS, augmente modérément avec la charge.	RMS stable, augmente très légèrement.	Presque aucune variation, tension très stable.
Roulement bague interne	RMS augmente net, surtout à haut charge, montre bien l'impact cyclique du défaut.	Légère augmentation de RMS avec la charge, moins marquée en vibration.	Presque aucune variation, quasi identique n'a l'état sain.

Roulement bague externe	RMS augmente, surtout à haut charge, montre bien l'impact cyclique du défaut.	Légère augmentation de RMS avec la charge.	Presque aucune variation, quasi identique à l'état sain.
Engrenage (dents casse)	Croissance importante de RMS et significative résultant des chocs périodique.	RMS augmente légèrement, dépend de la charge.	Courbe très similaire à l'état sain.
Engrenage (usure surface)	Croissance importante de RMS et significativement de défaut.	RMS augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.
Mixte (roulement interne et Engrenage dents casse)	Croissance de RMS et significativement de défaut.	RMS augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.
Mixte (roulement externe et Engrenage usure surface)	Croissance de RMS et significativement de défaut.	RMS augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.

Tableau 2.0.1 récapitulatif de l'indicateur RMS-comparaison entre états sain et défauts

Le RMS des vibrations a démontré une sensibilité à la présence de défauts, juste à charge et vitesse élevées (phase plus dégrader) ce qui indique un niveau d'énergie vibratoire modéré. Donc la détection n'est pas précoce pour les vibrations, tandis que le rms courant et tension montre l'absence de sensibilité face aux défauts mécaniques donc n'est pas un indicateur fiable pour ou mesures électriques.

3.2. Analyse des valeurs du kurtosis

La figure 2.9 représente les valeurs du kurtosis des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

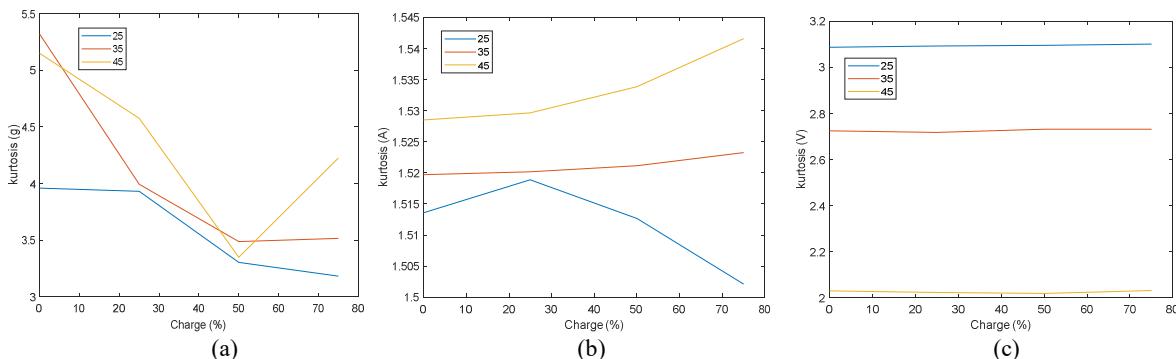


Figure 2.9. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration, (b) courant et (c)tensions

La figure 2.10 représente les valeurs du kurtosis des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, La figure 2.11 représente les valeurs du kurtosis des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec défaut de roulements externe en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

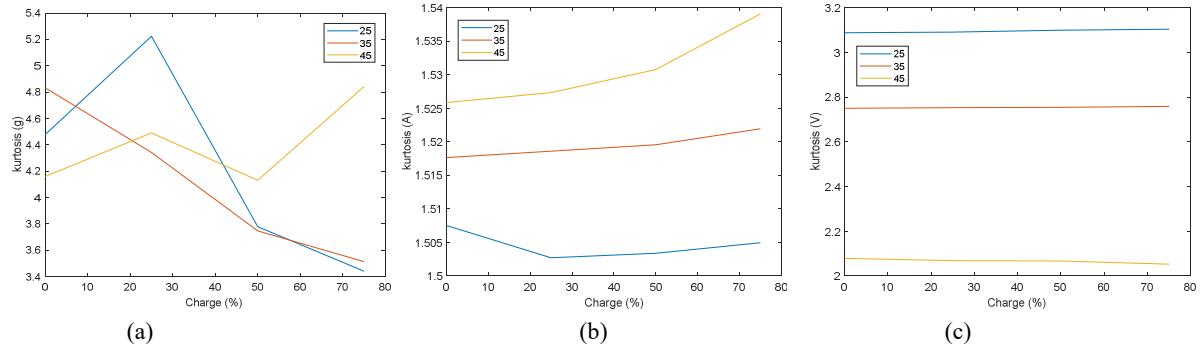


Figure 2.10. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

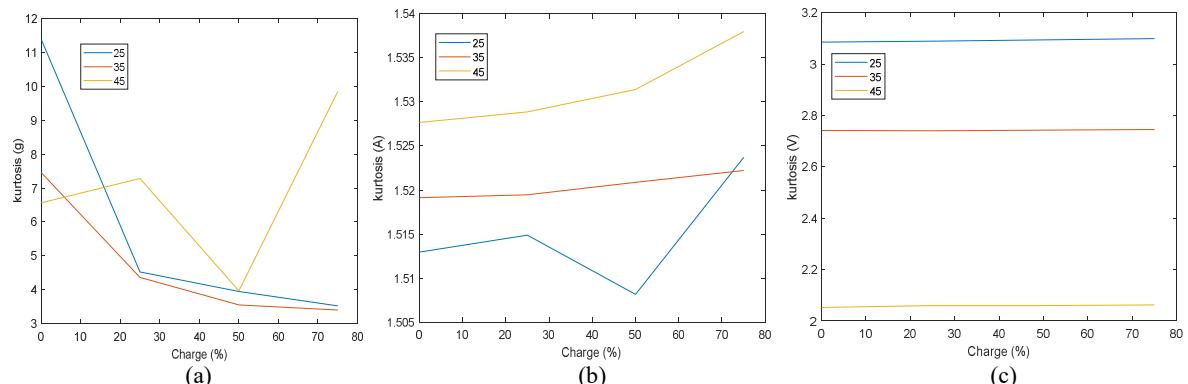


Figure 2.11. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.12 représente les valeurs du kurtosis des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d'engrenage (dent cassée), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

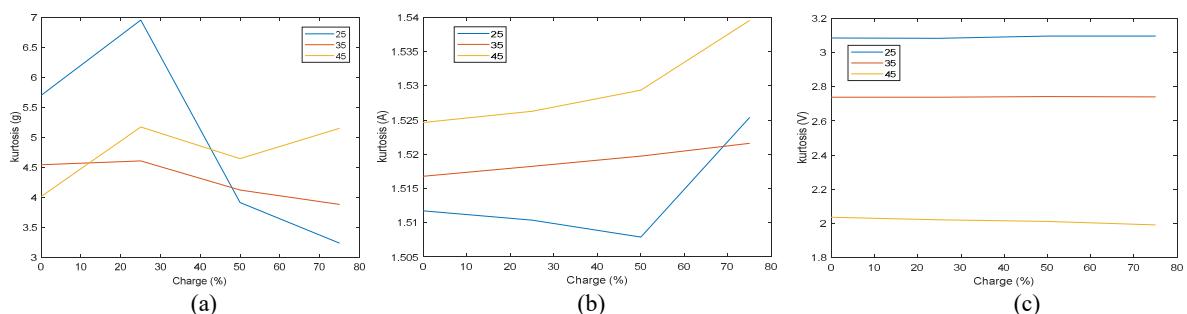


Figure 2.12. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (dent cassé) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.13 représente les valeurs du kurtosis des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d'engrenage (dent cassée), effectuées sur la machine avec un défaut d'engrenage (usure de surface d'une dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

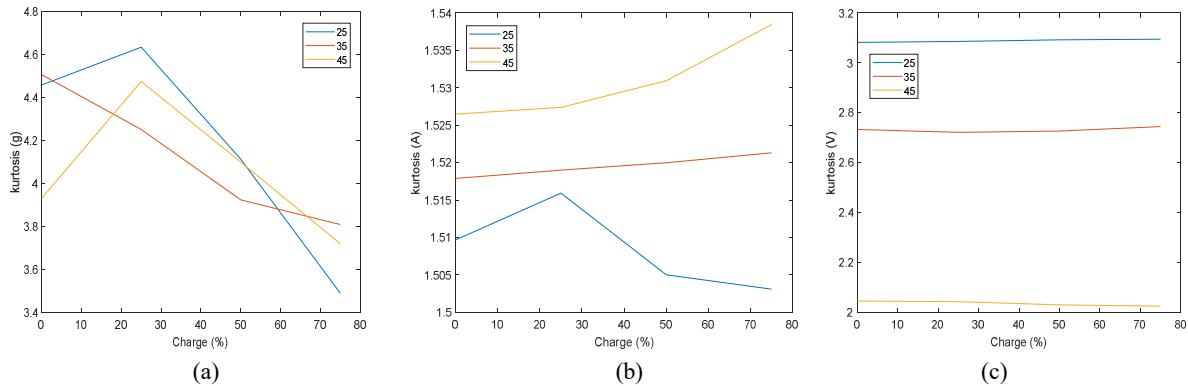


Figure 2.13. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine en défaut d'engrenage (Défaut de surface) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.14 représente les valeurs ‘kurtosis’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de bague interne de roulement et défaut d'une dent cassée d'engrenage en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

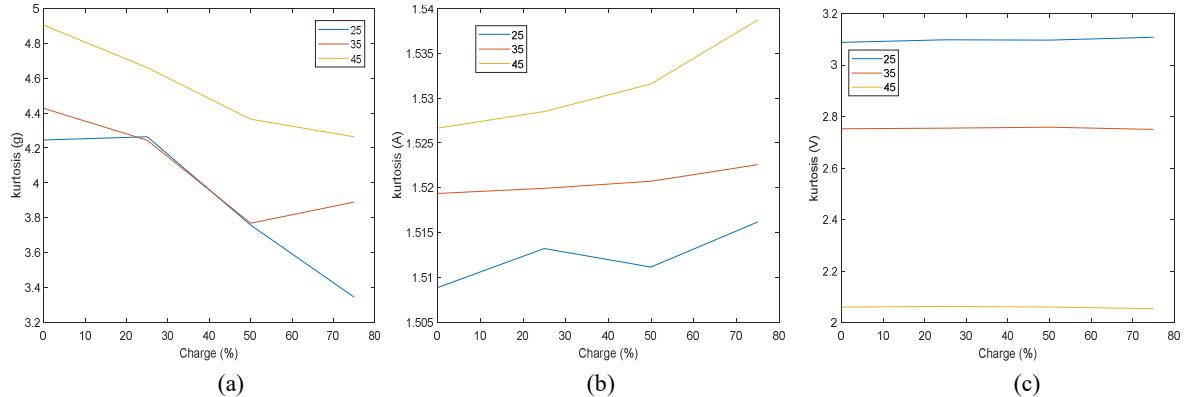


Figure 2.14. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine avec défaut mixte (baguette interne et dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.15 représente les valeurs ‘kurtosis’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec d'un défaut mixte (défaut de roulement externe et usure de surface d'une dent usée d'engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

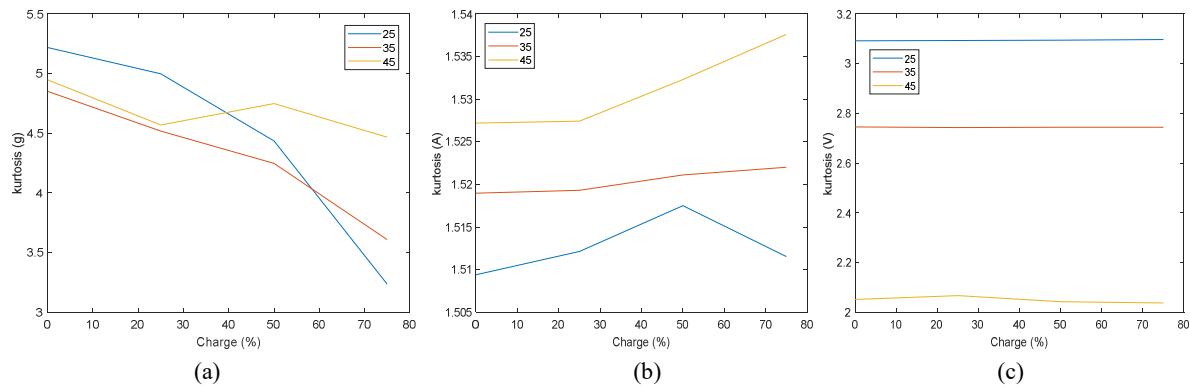


Figure 2.15. Valeurs de kurtosis pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

Le tableau 2.2 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type d'anomalie	Analyse de vibration	Analyse de courant	Analyse de Tension
Machine saine	Les valeurs de kurtosis supérieures à 3 au début(pic),mais diminuent avec la charge.	Le kurtosis inférieur à 3, très stable.	Toutes les valeurs sont constantes, proches de 3 distribution normale.
Roulement bague interne	Valeurs élevées au départ (jusqu' à 5.5g), surtout à faible charge montre bien du défaut.	Le kurtosis inférieur à 3, très stable.	Presque aucune variation, quasi identique à l'état sain.
Roulement bague externe	Valeurs élevées au départ (jusqu' à 11), surtout à faible charge montre bien des défauts.	Légère élévation.	Très peu de variation, valeurs autour ou juste en dessous de 3.
Engrenage (dents casse)	Les valeur de kurtosis supérieur à 3 jusqu' à 7 surtout à faible charge.	Légère élévation.	Très peu de variation, valeurs autour ou juste en dessous de 3.
Engrenage (usure surface)	Très peu de variation, qui ne montre pas bien des défauts.	kurtosis augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.
Mixte (roulement bague interne et Engrenage dents casse)	Valeur de kurtosis supérieur à 4 à faible charge qui montre bien du défaut.	kurtosis augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.
Mixte (roulement bague externe et Engrenage usure surface)	Valeur de kurtosis supérieur à 4 à faible charge qui montre bien du défaut.	kurtosis augmente légèrement.	Courbe très similaire à l'état sain.

Tableau 2.0.2récapitulatif de l'indicateur kurtosis-comparaison entre états sain et défaut

Le kurtosis des vibrations est très sensible aux impacts mécaniques son réponse à détection est rapide dès l'apparition d'un défaut et donc utile pour la détection précoce des défauts contrairement au rms, par contre le kurtosis du courant montre une légère variation aux impacts mécaniques, capteur de tension ne permettent pas une surveillance efficace et faible de l'état de santé d'une machine tournante.

3.3. Analyse des valeurs de la moyenne

La figure 2.16 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

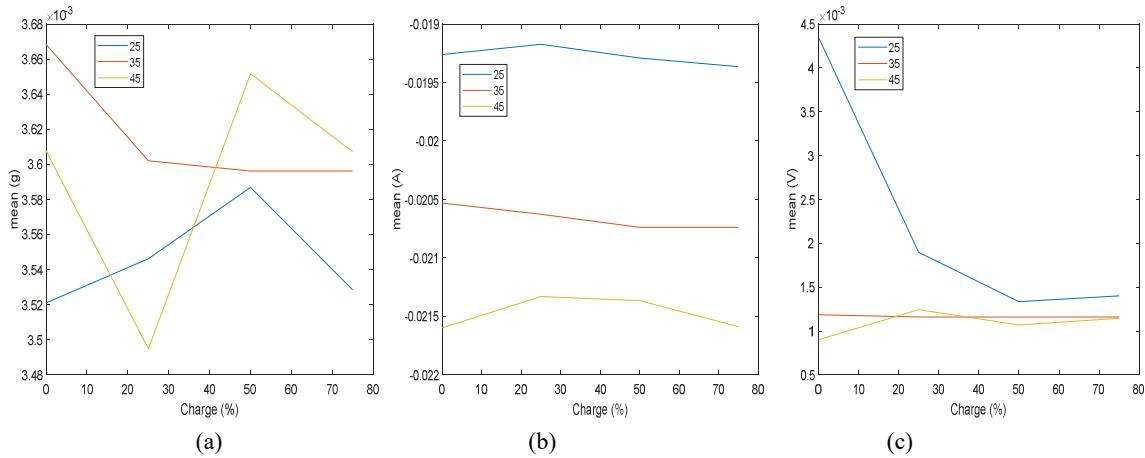


Figure 2.16. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en état sain : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.17 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

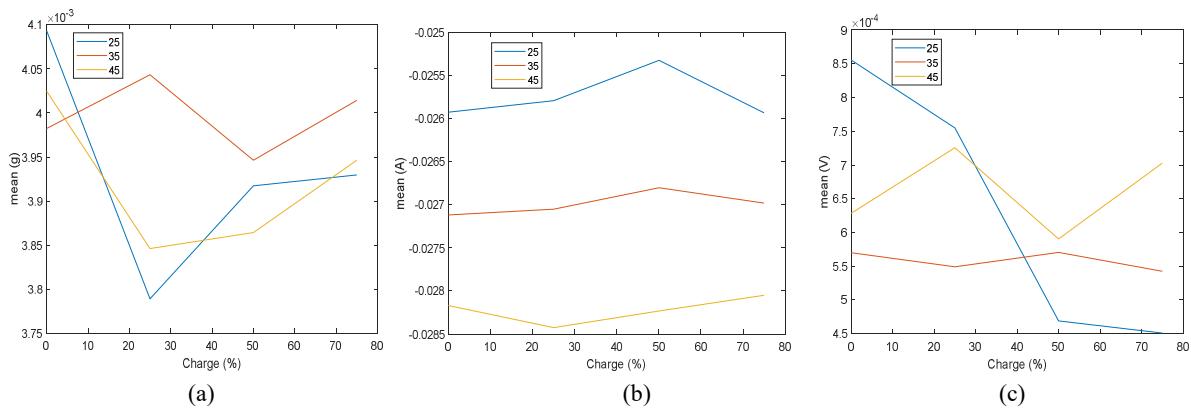


Figure 2.17. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne : (a) vibration, (b) courant et (c) tensions

La figure 2.18 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements externe en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

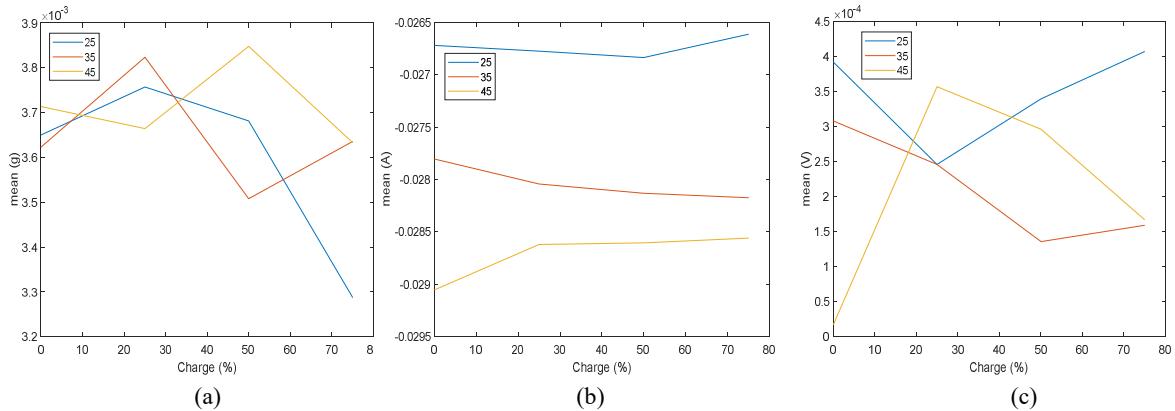


Figure 2.18. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.19 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (une dent cassé), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

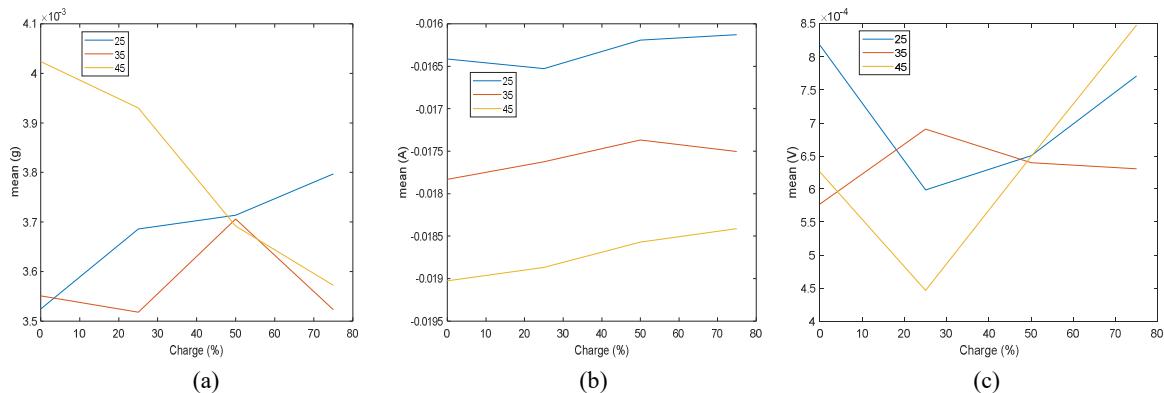


Figure 2.19. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.20 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (défaut de surface-écaillage sur une dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

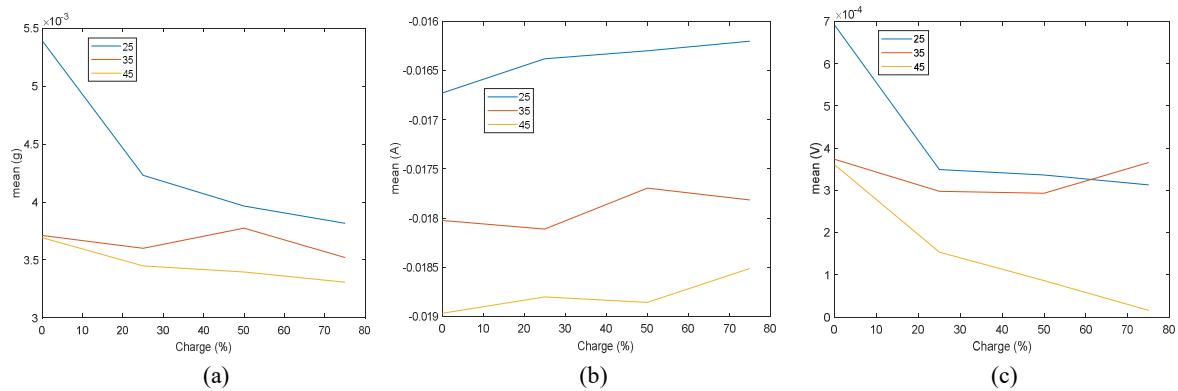


Figure 2.20. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.21 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec d’un défaut mixte (défaut de bague interne de roulement et défaut d’une dent cassé d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, La figure 2.22 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec d’un défaut mixte (défaut de roulement externe et surface d’une dent usée d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

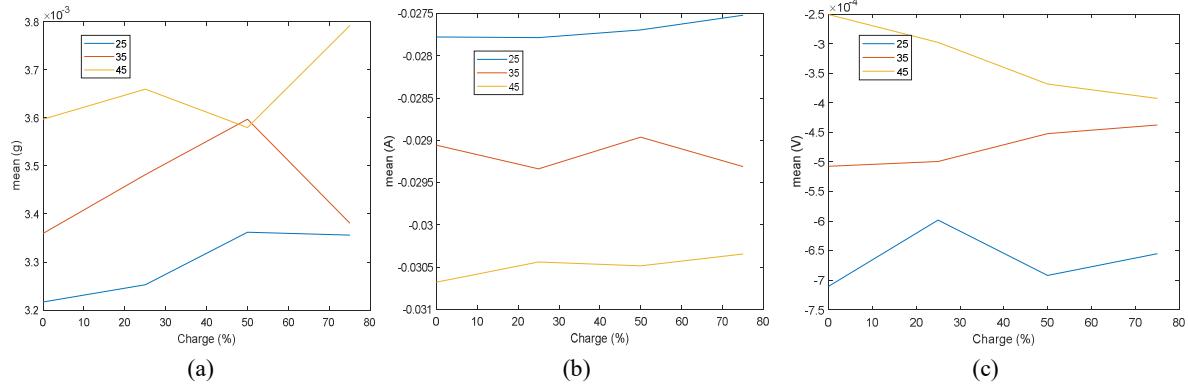


Figure 2.21. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine avec défaut mixte (bague interne et dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

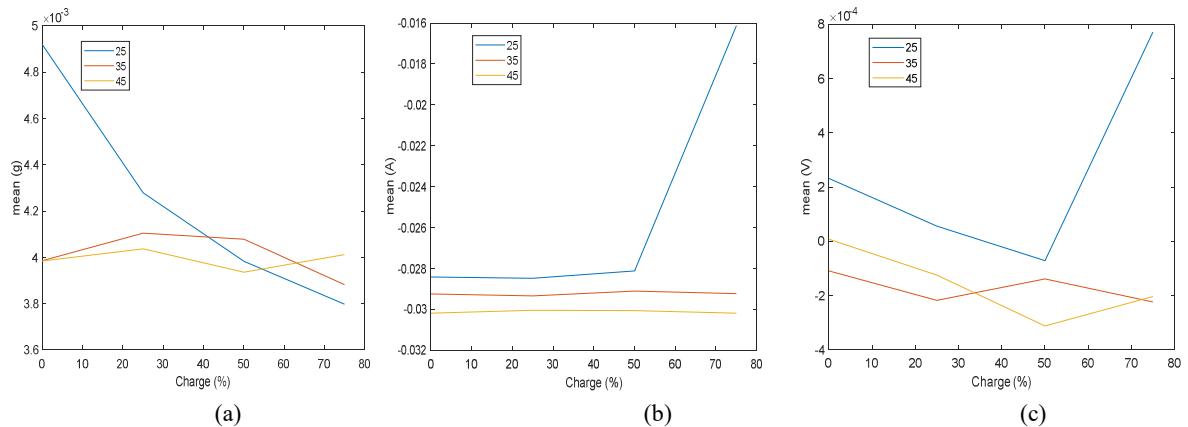


Figure 2.22. Valeurs de la moyenne pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d’engrenage (surface)) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

Le tableau 2.3 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type de défauts	Analyse Capteur vibration	Analyse Capteur courant	Analyse Capteur tension
Machine saine	Sert de référence pour les valeurs moyennes.	Sert de référence pour les valeurs moyennes.	Sert de référence pour les valeurs moyennes.
Roulement bague interne	Similaire à la machine saine.	Légèrement plus élevée qu'en état sain.	Similaire à la machine saine

Roulement bague externe	Similaire à la machine saine.	Légèrement plus élevée qu'en état sain	Similaire à la machine saine.
Engrenage (dents casse)	Similaire à la machine saine.	Similaire à la machine saine et aux défauts de roulement	Similaire à la machine saine et aux défauts de roulement.
Engrenage (usure de surface)	Ordres de grandeur similaires	Similaire à la machine saine et aux autres défauts simples.	Similaire à la machine saine et aux autres défauts simples
Mixte (roulement bague interne et Engrenage dents casse)	Similaire à la machine saine et aux défauts simples.	Similaire à la machine saine et aux défauts simples.	Similaire à la machine saine et aux défauts simples.
Mixte (roulement bague externe et Engrenage usure de surface)	Similaire à la machine saine et aux défauts simples	Peut-être légèrement plus élevée à haute charge et haute vitesse que pour les défauts simples.	Similaire à la machine saine et aux défauts simples.

Tableau 2.0.3récapitulatif de l'indicateur moyenne-comparaison entre états sain et défauts

La valeur moyenne des signaux (vibration, courant, tension) ne montant pas une sensibilité aux défauts mécaniques, alors n'est pas un indicateur réactif ou sensible aux défauts ne constitue pas un indicateur fiable pour la détection précoce de défauts, parce que son utilisation limite a l'observation générale du comportement de la machine.

3.4. Analyse les valeurs facteurs crête

La figure2.23 représente les valeurs ‘facteurs crête’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

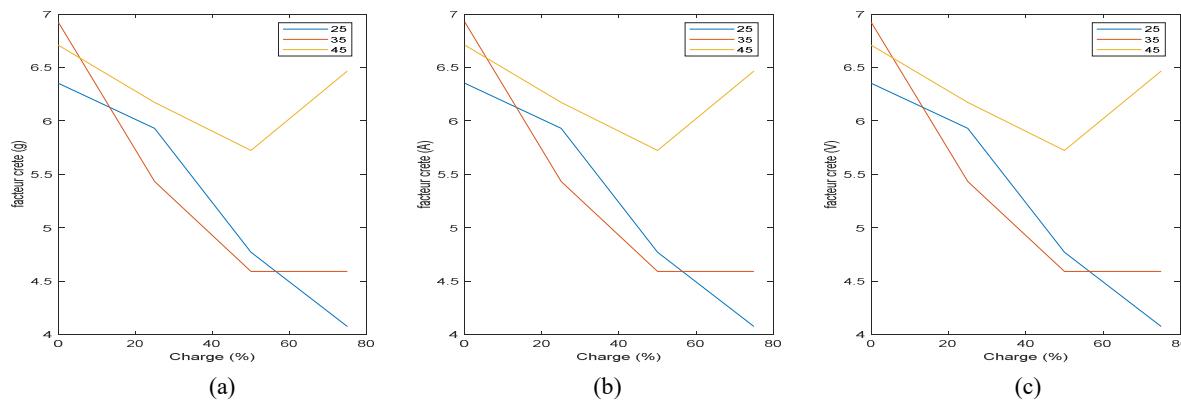


Figure 2.23. Valeur de facteur crête pour les mesures de la machine en état sain : (a)vibration et (b) courant et (c)tension

La figure 2.24 représente les valeurs ‘facteur crête ‘des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, La figure 2.25 représente les valeurs ‘facteur crête’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements externe en fonction de variation de la charge et de la vitesse de rotation.

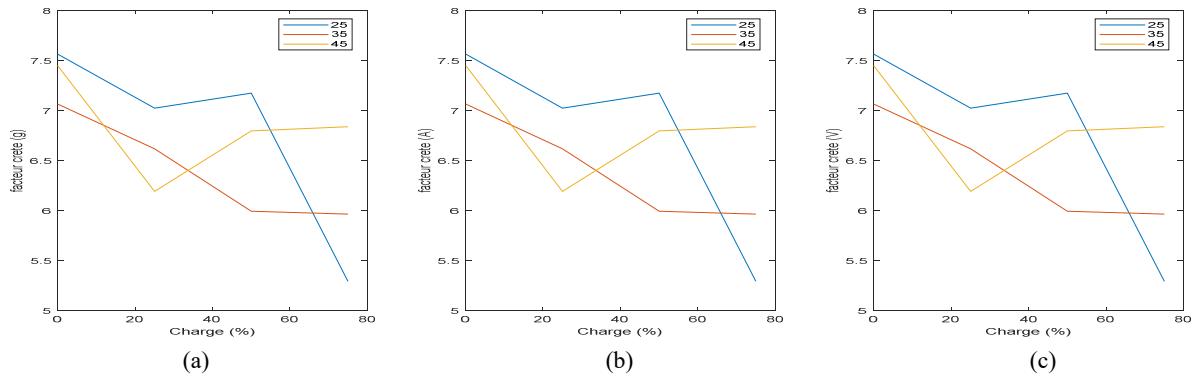


Figure 2.24. Valeurs de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

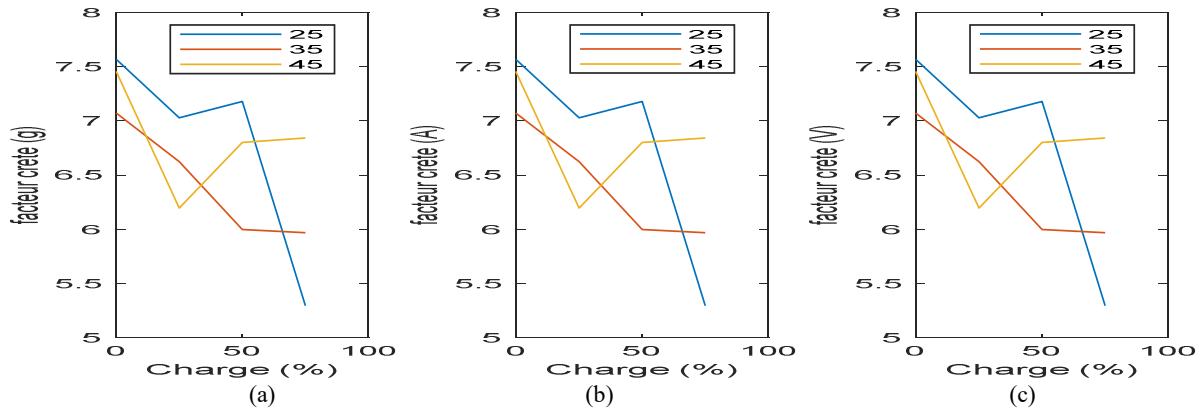


Figure 2.25. Valeurs de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.26 représente les valeurs ‘facteur crête’ des mesures, vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (une dent cassé), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

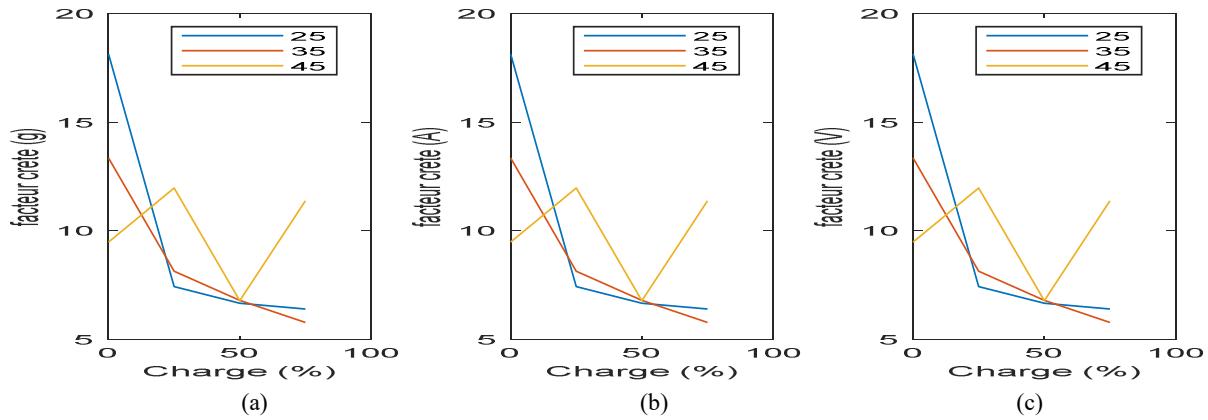


Figure 2.26. Valeur de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.27 représente les valeurs ‘facteur crête’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (défaut de surface-écaillage sur une Dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

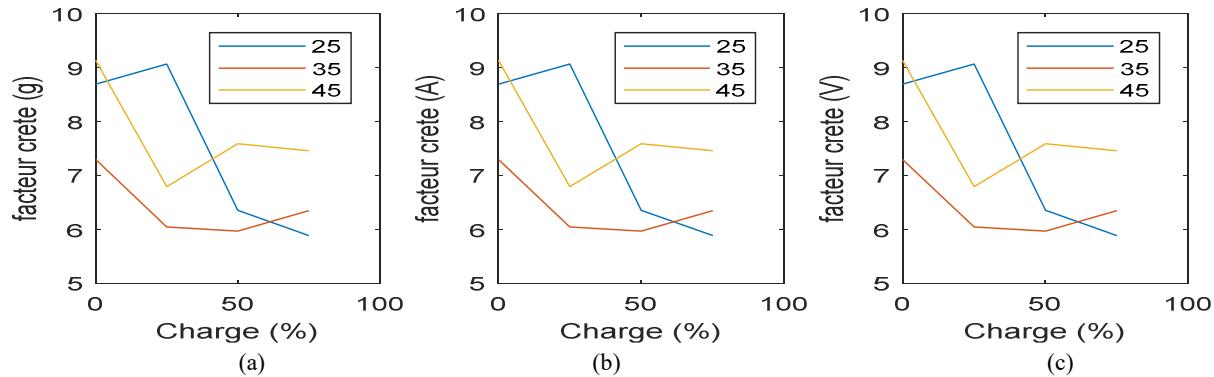


Figure 2.27. Valeur de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (défaut de surface) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.28 qui représentent les valeurs ‘moyenne’ des mesures, vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec défaut mixte(défaut de bague interne de roulement et défaut d’une dent cassé d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

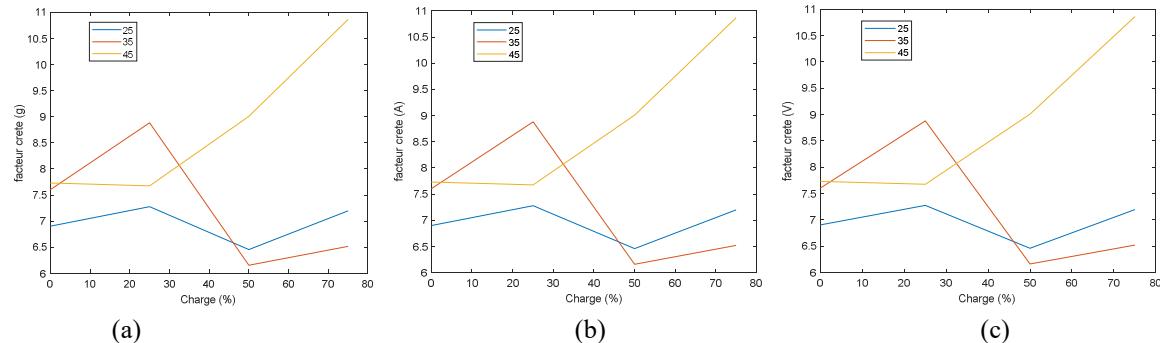


Figure 2.28. Valeur de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine Défaut mixte (défaut de roulement interne et défaut d’engrenage (dent cassé)) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.29 représente les valeurs ‘moyenne’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de roulement externe et surface d’une dent usée d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

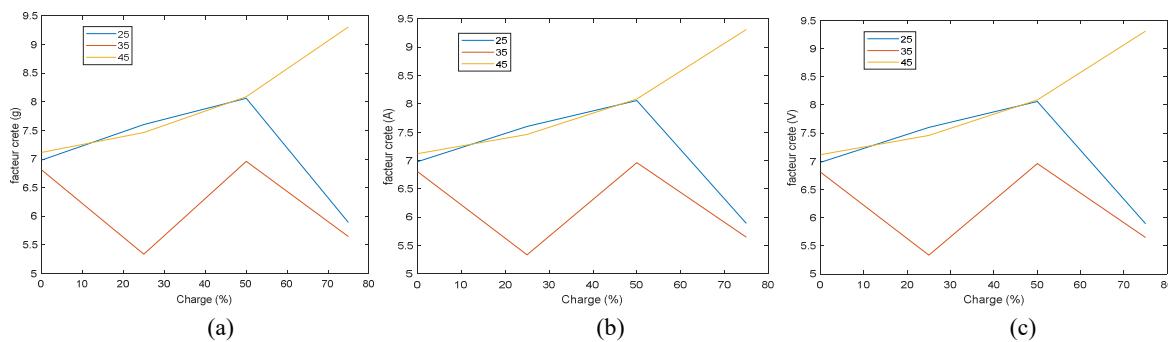


Figure 2.29 Valeur de ‘facteur crête’ pour les mesures de la machine avec Défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d’engrenage (surface)) :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

Le tableau 2.4 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type de défauts	Analyse Capteur vibration	Analyse Capteur courant	Analyse Capteur tension
Machine saine	Les valeurs de facteur crête diminue régulièrement avec la charge et la vitesse.	Valeurs stable et décroissantes.	Valeurs stable et décroissantes.
Roulement bague interne	Peut de variation et les courbes sont irrégulières et instables qui montre a présence de défaut	Peut de variation et les courbes sont irrégulières et instables.	Peut de variation et les courbes sont irrégulières et instables.
Roulement bague externe	Valeurs de crête augmente est sont irrégulières et instables.	Valeurs de crête très élevées est sont irrégulières et instables.	Valeurs de crête très élevées est sont irrégulières et instables.
Engrenage (dents casse)	Le facteur crête très élèves et les courbes sont irrégulières et instables i pulsionnel qui montrent le choc brusques.	Le facteur crête très élèves et les courbes sont irréguliers et instables.	Le facteur crête très élèves et les courbes sont irréguliers et instables.
Engrenage (usure surface)	Peut de variation au départ augmenter jusqu'a 8.3g à la charge 30% puis démine.	Peut de variation au départ augmenter jusqu'a 8.3A à la charge 30% puis démine.	Peut de variation au départ augmenter jusqu'a 8.3V à la charge 30% puis démine.
Mixte (roulement bague interne et Engrenage dents casse)	Valeurs de crête très élevées est surtout a la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables qui montre bien la présence de défaut.	Valeurs de crête très élevées est surtout a la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables.	Valeurs de crête très élevées est surtout a la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables.
Mixte (roulement bague externe et Engrenage usure surface)	Les Valeur augmenté jusqu'a 9.5g pour la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables.	Les Valeur augmenté jusqu'a 9.5A pour la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables.	Les Valeur augmenté jusqu'a 9.5V pour la vitesse 45hz, les courbes sont irrégulières et instables.

Tableau 2.0.4récapitulatif de l'indicateur facteurs crête-comparaison entre états sain et défauts

Le facteur de crête est un indicateur précoce et efficace pour les signaux des vibrations, notamment pour détecter des défauts brusques de type impulsions comme montre les signaux défauts d'engrenages dent casse et défaut mixte (dent casse et roulement

bague interne), en revanche il est inadapté pour les signaux de courant et tension, car les courbes sont très similaires quel que soit le défaut, ce qui rend son interprétation peu fiable sur ces signaux.

3.5. Analyse les valeurs kurtosis*var^2

La figure 2.30 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

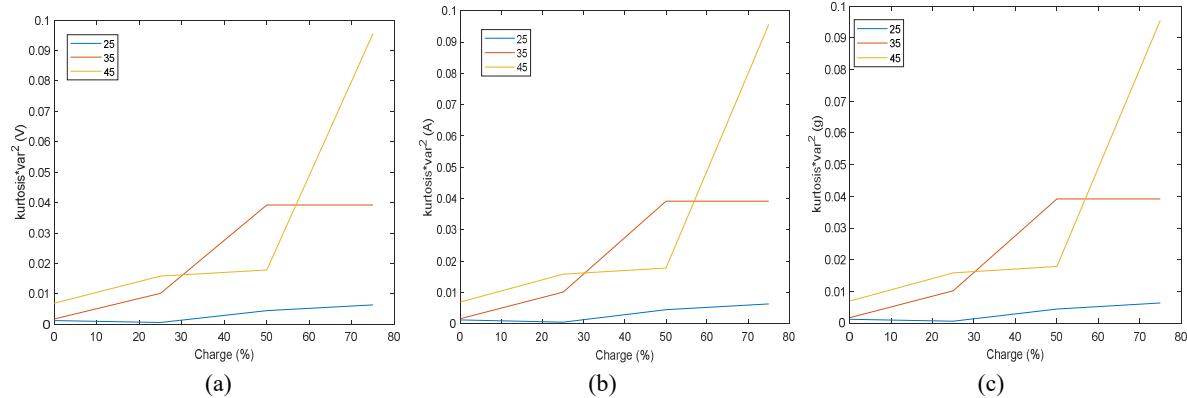


Figure 2.30. Valeurs de kurtosis*var² pour les mesures de la machine en état sain : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.31 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

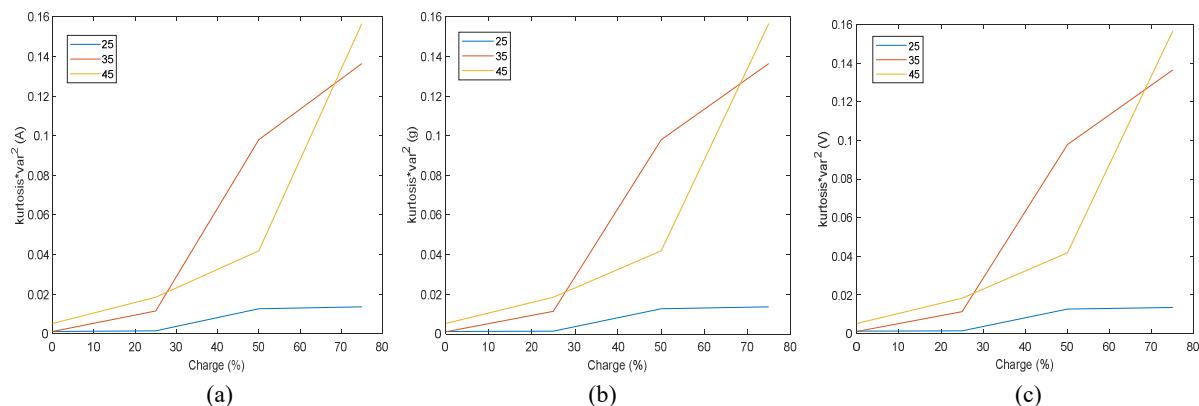


Figure 2.31. Valeurs de ‘kurtosis*var²’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

La figure 2.32 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements externe en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, La figure 2.33 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (une dent cassé), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

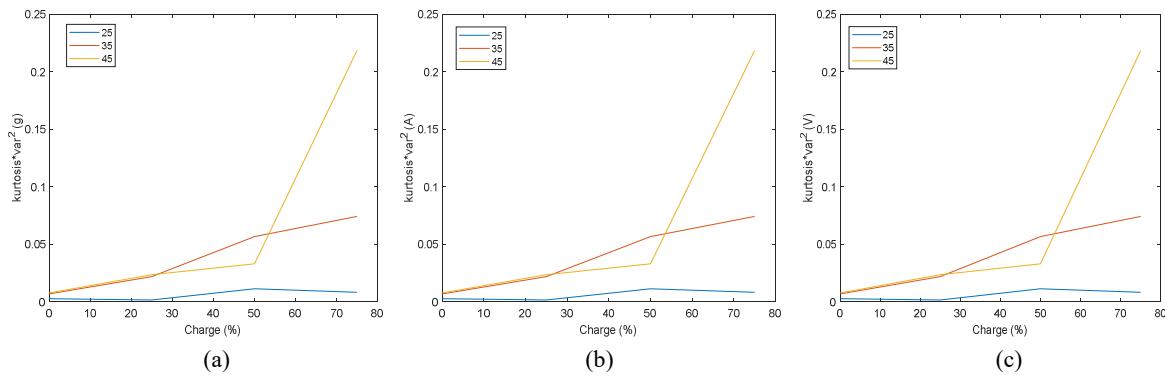


Figure 2.32. Valeurs de ‘kurtosis*var²’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe :(a)vibration, (b) courant et (c)tension

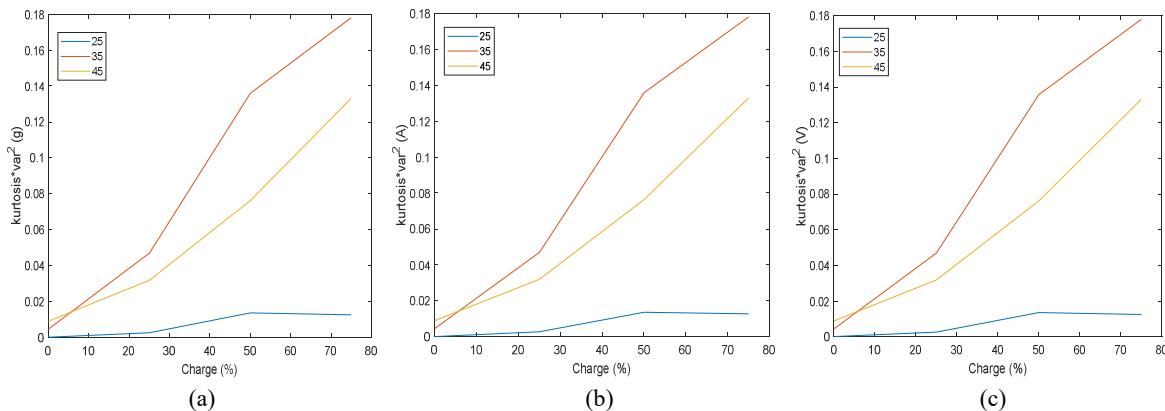


Figure 2.33. Valeurs de ‘kurtosis*var² ’ pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (dent cassé) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.34 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (défaut de surface-écaillage sur une dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

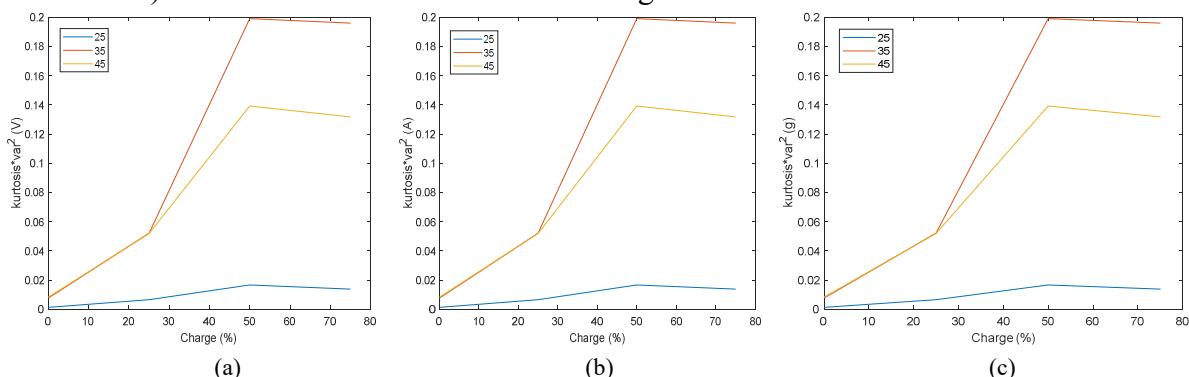


Figure 2.34.Valeurs de ‘kurtosis*var²’ pour les mesures de la machine en défaut (défaut de surface) :(a) vibration, (b) courant et (c) tension

figure2.35 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de bague interne de roulement et défaut d’une dent cassé d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

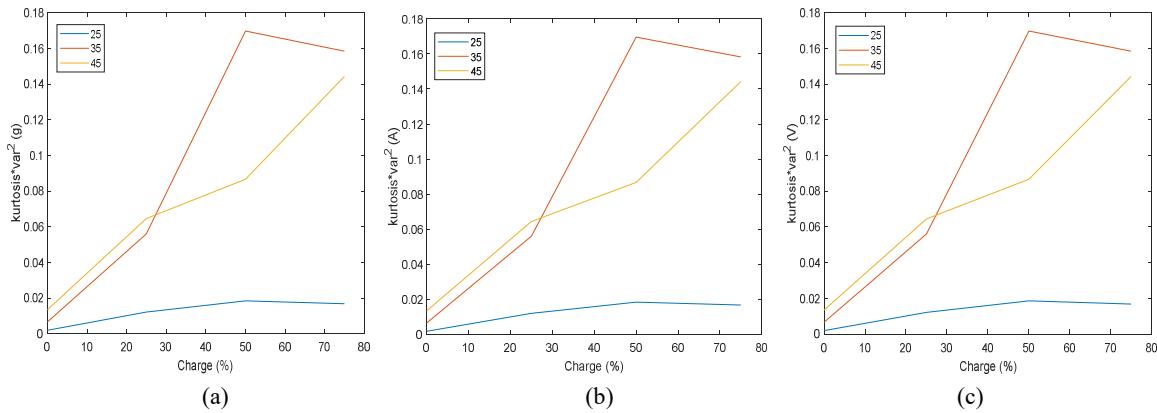


Figure 2.35. Valeurs de ‘kurtosis*var²’ pour les mesures de la machine Défaut mixte (bague interne et dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.36 représente les valeurs ‘kurtosis*var²’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de roulement externe et surface d'une dent usée) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

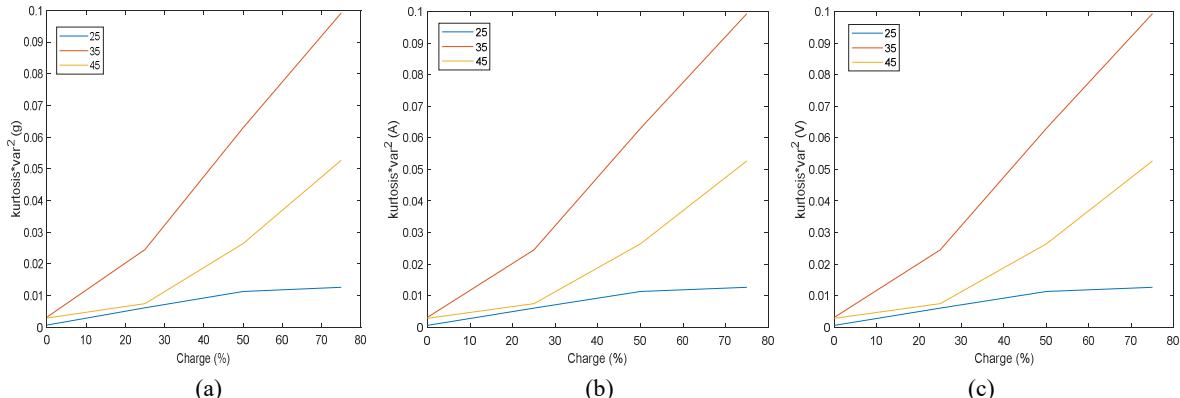


Figure 2.36. Valeurs de ‘kurtosis*var²’ pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d'engrenage (surface)) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

Le tableau 2.5 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type de défauts	Analyse Capteur vibration	Analyse Capteur courant	Analyse Capteur Tension
Machine saine	Augmentation modérée avec la charge.	Augmentation modérée avec la charge	Augmentation modérée avec la charge
Roulement bague interne	Augmentation plus rapide et valeurs plus élevées à haute charge qu'en état sain	Augmentation plus rapide et valeurs plus élevées à haute charge qu'en état sain	Augmentation plus rapide et valeurs plus élevées à haute charge qu'en état sain
Roulement bague externe	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain, similaire au	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain.

	défaut bague interne.		
Engrenage (dents casse)	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain, similaire aux défauts de roulement.	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain.	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain.
Engrenage (usure surface)	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain, similaire aux autres défauts simples.	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain.	Augmentation plus rapide et valeurs élevées à haute charge qu'en état sain.
Mixte (roulement bague interne et Engrenage dents casse)	Augmentation la plus rapide et valeurs les plus élevées observées, indiquant une forte sensibilité au défaut mixte.	Augmentation la plus rapide et valeurs les plus élevées observées.	Augmentation la plus rapide et valeurs les plus élevées observées.
Mixte (roulement bague externe et Engrenage usure surface)	Augmentation très rapide et valeurs très élevées, similaire à l'autre défaut mixte, indiquant une forte sensibilité au défaut mixte.	Augmentation très rapide et valeurs très élevées, similaire à l'autre défaut mixte.	Augmentation très rapide et valeurs très élevées, similaire à l'autre défaut mixte.

Tableau 2.0.5récapitulatif de l'indicateur- kurtosis*var^2' comparaison entre états sain et défauts

L'indicateur de santé il montre une forte sensibilité pour tout les défauts en plus juste les phases avancée charge et vitesse élève en particulier ceux de type impulsif pour l'analyse des vibrations, il réagit de généralement lorsque le défaut atteint un stade critique par contre l'indicateur de santé dans domaine temporel pour tension et courant n'est pas critère fiable pour la surveillance de l'état de fonctionnement de la machine lorsqu'on se basse sur les mesure courant et tension sont très similaires quel que soit le défaut.

3.6. Analyse les valeurs de la variance

La figure 2.37 représente les valeurs de la ‘variance’ des mesures; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine saine en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

Tandis que, La figure 2.38 représente les valeurs de la ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements interne en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

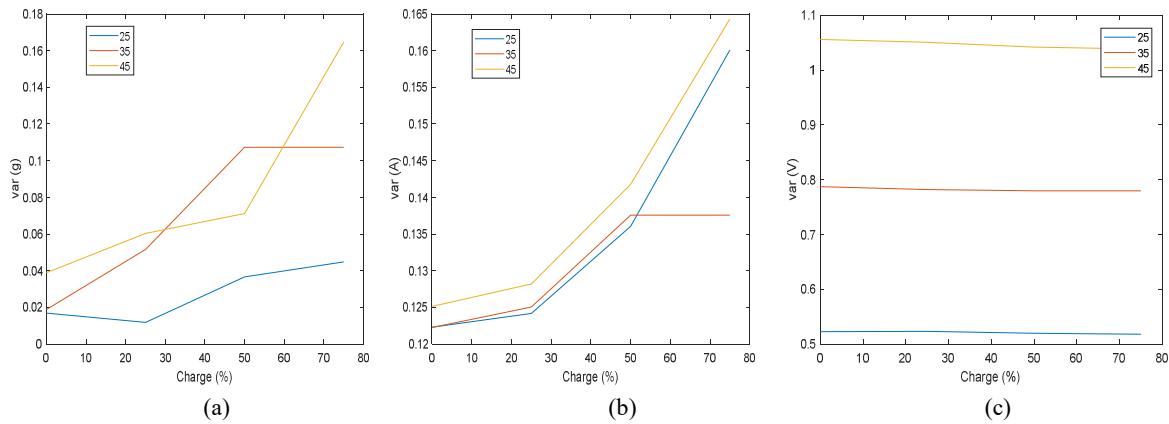


Figure 2.37. Valeur de la variance pour les mesures de la machine en état sain : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

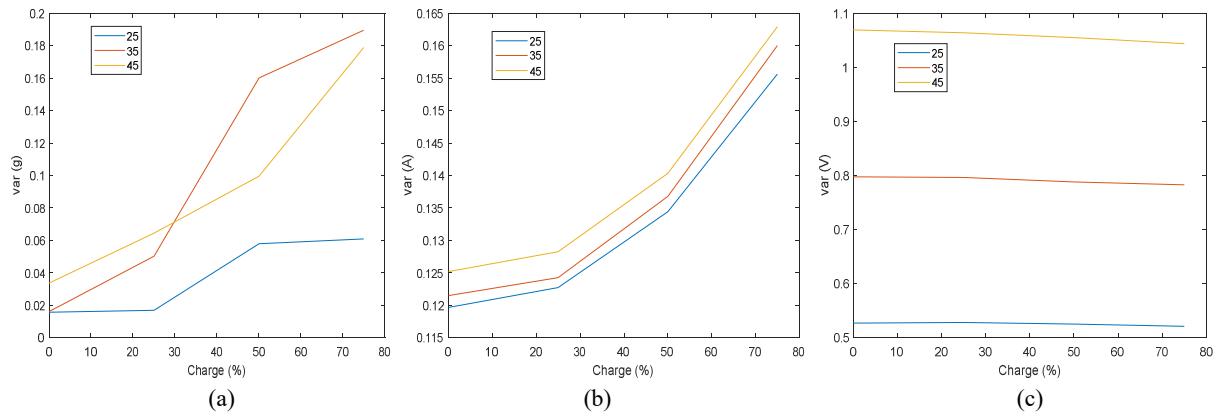


Figure 2.38. Valeurs de ‘variance’ pour les mesures de la machine en défaut de roulement interne : (a)vibration, (b) courant et (c)tentions

La figure 2.39 représente les valeurs ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut de roulements externe en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

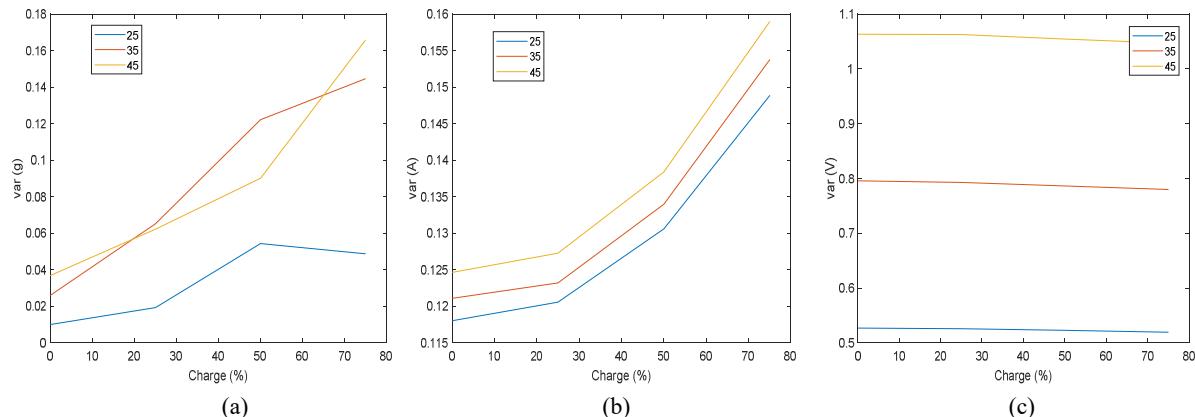


Figure 2.39. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut de roulement externe : (a)vibration, (b) courant et (c)tensions

La figure 2.40 représente les valeurs ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (une dent cassé), en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

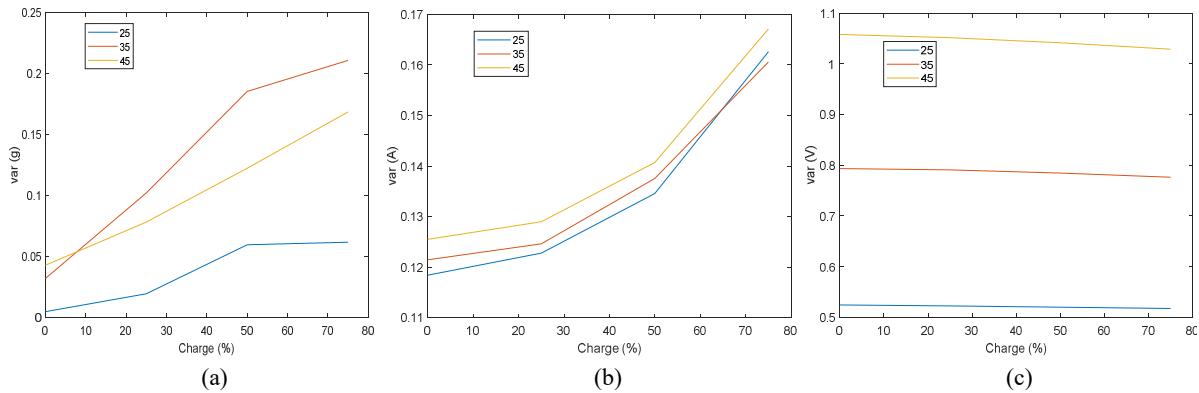


Figure 2.40. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.41 représente les valeurs ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut d’engrenage (défaut de surface-écaillage sur une dent) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

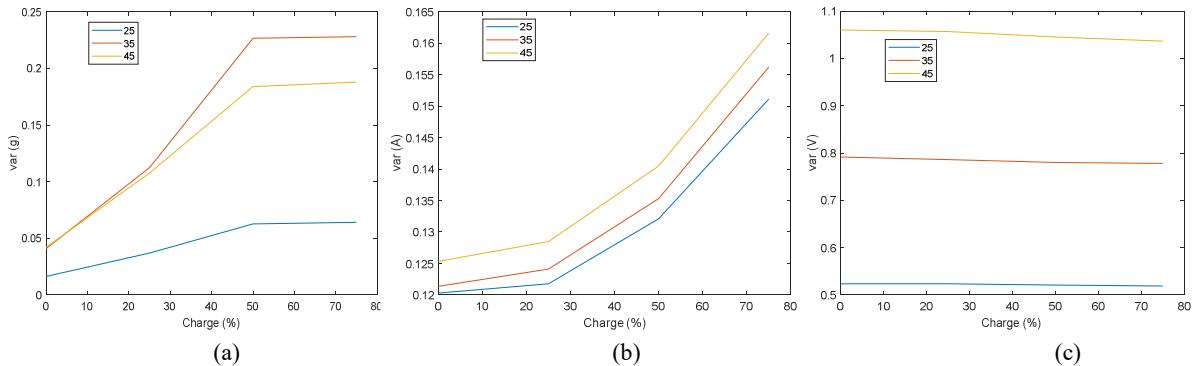


Figure 2.41. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut d’engrenage (défaut de surface): (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.42 représente les valeurs ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de bague interne de roulement et défaut d’une dent cassé d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

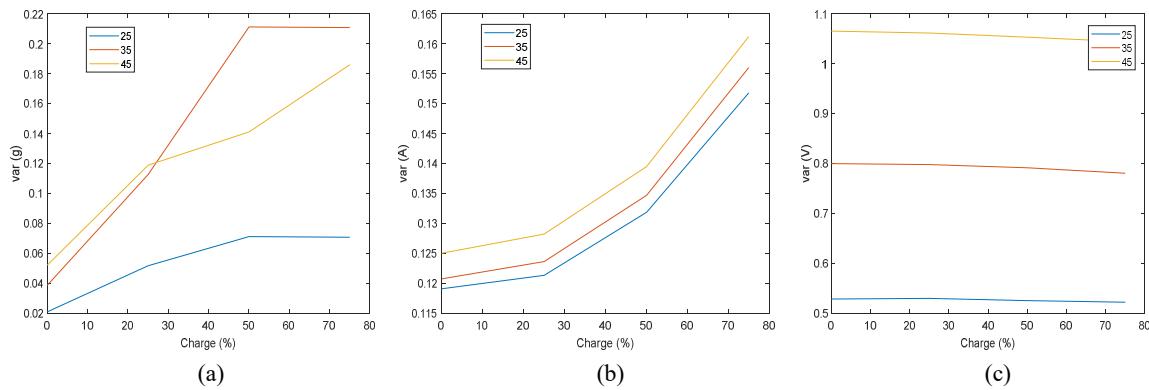


Figure 2.42. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine en défaut mixte (bague interne et dent cassé) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

La figure 2.43 représente les valeurs ‘variance’ des mesures ; vibration, courant et tension, effectuées sur la machine avec un défaut mixte (défaut de roulement externe et surface d’une dent usée d’engrenage) en fonction de la variation de la charge et de la vitesse de rotation.

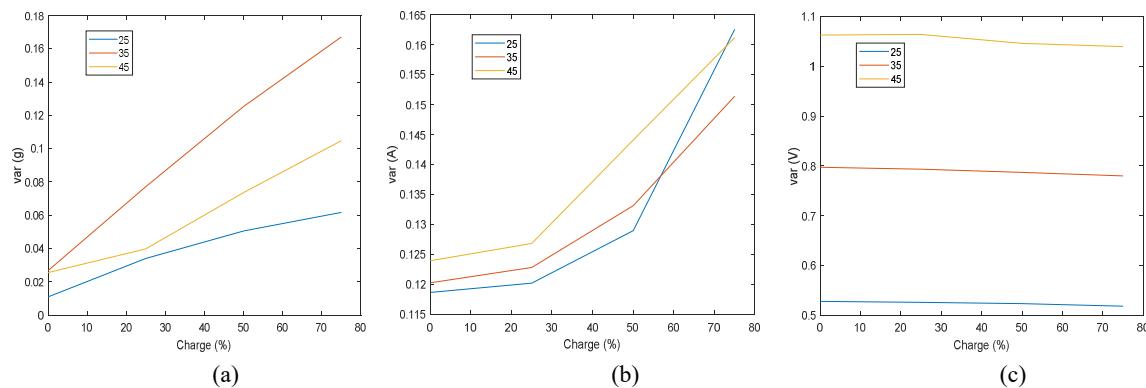


Figure 2.43. Valeurs de la variance pour les mesures de la machine avec défaut mixte (défaut de roulement externe et défaut d’engrenage (surface)) : (a) vibration, (b) courant et (c) tension

Le tableau 2.6 récapitule les interprétations détaillées sur chaque cas :

Type de défauts	Analyse Capteur vibration	Analyse Capteur courant	Analyse Capteur Tension
Machine saine	Les valeurs de la variance augmentent, mais sont généralement plus faibles que pour les machines avec défauts.	Les valeurs de la variance augmentent, mais sont généralement plus faibles que pour les machines avec défauts..	Valeurs stables.
Roulement bague interne	Variance généralement plus élevée que pour la machine saine, surtout à 45 tr/min et à charge élevée.	Peut de variation et les courbes sont irrégulières et instables.	Similaire à la machine saine, mais potentiellement une légère augmentation.

Roulement bague externe	Variance généralement plus élevée que pour la machine saine, surtout à 45 tr/min et à charge élevée.	Valeurs de très élevées est sont irrégulières et instables.	Similaire à la machine saine, mais potentiellement une légère augmentation à 45 tr/min.
Engrenage (dents casse)	Variance du même ordre de grandeur que le défaut de roulement interne, montre la présence de défaut.	Les valeurs de la variance sont légèrement augmentées.	Similaire à la machine saine.
Engrenage (usure surface)	Variance similaire au défaut de dent cassée à 25 tr/min, mais potentiellement plus élevée à 45 tr/min pour les charges importantes, montre la présence de défaut.	Similaire aux autres états. Variance comparable aux autres défauts simples.	Similaire aux autres états.
Mixte (roulement bague interne et Engrenage dents casse)	Les valeurs de la Variance la plus élevée observée, surtout à 45 tr/min.	Similaire aux autres états. Les valeurs de la Variance comparable aux autres défauts simples.	Légèrement plus élevée qu'en état sain et pour certains défauts simples.
Mixte (roulement bague externe et Engrenage usure surface)	Les valeurs de la Variance sont élevée, montre la présence de défaut.	Similaire aux autres états. Les valeurs de la Variance comparable aux autres défauts simples.	Similaire aux autres états.

Tableau 2.0.6récapitulatif de l'indicateur variance-comparaison entre états sain et défaut

La variance des vibrations est indicateur utile mais tardif, juste utile pour confirme une dégradation avancée, par contre l'indicateur de la variance pour tension et courant n'est pas critère fiable pour la surveillance de l'état de fonctionnement de la machine lorsqu'on se basse sur les mesure courant et tension.

Dans notre étude de la détection des défauts mécaniques l'analyse des vibrations et du courant et tension, l'indicateur de santé ($kurtosis * var^2$) s'impose comme l'indicateur le plus fiable, pour les raison suivant :

- Sensibilité Combinée : Il combine l'impulsivité (capturée par le Kurtosis) et l'énergie/amplitude du signal (représentée par la Variance).
- Réactivité à la Sévérité : Cet indicateur a montré une très forte augmentation avec la charge et la vitesse pour les tous les défauts
- Détection Robuste : n'est pas infecté par le bruit de fond que le Kurtosis.

4. Influence de la charge sur les indicateurs

La charge appliquée au système électromécanique a un impact significatif sur les indicateurs statistiques extraits des signaux (vibration, courant, tension). En effet, une augmentation de la charge entraîne généralement une élévation de l'énergie transmise à travers le système, ce qui influence directement les grandeurs mesurées.

Certains indicateurs comme le RMS (Root Mean Square) et la variance augmentent avec la charge, reflétant une intensification de l'activité vibratoire ou électrique. D'autres indicateurs, plus sensibles aux anomalies localisées comme le facteur de crête et kurtosis*variance^2 ou la kurtosis, peuvent également varier selon la charge, mais leur comportement peut être plus complexe : leur variation peut soit amplifier la détection des défauts (en accentuant les pics anormaux), soit les masquer si le bruit augmente proportionnellement.

5. Influence de la vitesse sur les indicateurs

La vitesse de rotation du système influence fortement les indicateurs statistiques extraits des signaux de vibration, de courant et de tension. En effet, l'augmentation de la vitesse entraîne une élévation de la fréquence et de l'amplitude des signaux mesurés, ce qui se traduit par une variation notable de plusieurs indicateurs.

Des indicateurs comme le RMS et la moyenne augmentent généralement avec la vitesse, en raison de l'intensification des phénomènes dynamiques (forces centrifuges, chocs, déséquilibres, etc.). D'autres indicateurs plus sensibles aux irrégularités du signal, comme la kurtosis ou le facteur de crête, peuvent également être affectés : une vitesse élevée peut amplifier certains défauts (ex. : impact d'un défaut de dent) ou générer du bruit qui masque les signaux caractéristiques.

6. Limites de l'analyse statistique

Malgré leur simplicité et leur rapidité de mise en œuvre, les indicateurs statistiques présentent plusieurs limites dans le cadre d'un diagnostic complet :

- Manque de localisation : ces indicateurs signalent la présence d'un défaut mais ne permettent pas d'identifier précisément sa position (roulement gauche ou droit, pignon ou roue...).
- Sensibilité au bruit : certains indicateurs comme le kurtosis ou le facteur de crête peuvent être influencés par du bruit parasite ou des impulsions non liées à un défaut réel.
- Dépendance aux conditions de fonctionnement : les valeurs des indicateurs peuvent varier selon la vitesse de rotation, la charge appliquée, ou d'autres paramètres du système, ce qui peut fausser l'interprétation.
- Manque de sélectivité : des indicateurs comme la moyenne ou la variance peuvent réagir à des changements qui ne sont pas liés à un défaut, mais à une variation normale du signal.
- Pas de distinction entre types de défauts : deux défauts différents peuvent produire des valeurs similaires pour un même indicateur, ce qui rend la classification difficile sans méthode complémentaire.

7. Conclusion

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous avons développé une approche de surveillance de l'état de fonctionnement d'une boîte d'engrenage à partir d'indicateurs statistiques appliqués à des mesures mécaniques (vibrations) et électriques (courant et tension). L'objectif principal était de détecter précocement la présence de défauts localisés, notamment sur les roulements (bague intérieure, extérieure) et les engrenages, en s'appuyant sur une analyse temporelle des signaux.

Pour cela, plusieurs indicateurs ont été étudiés, tels que la moyenne, la variance, la valeur efficace (RMS), le kurtosis et le facteur de crête. Ces indicateurs ont permis de quantifier les variations de comportement des signaux en présence ou non de défauts, et d'identifier les signatures caractéristiques associées à différentes configurations de défaillance. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de ces outils, tout en mettant en évidence que leur sensibilité varie selon le type et la gravité du défaut.

Cette étude démontre l'intérêt d'une approche basée sur des indicateurs statistiques pour le diagnostic des machines tournantes. Elle ouvre également la voie à des développements futurs, pour troisième chapitre présenter une étude détaillée notamment l'analyse vibratoire et l'analyse des signatures du couple et vitesse du moteur asynchrone triphasé par l'intégration de techniques d'analyse fréquentielle pour une surveillance encore plus fine et prédictive.

Chapitre 3 : Diagnostic de défauts multi modes de la boîte à engrenages dans des conditions de travail variables

1. Introduction

Dans les systèmes mécaniques complexes, tels que les boîtes d'engrenage, le diagnostic de défauts devient particulièrement complexe lorsque les conditions de fonctionnement sont variables. En effet, la variabilité de la vitesse ou du couple influence fortement le comportement dynamique des signaux mesurés, rendant la détection et l'identification des défauts plus complexes. L'étude du comportement de la boîte d'engrenage en présence de défauts mécaniques, d'engrenage et de roulement, dans deux régimes de fonctionnement distincts vitesse variable et couple variable, est l'objectif de ce chapitre. Pour cela, des données d'un banc d'essai de l'université de Tsinghua en Chine [30] sont présentées et utilisées.

2. Données de mesures utilisées

2.1. Description du banc d'essai

Le dispositif expérimental de l'ensemble de données est illustré à la figure 3.1. Il comprend un moteur asynchrone triphasé de 2,2 kW, un capteur de couple, un réducteur parallèle à deux étages, un frein à poudre magnétique faisant office de générateur de couple résistant, et un système de mesure et de contrôle. L'ensemble des données de mesure vise à simuler et à documenter diverses conditions de défaut de l'engrenage à 36 dents de l'arbre intermédiaire et de ses paliers de support adjacents, dans différents modes de fonctionnement. Le frein à poudre magnétique permet d'appliquer un couple au réducteur. Le couple réel supporté par l'arbre d'entrée du réducteur peut être mesuré par un capteur de couple (modèle S2001). Le capteur de vitesse permet de mesurer le signal de vitesse référence de l'arbre de sortie du moteur. Le banc d'essai, illustré à la figure 3.1, est équipé de deux capteurs d'accélération vibratoire triaxiaux (modèle TES001V, sensibilité : 100 mv/g) utilisés pour mesurer les vibrations triaxiales de l'arbre intermédiaire du moteur et de la boîte de vitesses selon les axes x, y et z, à une fréquence d'échantillonnage de 12,8 kHz [30].

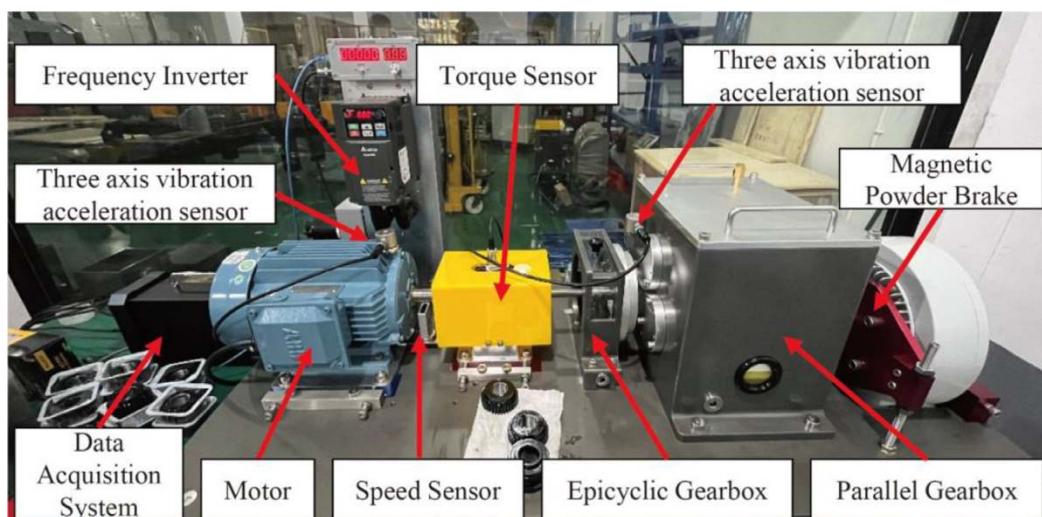


Figure 3.1. Banc d'essai de l'université de Tsinghua, Chine [30]

2.2. Description des données de mesures

L'ensemble de données sont collectés en fonction de différents types de défauts, degrés de défaut et conditions de fonctionnement, et contiennent un total de 240 séries chronologiques. Chaque ensemble de données contient 8 colonnes de données. Ces ensembles de données ont été collectés sur la base d'une boîte de vitesse parallèle à deux étages. En état de fonctionnement normal et en état de défaillance. Le schéma de la structure interne du réducteur est présenté à la figure 2.

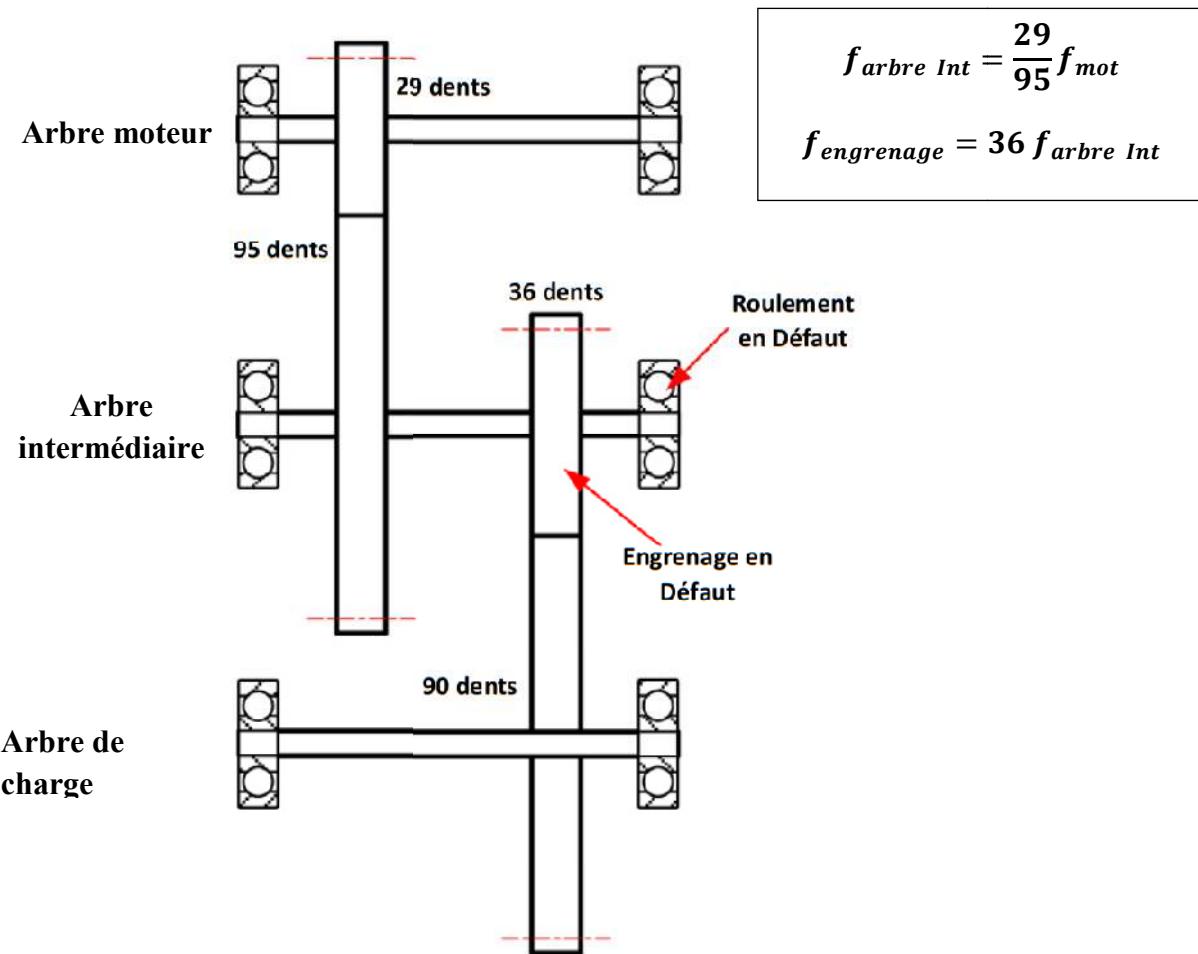


Figure 3.2 La structure interne de la boîte à engrenages

L'ensemble des mesures permet d'étudier les caractéristiques temporelles et fréquentielles des signaux de défaut de boîte de vitesses dans des conditions de travail variables. De plus, le module d'engrenage est de 1,5 et la largeur de l'engrenage est de 10 mm. L'engrenage à 36 dents sur l'arbre intermédiaire est un engrenage défectueux, et le palier de support modèle ER16K à l'extrémité de l'arbre intermédiaire, près du pignon à 36 dents, présente un roulement défectueux. Les paramètres spécifiques de Les roulements ER16K utilisés sont indiqués dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Les paramètres spécifiques du roulement ER16K utilisé.

Diamètre intérieur	1 pouce
Diamètre extérieur	2.0472 pouces
Largeur	0.749 pouces
Diamètre des balles	0.3125 pouces
Nombre des balles	9
Diamètre intermédiaire	1.516 pouces

Chaque ensemble de données a été mesuré avec une fréquence d'échantillonnage de 12,8 kHz. Les données ont été collectées à des vitesses ou des charges variables dans le temps pendant une durée fixe de 60 s, avec l'ensemble courbe vitesse-temps et courbe charge-temps représentées respectivement sur les figures 3.2(a) et (b). Prenons l'exemple de la situation 0-2500-3000 tr/min, marquée en bleu sur la figure 3.2(a), pour laquelle la vitesse est réglée à 3000 tr/min de 10 à 20 s et de 40 à 50 s. Entre 25 et 35 s, la vitesse de rotation est alors fixée à 2 500 tr/min.

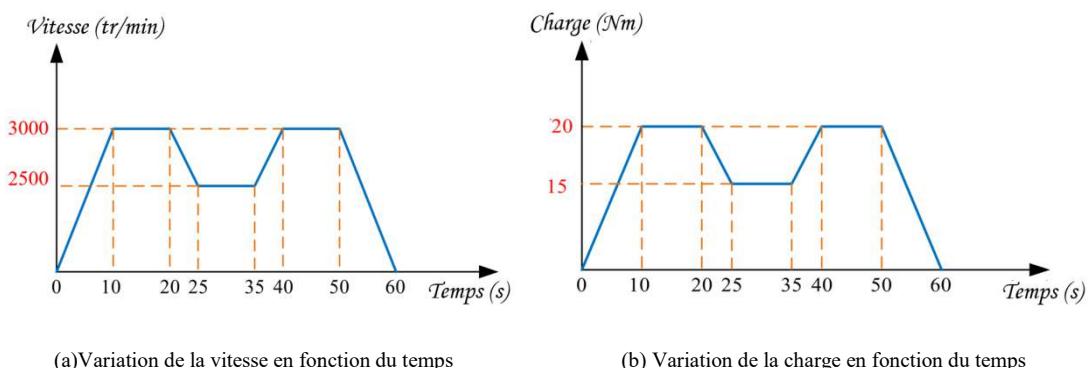


Figure 3.3 Evolution de la vitesse et de la charge

De même, lors d'expériences à vitesse variable, la charge est fixée à deux valeurs constantes : 10 Nm et 20 Nm. Les défauts détectés lors de l'expérience incluent à la fois des défauts d'engrenages simples et des défauts d'engrenages et de roulements coïncidents. Tous les défauts ont été obtenus par gravure laser avec une précision d'usinage de 0,01 mm. Les détails correspondant aux paramètres de défaut des roulements et des engrenages sont rapportés dans les tableaux 3.2 et 3.3, respectivement. Dans chaque scénario, en plus de l'état de santé et du défaut (dents manquantes), trois degrés de gravité de défaut différents sont considérés pour les quatre défauts simples restants (usure, piqûres d'engrenages, fissures de dents et rupture de dents) et deux défauts composés (rupture de dents et bague interne du roulement et bague externe du roulement).

Par exemple lors d'essaie d'une dent manquante avec charge variable et une vitesse constante de 2000 tr/min, il est à noter que la fréquence de rotation de l'arbre intermédiaire est de 14,84Hz, tandis que la fréquence d'engrènement du petit engrenage de l'arbre intermédiaire

est observé à 540,63 Hz, accompagné de ses fréquences de bande latérale à 525,78 Hz et 555,47 Hz. Ces observations concordent avec les caractéristiques typiques associées avec des défauts de dent manquante.

Tableau 3.2 Les détails des paramètres de défaut de roulement.

Paramètre de défaut du roulement	Sévérité du défaut		
	Bas	Moyen	Haut
Largeur de la faille de la piste intérieure	0,1mm	0,3mm	0,5 mm
Largeur de la faille de la piste extérieure	0,1mm	0,3mm	0,5 mm

Tableau 3.3 Les détails des paramètres de défaut de l'engrenage

Paramètre de défaut de l'engrenage	Sévérité du défaut		
	Bas	Moyen	Haut
Profondeur des fissures dentaires	1/4 de la hauteur des dents	1/2 de la hauteur des dents	3/4 de la hauteur des dents
Usure des engrenages	1/3 de la surface des dents	1/2 de la surface des dents	Surface totale des dents
Dents cassées	1/4 de la largeur des dents	1/2 de la largeur des dents	3/4 de la largeur des dents
Piqûres d'engrenages	Diamètre du défaut	Diamètre du défaut 1,0 mm	Diamètre de défaut 1,5 mm

3. Analyse des signaux de mesures

Les signaux de mesures que nous avons traités et présentons dans ce chapitre sont les signaux de mesures lors d'absence de défaut, lors d'un défaut d'une dent cassée et enfin lors de défauts composés à savoir le défaut d'une dent cassée et défaut de bague interne de roulement survenus sur l'arbre intermédiaire. Ces mesures sont analysées lors de vitesse variable, ensuite lors charge variable.

3.1. Analyse des signaux mesurés à vitesse variable

Les signaux traités dans cette sous-section sont les signaux mesurés avec une charge constante de 20 Nm et la vitesse est variable entre 2500 et 3000 tr/min, selon le profil de la figure 3.1(a).

3.1.1. Cas d'absence de défaut

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors d'absence de défauts. La figure 3.4 montrent les trois signaux.

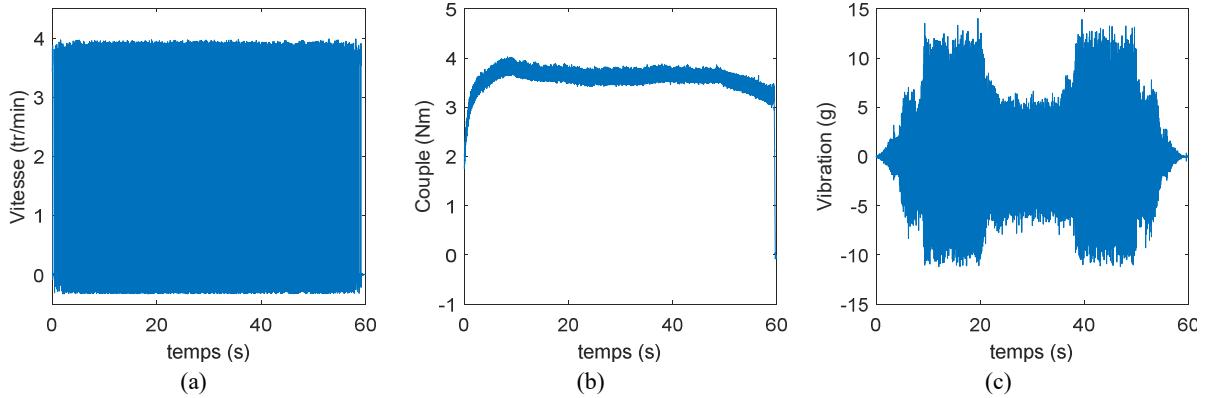


Figure 3.4. Allure des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : La figure 3.4(a) montre le signal de référence de vitesse mesuré sur l'arbre de l'entrée de la boîte à vitesse, c'est-à-dire l'arbre du moteur. La figure 3.4(b) montre l'allure du couple mécanique mesuré sur le même arbre que la vitesse. Il est évident que ces deux signaux varient en fonction de la vitesse de l'arbre du moteur c'est-à-dire entre 2500 et 3000 tr/min. De même l'amplitude de la vibration sur la figure 3.4(c), mesurée sur le palier de l'arbre intermédiaire de la boîte à vitesse, varie en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, puisque la puissance est transmise à cet arbre intermédiaire. Le rapport de transmission étant 29/95, ce dernier devrait tourner entre 763.15 et 890.40 tr/min. Compte tenu de la charge appliquée, la fréquence d'engrènement mesuré sur l'arbre du pignon devrait varier entre 447.7 et 540,63 Hz.

Les trois signaux de la figure 3.4 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.5 montre les résultats obtenus.

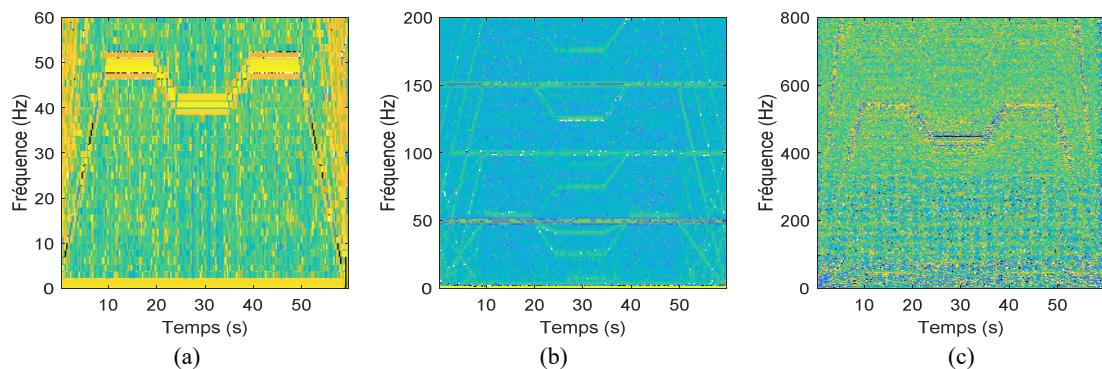


Figure 3.5. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : Comme prévu la figure 3.5(a) montre variation de la fréquence de rotation de 0 à 50 Hz, descend à 40 Hz, ensuite remonte à 50 Hz pour enfin descendre à 0 Hz. La figure 3.4(b) montre que le couple suit le changement apparu sur l'allure de la vitesse de l'arbre du moteur c'est-à-dire entre 0, 40 et 50Hz. La figure 3.5(c) montre la fréquence

instantanée d'engrènement du signal vibratoire mesuré sur l'arbre intermédiaire en plus des bandes latérales autour de cette fréquence. Il est évident qu'elle varie en fonction la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, puisque la puissance est transmise à cet arbre intermédiaire. Notamment dans la plage attendue de la fréquence d'engrènement 447,7 et 540,63 Hz.

3.1.2. Cas d'un défaut de cassure d'une dent d'engrenage

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors d'apparition d'un défaut de cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire (voir figure 3.1). La figure 3.6 montrent les trois signaux.

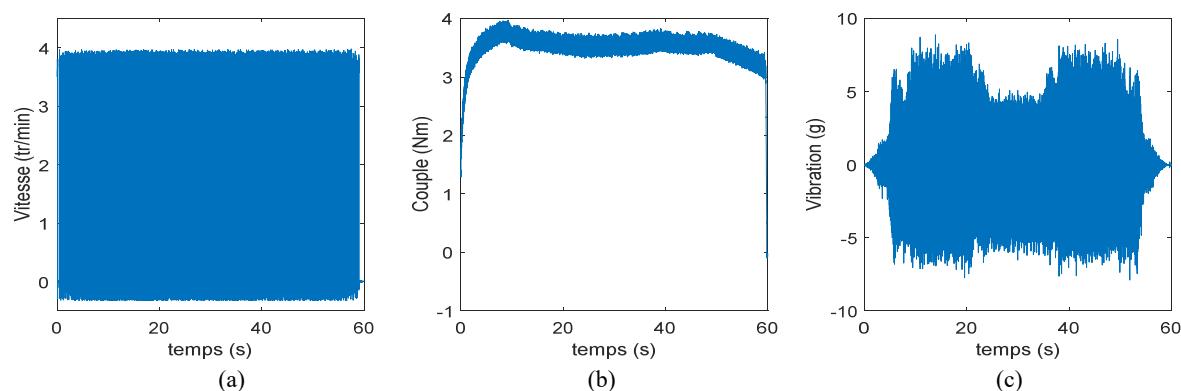


Figure 3.6. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut de cassure d'une dent du pignon: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : Sur la figure 3.6(a), le signal de vitesse est similaire à l'état sain la cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire ne semble pas avoir un impact sur ces deux signaux. La figure 3.6(b) présente une allure presque similaire à l'état sain peut de variation, donc le défaut se traduit par une perturbation modérée du signal de couple, généralement visible sous forme de petites irrégularités. La figure 3.6(c) montre que le défaut de cassure d'une dent du pignon n'entraîne pas une augmentation de l'amplitude des vibrations par rapport à l'état sain, s'explique par une perte d'engagement mécanique aux niveaux de la boîte à engrenage.

Les trois signaux de la figure 3.6 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.7 montre les résultats obtenus.

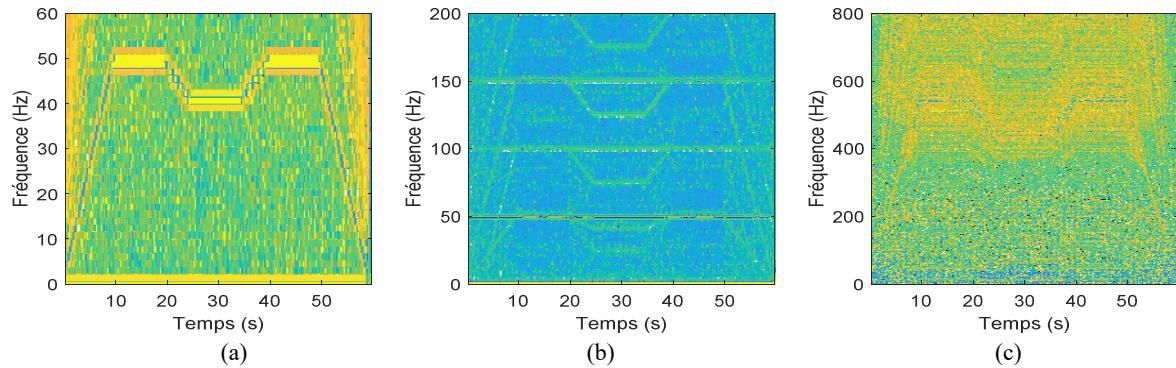


Figure 3.7. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défaut de cassure d'une dent d'engrenage : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : Les figures 3.7(a) et 3.7(b) montrent les signaux de vitesse et du couple qui sont similaires l'état sain. Tandis que, la figure 3.7(b) montre plus de bandes latérales de la fréquence instantanée d'engrènement du signal vibratoire mesure sur l'arbre en défaut. Cela, montre que le défaut est caractérisé par l'augmentation des fréquences modulées autour de la fréquence d'engrènement.

3.1.3. Cas composé de défauts de bague interne de roulement et cassure d'une dent d'engrenage

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors de présence de défauts composés de bague interne de roulement et de cassure d'une dent d'engrenage. La figure 3.8 montrent les trois signaux.

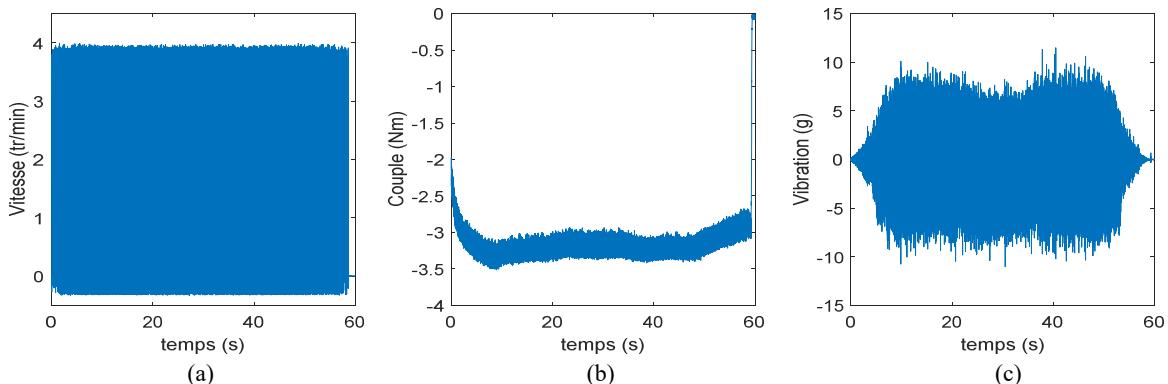


Figure 3.8. Allure des signaux de mesures sur la machine avec défaut composé: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : L'analyse de la figure 3.8(a) montre que la cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire a un impact limité sur les signaux mesurés. En effet, le signal de vitesse (a) reste quasi identique à celui de l'état sain, n'indiquant aucun effet notable sur la rotation. De même, le signal de couple, figure 3.8 (b), ne présente que de légères perturbations sous forme de petites irrégularités. Enfin, le signal vibratoire, figure 3.8(c) ne montre aucune augmentation d'amplitude.

Les trois signaux de la figure 3.8 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.9 montre les résultats obtenus.

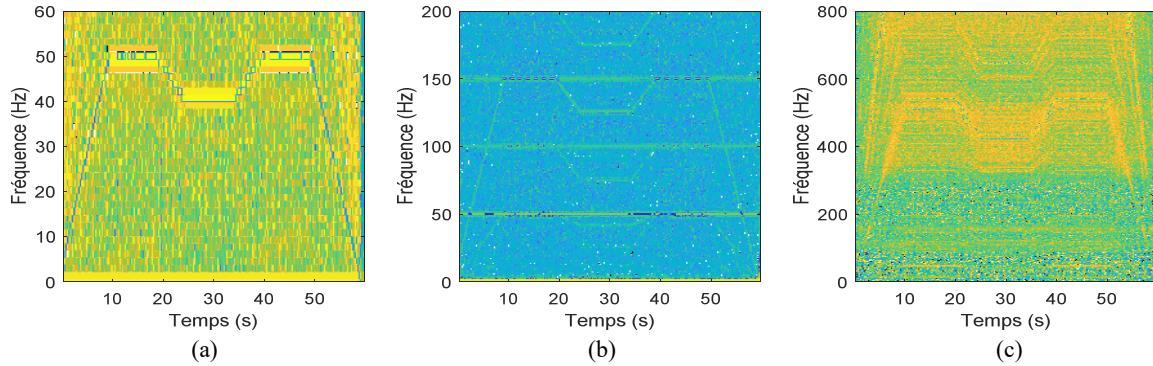


Figure 3.9. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine avec défaut composé: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : Les signaux de vitesse et de couple, présentés aux figures 3.7(a) et 3.7(b), ne montrent pas d'altération significative par rapport à l'état de fonctionnement sain. En revanche, l'analyse du signal vibratoire mesuré sur l'arbre en défaut met en évidence une multiplication des bandes latérales modulant la fréquence instantanée d'engrènement (Figure 3.7(c)). Le défaut d'engrenage se caractérise ainsi par cette augmentation des fréquences de modulation. Quant au défaut de roulement, il n'est pas facile de le dépister. C'est pourquoi nous allons investiguer une technique avancée pour le détecter un peu loin dans ce chapitre.

3.2. Analyse des signaux mesurés à couple variable

Les signaux traités dans cette sous-section sont les signaux mesurés avec une vitesse constante de 3000 tr/min et le couple est variable entre 10 et 20 Nm, selon le profil de la figure 3.1(a).

3.2.1. Cas d'absence de défaut

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors d'absence de défauts. La figure 3.10 montrent les trois signaux.

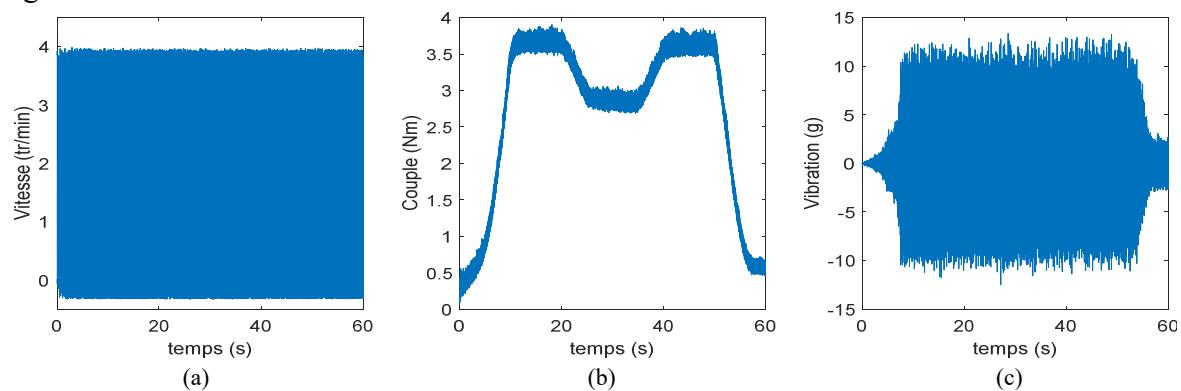


Figure 3.10. Allure des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : La figure 3.10(a) montre le signal de référence de vitesse constant mesuré sur l'arbre de l'entrée de la boîte à vitesse, c'est-à-dire l'arbre du moteur. La figure 3.10(b) montre l'allure du couple mécanique mesuré sur le même arbre que la vitesse. Il est évident que ces deux signaux varient en fonction du couple résistant appliqué par le frein mécanique placé sur l'arbre de sortie, c'est-à-dire entre 10 et 20Nm. De même l'amplitude de la vibration, mesurée sur le palier de l'arbre intermédiaire de la boîte à vitesse, varie en fonction de couple entraînée par l'arbre du moteur, puisque la puissance est transmise à cet arbre. Le rapport de transmission étant 29/95, Compte tenu de la charge appliquée, la fréquence d'engrènement mesuré sur l'arbre du pignon devrait être 540,63 Hz.

Les trois signaux de la figure 3.10 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.11 montre les résultats obtenus.

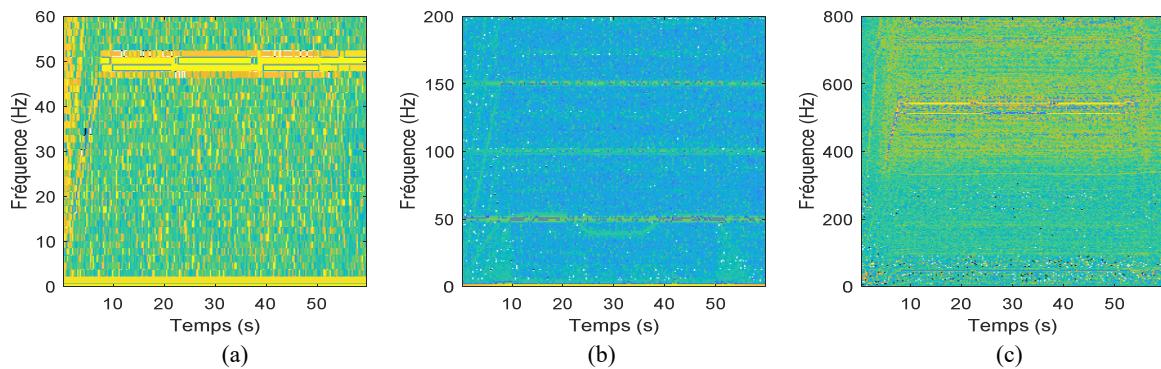


Figure 3.11. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en absence de défauts : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : Les figures 3.11(a) et 3.11(b) montrent les signaux de référence de vitesse et de couple mesurés sur l'arbre de l'entrée de la boîte à vitesse, c'est-à-dire l'arbre du moteur indiquant la fréquence instantanée de la rotation comme avec une légère variation. La figure 3.11(c) montre la représentation T-F de la vibration. La fréquence instantanée d'engrènement est bien visible puisqu'elle varie de 0 jusqu'à 540 Hz environ ensuite descend avec la variation du couple entre 10 et 20s, lorsque le couple résistant augmente à 20 Nm, ensuite cette fréquence augmente avec la réduction du couple à 10 Nm de 25 à 35 s. Et enfin, cette fréquence augmente à partir de 40s puisque le couple résistant diminue à 10 Nm. Nous constatons moins de bandes latérales autour de cette fréquence.

3.2.2. Cas d'un défaut de cassure d'une dent

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors d'apparition d'un défaut de cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire (voir figure 3.1). La figure 3.12 montrent les trois signaux.

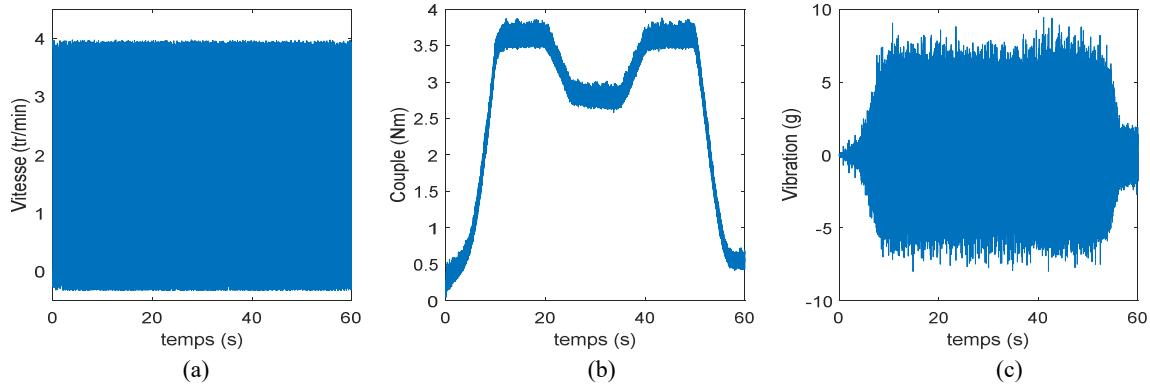


Figure 3.12. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut de cassure d'une dent du pignon: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : La figure 3.12(a) montre le signal de vitesse de rotation est similaire à l'état sain. La cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire ne semble pas avoir un impact sur la vitesse de rotation. De même pour l'allure du couple mesuré (figure 3.12(b)). Ces deux signaux ne présentent que de légères perturbations sous forme de petites irrégularités. Enfin, le signal vibratoire, figure 3.12(c) ne montre aucune augmentation d'amplitude.

Les trois signaux de la figure 3.12 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.13 montre les résultats obtenus.

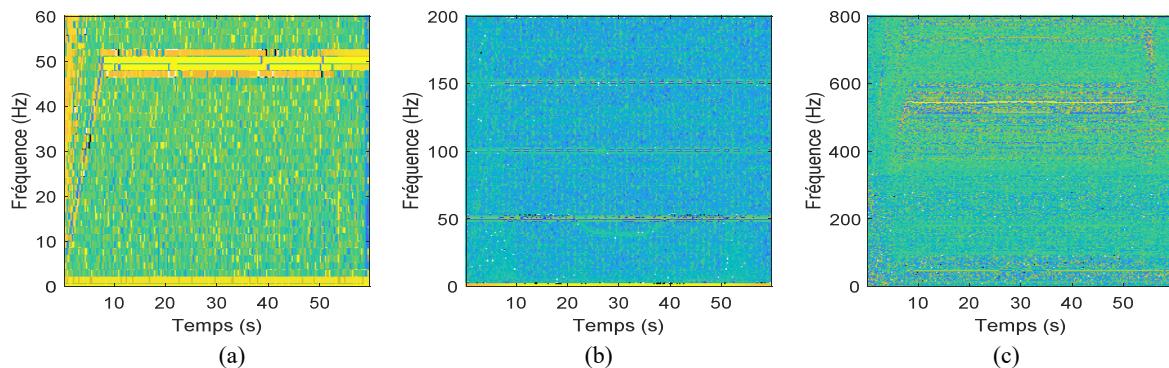


Figure 3.13. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défauts de cassure: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : La figure 3.13(a) montre le signal de vitesse de rotation est similaire à l'état sain. La cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire ne semble pas avoir un impact sur la vitesse de rotation. De même pour l'allure du couple mesuré (figure 3.13(b)). La figure 3.13(c) montre une variation similaire de la fréquence instantanée d'engrènement avec la présence de plus de bandes latérales causées par le défaut de cassure de la dent.

3.2.3. Cas composé de défauts de bague interne de roulement et cassure d'une dent d'engrenage

Les mesures des signaux de vitesse de rotation, du couple et de vibration sont effectuées sur le banc d'essai lors présence de défauts combinés. La figure 3.14 montrent les trois signaux.

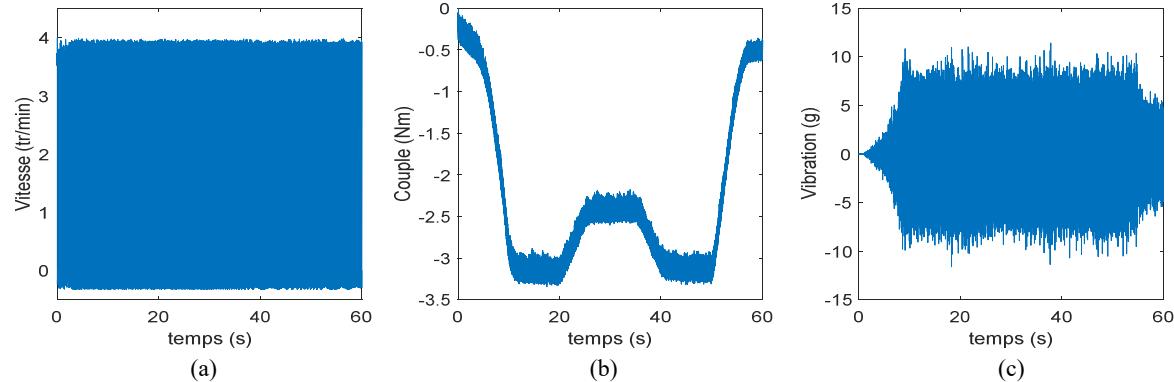


Figure 3.14. Allure des signaux de mesures sur la machine pour défaut composé : (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : La figure 3.14(a) montre le signal de vitesse de rotation est similaire à l'état sain. La cassure d'une dent du pignon sur l'arbre intermédiaire ne semble pas avoir un impact sur la vitesse de rotation. De même pour l'allure du couple mesuré (figure 3.14(b)). Ces deux signaux ne présentent que de légères perturbations sous forme de petites irrégularités. Enfin, le signal vibratoire, figure 3.14(c) ne montre aucune augmentation d'amplitude.

Les trois signaux de la figure 3.14 sont analysés dans le domaine temps/fréquence afin de suivre la variation des fréquences concernées pour chaque défaut. La figure 3.16 montre les résultats obtenus.

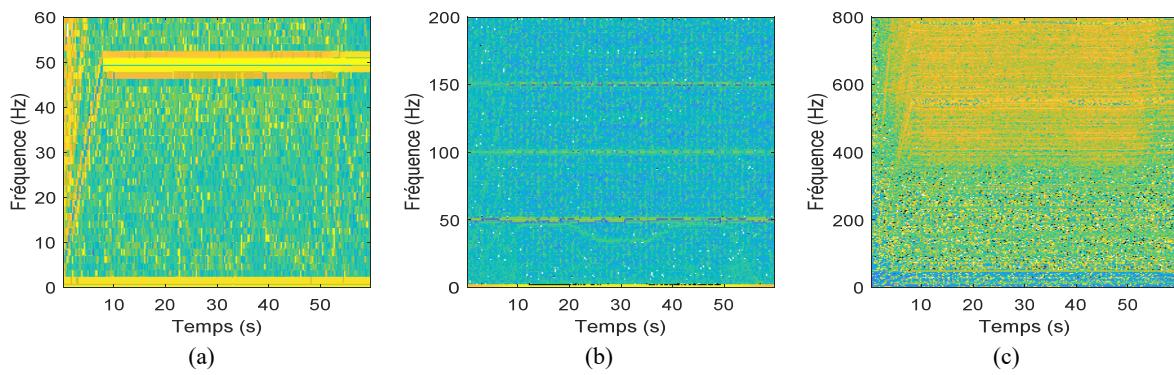


Figure 3.15. Analyse temps-fréquence des signaux de mesures sur la machine en présence de défaut composé: (a) Vitesse de rotation, (b) Couple et (c) Vibration

Interprétation : De façon similaire, il n'y a pas de changement significatif sur les représentations T-F de la vitesse et du couple par rapport au cas sain, comme montré sur les figures 3.15(a) et 3.15(b). Tandis que, la représentation T-F de la vibration montre, dans ce cas, une augmentation des bandes latérales autour de la fréquence instantanée d'engrènement.

Cela est synonyme du défaut de la cassure d'une dent. Quant au défaut de roulement, il n'est pas facile de le dépister. C'est pourquoi nous allons investiguer une technique avancée pour le détecter juste après.

4. Méthode proposée pour la détection des défauts dans les signaux de vibrations

Dans le but de détecter et de localiser les défauts mécaniques, une approche basée sur le traitement du signal a été adoptée, le kurtogramme ou le kurtosis spectrale permet d'extraire les composantes impulsionales liées aux défaillances et d'identifier leurs signatures fréquentielles caractéristiques. Le kurtogramme permet d'isoler les plages de fréquences (bandes de résonance) qui caractérisent la présence de défaut impulsional comme les défauts d'engrenage ou de roulement.

4.1. Étapes de la méthode

Identification de la zone de fonctionnement stationnaire :

- Calcul du spectrogramme pour détecter l'intervalle de temps où la vitesse de rotation est constante
- Extraction du tronçon (avec vitesse constante) du signal de vibration
- Identification des bandes de fréquences de résonance via le fast kurtogramme
- Isolation de la bande contenant les impulsions avec maximum de kurtosis
- Extraction et filtrage du signal
- Analyse spectrale du signal filtré
- Identification du défaut

4.2. Détection des défauts lors de la vitesse variable

Les signaux considérés sont les signaux de vibrations mesurés lors de vitesse variable, c'est-à-dire les signaux des figures 3.4(c), 3.6(c) et 3.8(c). Ces signaux sont analysés par la méthode proposée ci-dessus.

4.2.1. Cas d'absence de défaut

Le signal vibratoire de la figure 3.4(c) est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.5(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre 40 et 49 secondes puisque la fréquence d'engrènement est fonction de cette dernière, comme montré sur la figure 3.16.

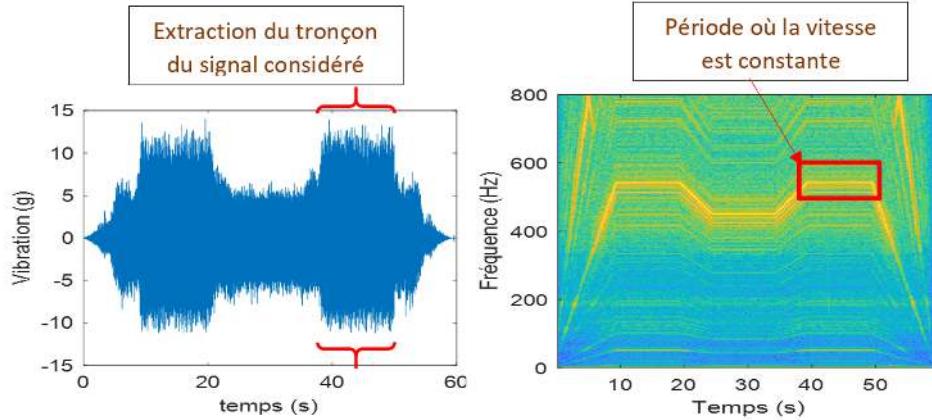


Figure 3.16. Extraction du tronçon du signal vibratoire mesuré en absence de défaut

Une fois le signal extrait entre la période 40 - 49s, on l'analyse par le kurtogramme afin d'identifier la bande des fréquences caractérisant les composantes impulsionnelles. Le résultat est montré sur la figure suivante. Le kurtogramme indique une bande de fréquence [200-300 Hz] contenant l'index kurtosis le plus élevé.

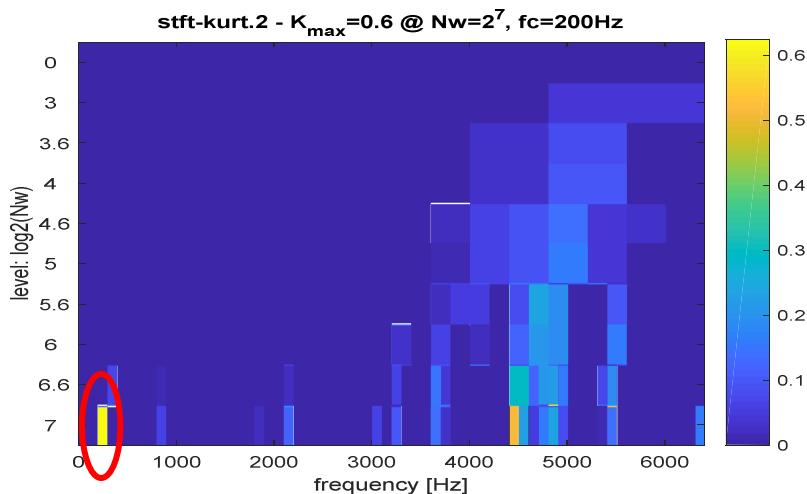


Figure 3.17. Kurtogramme du signal extrait dans le cas d'absence de défaut

A partir de cette indication le kurtogramme permet de filtrer le signal sur la bande de fréquence [200 - 300 Hz], ensuite calculer son spectre. Le résultat est présenté sur la figure 3.18.

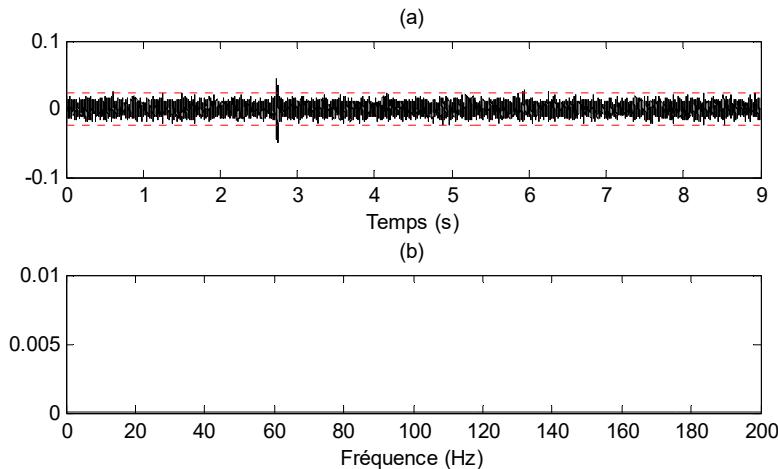


Figure 3.18. Analyse du signal filtré par le kurtogramme : (a) signal filtré dans l'intervalle de fréquences détecté, (b) spectre du signal filtré

Comme le montre la figure 3.18(a), le signal filtré ne montre pas d'impulsivité dans ce dernier. D'ailleurs son spectre, figure 3.18(b), ne montre pas de composantes fréquentielles significatives qui identifient un défaut impulsional quelconque.

4.2.2. Cas de défaut de dent cassée sur le pignon examiné

Le signal vibratoire correspondant est celui de la figure 3.6(c), qui est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.7(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre la période [40 - 49s], puisque la fréquence d'engrènement est fonction de cette dernière. Le kurtogramme calculé, sur le tronçon signal isolé, nous donne un intervalle de fréquences entre [2900-3000 Hz], voir figure 3.19(a). Le signal filtré sur cette bande de fréquence et son spectre sont affichés sur la figure suivante. Nous pouvons clairement distinguer les impulsions sur le signal filtré (figure 3.19(b)) en comparaison à la figure 3.18(a). De plus, le spectre du signal filtré montre des composantes fréquentielles à 15Hz et ses multiples. Cette composante fréquentielle correspond à la fréquence de rotation du pignon en défaut.

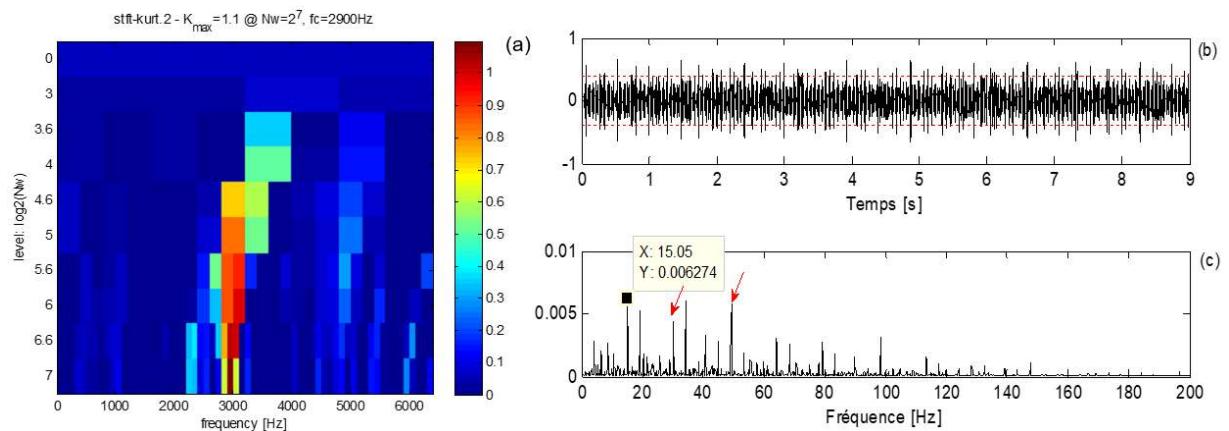


Figure 3.19. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence d'une dent cassée : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré et (c) son spectre

4.2.3. Cas composé de défaut de bague interne de roulement et une dent cassée du pignon examiné

Le signal vibratoire correspondant est celui de la figure 3.8(c), qui est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.9(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre la période [40 - 49s], puisque la fréquence d'engrènement est fonction de cette dernière. Le kurtogramme calculé nous donne deux bandes de fréquences [1200-1300 Hz] et [3600-3700Hz].

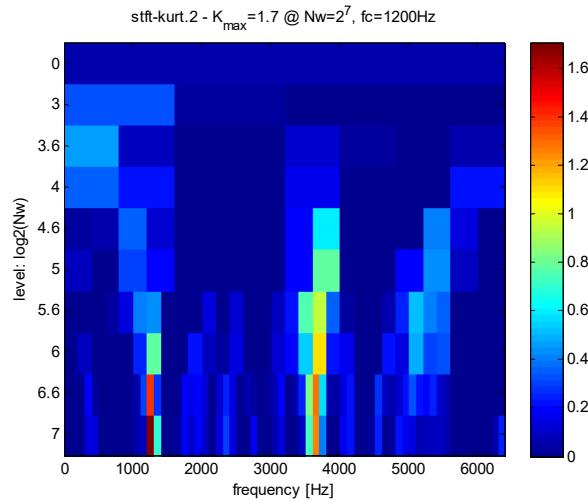


Figure 3.20. Kurogramme du tronçon de signal vibratoire mesuré lors de défauts composés

Le signal filtré entre [1200-1300Hz], nous permet de détecter sur son spectre, en figure 3.21 (a & b), des multiples de la composante fréquentielle lié au défaut du pignon (sa fréquence de rotation est 15 Hz). Tandis que le signal filtré sur la bande [3600-3700 Hz], voir figure 3.21(d), permet de déceler des multiples de la fréquence 2 Hz synonyme d'un défaut de bague interne du roulement examiné.

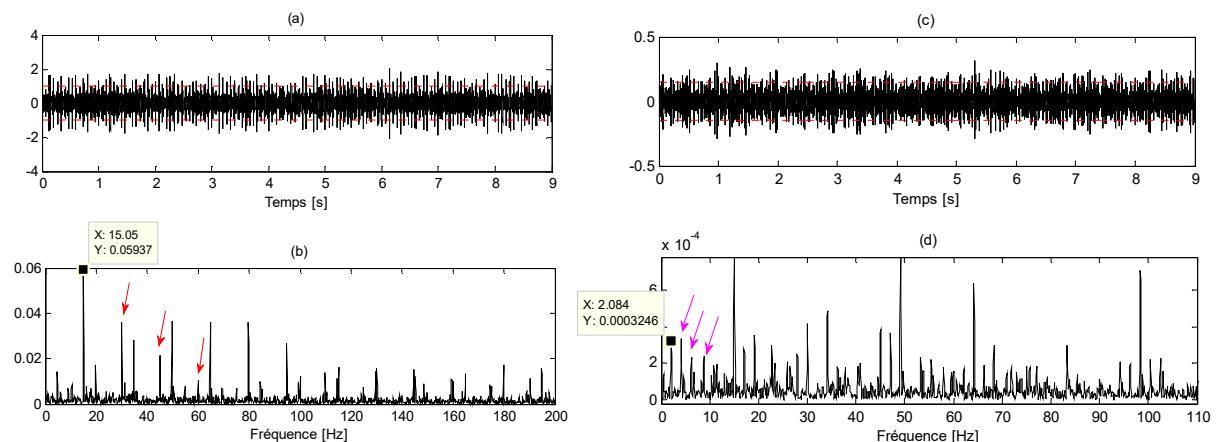


Figure 3.21. (a) signal filtré entre [1200-1300Hz], (b) son spectre, (c) signal filtré entre [3600-3700 Hz] et (d) son spectre

4.3. Détection des défauts lors de couple variable

4.3.1. Cas d'absence de défauts

Le signal vibratoire correspondant est celui de la figure 3.10(c), qui est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.11(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre la période [40 - 49s], puisque le couple est aussi constant à cette période. Le kurtogramme calculé nous indique un intervalle de fréquences entre [4400-4500 Hz], voir figure 3.22. Le spectre du signal filtré sur cette bande de fréquence n'indique aucune fréquence des défauts suspectés, voir figure 3.22. Cela montre qu'il n'existe aucun défaut.

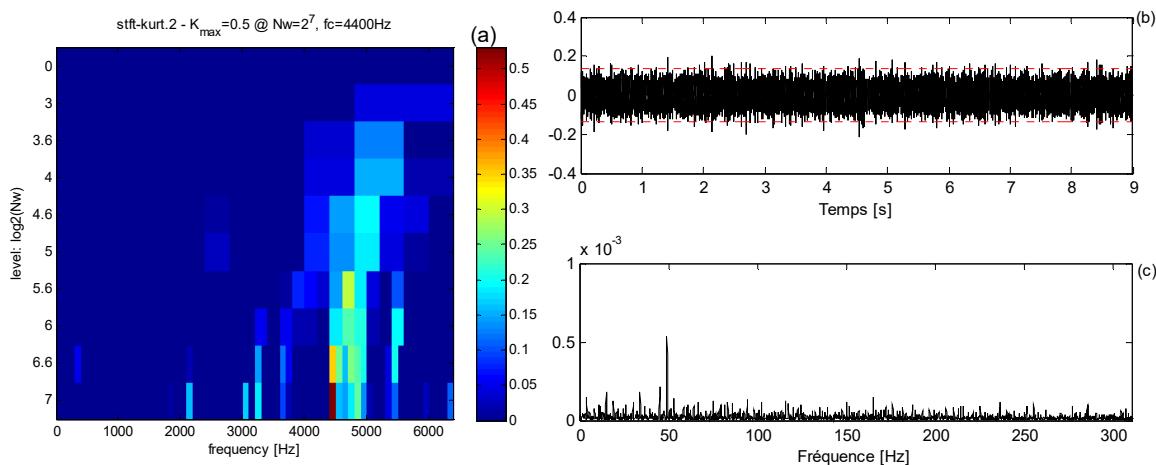


Figure 3.22. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en Absence de défaut : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) Spectre du signal filtré

4.2.2. Cas de défaut de dent cassée sur le pignon examiné

Le signal vibratoire correspondant est celui de la figure 3.12(c), qui est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.13(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre la période [40 - 49s], puisque la fréquence d'engrènement est fonction de cette dernière. Le kurtogramme de la figure 3.23(a) indique la bande de fréquence [2900-3000 Hz] et permet de calculer le spectre du signal filtré sur la figure 3.23(c) où l'on voit clairement les multiples de la fréquence 15 Hz qui caractérise le défaut de dent cassée du pignon examiné.

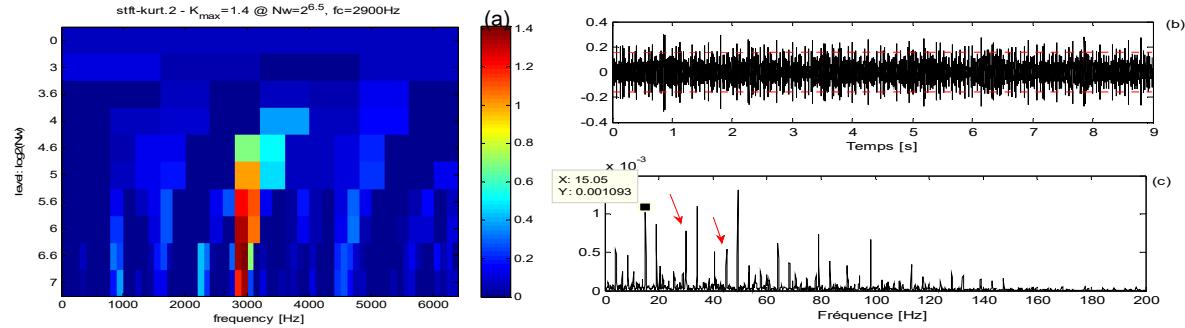


Figure 3.23. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence d'une dent cassée : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) Spectre du signal filtré

4.3.3. Cas composé de défaut de bague interne de roulement et une dent cassée du pignon examiné

Le signal vibratoire correspondant est celui de la figure 3.14(c), qui est déjà analysé en temps/fréquence et nous offre la figure 3.15(c). A partir de cette dernière, il est clair que la vitesse est constante entre la période [40 - 49s], puisque le couple est constant sur cette période. Le kurtogramme de la figure 3.24(a) indique deux bandes de fréquences, sauf qu'il suffit d'analyser la bande entre [3600-3700 Hz] et nous obtenons le spectre du signal filtré sur la figure 3.24(c) qui montre des composantes multiples de la fréquence 15 Hz qui caractérise le défaut de dent cassée du pignon et des multiples de la composante fréquentielle à 2 Hz synonyme du défaut de bague interne du roulement.

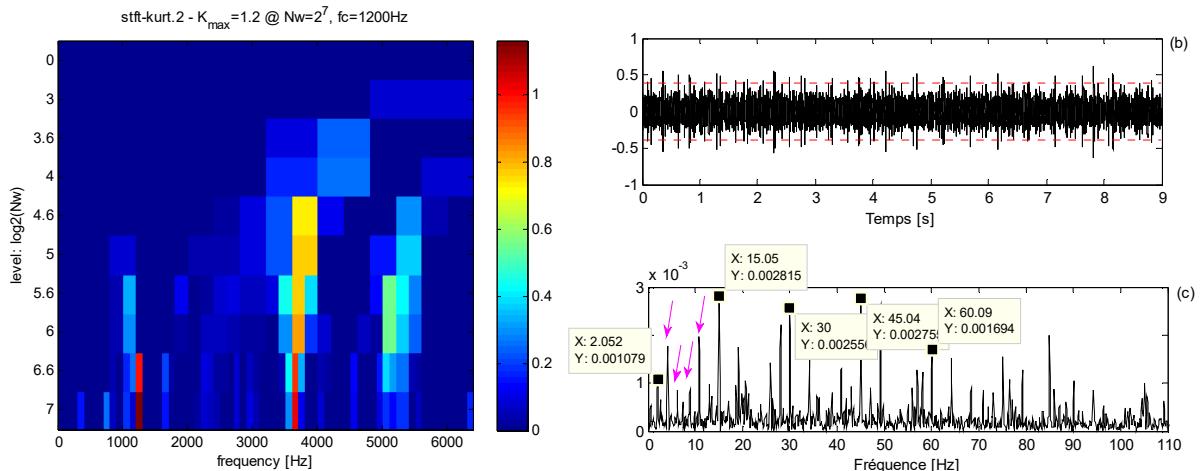


Figure 3.24. Analyse du tronçon du signal vibratoire mesuré en présence de défauts composés : (a) kurtogramme du signal isolé, (b) signal filtré par le kurtogramme et (c) spectre du signal filtré

5. Conclusion

Ce chapitre a abordé le défi complexe du diagnostic de défauts dans une boîte à engrenages opérant sous des conditions de travail variables : en vitesse et en couple. Initialement l'analyse directe des signaux bruts en régime non-stationnaire rendait la détection

de défauts particulièrement difficile car les signatures caractéristiques étaient masquées ou déformées par les variations des conditions de fonctionnement.

Pour surmonter cette difficulté, une méthode de diagnostic avancée basée sur le kurtogramme, est proposée et employée. Cette technique a permis d'identifier de manière simple les bandes de fréquences de résonance excitées par les chocs impulsionnels liés aux défaillances mécaniques (roulement et engrenage). En isolant les segments de signal où la vitesse était momentanément constante, on a pu appliquer cette technique même dans des conditions de fonctionnement variables.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les défaillances qui apparaissent dans les machines tournantes sont difficile à détecter visuellement, ou alors il est déjà trop tard pour agir. De ce fait, la maintenance préventive conditionnelle des machines par analyse des vibrations permet de mieux gérer les défaillances, en détectant les défauts à un stade précoce, avant qu'ils ne deviennent critiques. Cette technique permet de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître des organes en mouvement. Plusieurs techniques d'analyse vibratoire des équipements industrielles ont été proposées :

Le premier chapitre de ce travail fait office d'une mise en contexte de l'approche proposée en établissant une étude bibliographique du diagnostic des machines tournantes dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle. Ce chapitre met en lumière l'importance du diagnostic des machines en étudiant les différents types d'avaries et leur influence prépondérante sur les systèmes exploitation. Ensuite, une étude de la méthodologie du diagnostic de façon générale centrée autour de l'analyse, de la surveillance et du diagnostic a été établie. Il a aussi été question d'étudier en détail les différentes méthodes d'analyse. Les méthodes de surveillance les plus utilisées ont été détaillées entre l'analyse temporelle, l'analyse spectrale et l'analyse temps-fréquence.

Chapitre 2 l'analyse temporelle est utilisée en premier lieu, elle permet le diagnostic des défauts par le suivi de l'évolution des indicateurs du niveau global des vibrations et courant et tension tel que la valeur efficace (RMS), le kurtosis, la variance, la moyenne, le facteur crête, l'indicateur de santé ayant été proposé. Donc, cette technique est fiable pour quantifier la gravité du défaut, mais elle demeure insuffisante dans la localisation du défaut suite au manque de l'information fréquentielle du signal. Dans le but de soulever cette limite, on propose utiliser d'autres méthodes d'analyses dans chapitre 3.

Dans le chapitre 3, l'analyse temps-fréquence donne des résultats peu satisfaisants lors d'analyse des défauts non combinés qui génèrent des signaux instationnaires, c'est une technique qui ouvre un nouvel angle de vision, en l'occurrence, l'aspect temporelle et fréquentielle au même temps, ce qui permet de voir les instants où interviennent les chocs. Le kurtogramme permet d'identifier les résonnances excitées par les défauts de type choc, ainsi, le calcul du spectre d'enveloppe de ces résonnances permet de séparer les défauts combinés. Son inconvénient réside dans le choix et la constance de la fenêtre d'analyse, vu que les phénomènes vibratoires sont inconnus, donc nous ne pouvons pas adapter la longueur de la fenêtre à chaque phénomène, dans ce travail ces limites ont exigé d'appliquer plusieurs longueurs afin de trouver la plus adaptée aux différents défauts traités.

Références bibliographiques

- [1] A. Boulenger, C. Pachaud, Surveillance des machines par analyse vibratoire, Paris, Dunod, 2009.
- [2] D. Augeix, *Analyse vibratoire des machines tournantes*, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, vol. BM 6 670, pp. 1–22, 2002.
- [3] M.E. Badaoui, *Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l'analyse cepstrale*, Thèse de doctorat, Université de Compiègne, 1999.
- [4] S. H. Kia, H. Henao et G. A. Capolino, "Trends in gear fault detection using electrical signature analysis in induction machine-based systems", *Proceedings of the IEEE Workshop on Electrical Machines Diagnosis*, pp. 297–303, 2015
- [5] J. Vasselin, M. Petit, J. Mocq, "L'apport de l'analyse des courants d'alimentation des moteurs pour la maintenance conditionnelle des machines tournantes", *Actes du 22e Congrès Français de Mécanique*, Lyon, France, pp. 1–6, 2015.
- [6] Rapport technique, Tests de diagnostic et surveillance des machines tournantes, Omicron Energy. <https://www.omicronenergy.com/download/document/ED4F721D-59D2-4F89-8F3D-7CA54ED79E45/>, page consulté le 15/04/2025
- [6] E. C. Fitch, *Proactive maintenance for mechanical systems*. Oxford UK, 1992. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-11844-5>
- [7] J. Morel, Surveillance vibratoire et maintenance prédictive, traité mesure et contrôle, Techniques de l'Ingénieur, 1992
- [8] C. Migeon, *Émission acoustique et analyse vibratoire pour l'étude des défauts de roulements pour différents régimes moteurs*, Mécanique [physics.med-ph]. 2011. [dumas-01157531](https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01157531v1)
<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01157531v1>
- [9] S.J. Loutridis, Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition. Engineering Structures, vol. 26, pages 1833–1841, 2004.
- [10] S. Kass, Diagnostic vibratoire autonome des roulements. Thèse en cotutelle de l'université de Lyon et l'université Libanaise, 2019.
<http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI103/thesis.pdf>
- [11] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*. Ed Pearson, Londres, 2011
- [12] A. Parey, M. Badaoui, F. Guillet et N. Tandon, Dynamic modeling of spur gear pair application of empirical mode decomposition-based statistical analysis for early detection of localized tooth defect, Journal of Sound and Vibration 294 (2006), 547-561.

- [13] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* (2nd ed.). California Technical Publishing. 2003. <https://www.dspsguide.com/pdfbook.htm>, consulté le 15/04/2025
- [14] M.Bouzouidja,M.Soualhi, A. Soualhi, H. Razik, Detection and Diagnostics of Bearing and Gear Fault under Variable Speed and Load Conditions Using Heterogeneous Signals. Energies, vol. 17(643),2024. <https://doi.org/10.3390/en17030643>
- [15] R. E. Bekaa, *Fondements du traitement du signal*, Edition OPU, Algérie, 1998
- [16] N. Tandon and A. Choudhury, A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Journal Tribology International*, vol. 32, pp. 469–480, 1999.
- [17] F. Auger, P. Flandrin, P. Gonçalvès, and O. Lemoine, Time-Frequency Toolbox, CNRS France-Rice University, vol. 46. 1996.
- [18] V. Giurgiutiu and L. Yu, Comparison of short-time Fourier transform and wavelet transform of transient and tone burst wave propagation signals for structural health monitoring, *Proc. Int. Workshop on Structural Health Monitoring*, vol. 5, 2003
- [19] J. K. Hammond and P. R. White, The analysis of non-stationary signals using time-frequency methods, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 190, pp. 419–447, 1996.
- [20] A. Boulenger and C. Pachaud, *Analyse vibratoire en maintenance – Surveillance et diagnostic des machines*, Dunod, 2003.
- [21] A. Djebala, Application de la transformée par ondelettes à l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques, Ph.D. dissertation, Univ. Badji Mokhtar, 2008.
- [22] X. Chiementin, L. Rasolofondraibe, F. Bolaers, B. Pottier, and J. P. Dron, Détection précoce de défaut de roulement par adaptation d'ondelette aux signaux de type choc, 12^{ème} Colloque National de la Recherche en IUT, Brest, France, 1–2 June 2006.
- [23] F. Bolaers, J. P. Dron, and L. Rasolofondraibe, Prédiction et suivi de l'évolution d'un écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire, XVI^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nice, France, p. 649, 2003.
- [24] X. Fan, &M. J. Zuo, Gearbox fault detection using Hilbert and wavelet packet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, pages 966-982. 2006
- [25] Brüel & Kjær, Prediction Partnership, partenariat pour la cartographie et la prévision du bruit, *Bruit et vibration, le bulletin international de Brüel & Kjær, no. 1, 2002.
- [26] M. El Badaoui, F. Guillet, N. Nejjar, P. Martini, and J. Danière, Diagnostic d'un train d'engrenages par analyse cepstrale synchrone, Colloque GRETSI, pp. 761–764, Grenoble, France, 1997.
- [27] S. Liu and W. Shi, Rough set based intelligence diagnostic system for valves in reciprocating pumps, International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace, vol. 1, pp. 353–358, 2001.

- [28] J. Lee, Sound and vibration signal analysis using improved short-time Fourier representation, Int. J. Automotive and Mechanical Engineering, vol. 7, pp. 811–819, 2013.
- [29] Ziani Ridha “Contribution à l’analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques”, Thèse de doctorat soutenue à l’université Ferhat Abbas – Sétif, 15/06/2015.
- [30]Z. Liu, C. Li and X. He, Evidential Ensemble Preference-Guided Learning Approach for Real-Time Multimode Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 20(4), pp. 5495-5504, 2024

Résumé

Malgré l'accélération technologique surtout dans le domaine industriel, les machines tournantes conservent toujours leurs places et leur poids dans les installations. Et pour cela il faut développer et améliorer la fonctionnalité et la capacité de prévision des défauts pour éviter de causer des arrêts non programmés sur notre machine ce qui est synonyme de perte de productivité. Ce travail porte sur le diagnostic des défauts dans les boîtes à engrenages par traitement du signal, en démontrant la supériorité de l'analyse vibratoire sur l'analyse électrique. Pour des conditions de fonctionnement stables, des indicateurs statistiques comme le Kurtosis se révèlent efficaces. Cependant, en conditions variables (vitesse et charge), une méthode avancée basée sur le Kurtogramme s'avère indispensable, permettant de détecter et d'identifier avec une grande précision des défauts simples et même combinés (roulement et engrenage).

Mots-clés : multi-capteurs / Analyse vibratoire/ Détection des défauts/ Défauts combinés / analyse temps fréquence / kurtosis spectrale.

Abstract

Despite technological acceleration, especially in the industrial field, rotating machines still retain their places and weight in installations. And for this, it is necessary to develop and improve the functionality and the ability to predict defects to avoid causing unscheduled stops on our machine, which is synonymous with loss of productivity. This work focuses on the diagnosis of defects in gearboxes by signal processing, demonstrating the superiority of vibration analysis over electrical analysis. For stable operating conditions, statistical indicators such as Kurtosis prove effective. However, in variable conditions (speed and load), an advanced method based on the Kurtogram proves essential, allowing the detection and identification with high precision of simple and even combined defects (bearing and gear).

Keywords : multi-sensors / vibration analysis / fault detection / combined faults / time-frequency analysis / spectral kurtosis.

الملخص

على الرغم من التسارع التكنولوجي، وخاصةً في المجال الصناعي، لا تزال الآلات الدوارة تحافظ بمكانتها ووزنها في التركيبات. ولهذا، من الضروري تطوير وتحسين وظائفها وقدرتها على التنبؤ بالأعطال لتجنب التوقفات المفاجئة لآلاتنا، والتي تؤدي إلى انخفاض الإنتاجية. يركز هذا العمل على تشخيص عيوب علب التروس من خلال معالجة الإشارات، مما يُظهر تفوق تحليل الاهتزازات على التحليل الكهربائي. في ظروف التشغيل المستقرة، أثبتت المؤشرات الإحصائية مثل التفرطح فعاليتها. ومع ذلك، في الظروف المتغيرة (السرعة والحمل)، ثبتت الطريقة المقدمية على مخطط التفرطح (Kurtogram) أهميتها، حيث تتيح الكشف عن العيوب البسيطة وحتى المركبة (المحمل والترس) وتحديد دقتها عالية.

الكلمات المفتاحية: متعدد الحساسات / تحليل الاهتزاز / كشف العيوب / العيوب المركبة / تحليل الزمن والتردد / الكورتوزيس الطيفي.