



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Lettres et des Langues
Département de Génie Electrique
Filière de

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines Electriques

Présenté et soutenu par :
Hamdi Mostapha

Abed Kader hamia

Le : Juin 2022

Diagnostic des défauts de roulement par les descripteurs statistiques

Jury :

| | | | |
|-------------------------|------|----------------------|------------|
| Dr. ZOUZOU Salah eddine | prof | Université de Biskra | Président |
| Dr. Ghoggal Adel | prof | Université de Biskra | Examineur |
| Dr. DERGHAL Hamid | MAA | Université de Biskra | Rapporteur |

Année universitaire : 2021/2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Machines Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Diagnostic des défauts de roulement par les descripteurs statistiques

Présenté par :

Hamdi mostapha

Hamia abed kader

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. DERGHAL Hamid

Avis favorable du Président du Jury

Dr. ZOUZOU Salah eddine

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Option : Machines Electriques

Thème :

Diagnostic des défauts de roulement par les descripteurs statistiques

Proposé par :

Hamdi mostapha

Hamia abd lkader

Dirigé par :

Dr. DERGHAL Hamid

Dédicaces

À la mémoire de mon père

À ma chère mère

À mes frères, ma sœur

Et toute ma famille

À tous mes amis

Je dédie ce modeste travail.

*Hamdi mostapha
Hamia abd lkader*

Remerciement

Tout d'abord nous remercions Dieu

Tout-Puissant, qui nous a donné

La force et la volonté de faire ce travail

Nous exprimons nos profondes gratitude

À notre encadreur Dr. Hamid Derghal pour

Nos avoir dirigé ce travail, nous le remercions pour

La qualité de ses conseils, sa patience et son aide tout

Au long de notre thèse. Nos remerciements tous

Les membres de jury qui ont bien voulu juger

Et examiner le présent mémoire

Nous remercions toute personnes ayant contribues

De près ou de loin au bon déroulement de ce travail

Résumé

Le diagnostic des défauts mécaniques de la machine tournante par l'analyse des vibrations a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de traitement du signal. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, de déterminer sa gravité et de suivre son évolution. Les roulements, considérés comme des composants cruciaux dans les machines tournantes, sont largement utilisés dans l'industrie. Ainsi, la surveillance de l'état des roulements est devenue une opération incontournable dans le cadre du déploiement d'une politique de maintenance préventive. Ce travail de mémoire, s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des roulements par l'analyse vibratoire des signaux issus des roulements défectueux en employant la méthode temporelle.

Mots clés : diagnostic, vibration, analyse vibratoire, roulement, méthode temporelle, indicateurs scalaires.

Abstract

The diagnosis of mechanical faults in rotating machinery by vibration analysis has evolved considerably in recent years thanks to advanced signal processing techniques. These techniques now make it possible to detect at an early stage the existence of a defect, to identify its nature, to determine its severity and to monitor its evolution. Bearings, considered crucial components in rotating machinery, are widely used in industry. Thus, monitoring the condition of the bearings has become an essential operation in the context of the deployment of a preventive maintenance policy. This memory work is part of the diagnosis of bearing faults by vibratory analysis of signals from defective bearings using the temporal method.

Keywords: diagnosis, vibration, vibration analysis, bearing, temporal method, scalar indicators

ملخص

تطور تشخيص الأعطال الميكانيكية في الآلات الدوارة عن طريق تحليل الاهتزاز بشكل كبير في السنوات الأخيرة بفضل تقنيات معالجة الإشارات المتقدمة. تتيح هذه التقنيات الآن الكشف في مرحلة مبكرة عن وجود خلل ما، وتحديد طبيعته، وتحديد شدته ومراقبة تطوره. تستخدم المحامل، التي تعتبر مكونات أساسية في الآلات الدوارة، على نطاق واسع في الصناعة. وبالتالي، أصبحت مراقبة حالة المحامل عملية أساسية في سياق نشر سياسة الصيانة الوقائية. يعد عمل الذاكرة هذا جزءاً من تشخيص أخطاء المحمل عن طريق التحليل الاهتزازي للإشارات من المحامل المعيبة باستخدام الطريقة الزمنية.

الكلمات المفتاحية: التشخيص، الاهتزاز، تحليل الاهتزاز، الاتجاه، الطريقة الزمنية، المؤشرات العددية.

Liste des figures :

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Figure I.1 : schéma principale de machine asynchrone..... | 2 |
| Figure I.2 : symbole de machine asynchrone..... | 3 |
| Figure I.3 : constitution de machine asynchrone..... | 3 |
| Figure I.4: Shema de stator pours machine asynchrony..... | 4 |
| Figure I.5: Sheema de rotor pours machine asynchronie..... | 4 |
| <i>Figure I.6: couplage étoile de machine asynchronie.....</i> | <i>5</i> |
| <i>Figure I.7: couplage triangle de machine asynchronie.....</i> | <i>5</i> |
| <i>Figure I.8: indication de machine asynchronie.....</i> | <i>6</i> |
| <i>Figure I.9: défaillances de machine asynchronie.....</i> | <i>8</i> |
| <i>Figure I.10 : Défauts de la machine asynchrone en pourcentage.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figure I.11 : Répartition des types de défauts des machines asynchrones de moyenne puissance.....</i> | <i>9</i> |
| <i>Figure I.12 : Représentation des différents défauts statorique possibles.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Figure I.13 : Photo d'une barre cassée.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure I.14 : Rupture d'un anneau.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure I.15: Défauts d'excentricité.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figure I.16: Défauts d'excentricité (statique, dynamique).....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure I.17: Défauts de roulement.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure I.18: Structure d'un roulement à billes.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figure I.19: bruit de fond.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure I.20: début d'usure.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure I.21: l'usure progresse.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure II.1: Diagramme des différents concepts de maintenance.....</i> | <i>20</i> |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure II.2 : vue d'ensemble des différents types de maintenance</i> | 25 |
| <i>Figure II.3 : plan de travail préventive systématique</i> | 29 |
| <i>Figure II.4 : Maintenance préventive systématique</i> | 29 |
| <i>Figure II.5: début de la démarche de Maintenance</i> | 31 |
| <i>Figure II.6 : principe de la maintenance conditionnelle</i> | 32 |
| <i>Figure II.7: Organisation de la maintenance conditionnelle</i> | 33 |
| <i>Figure II.8 : Cartographie thermique d'un bâtiment</i> | 35 |
| <i>Figure II.9 : Défaut sur un palie</i> | 35 |
| <i>Figure II.10 : Mesure d'une fissure interne par ultrasons</i> | 36 |
| <i>Figure II.11 : Technique du ressuage</i> | 36 |
| | |
| <i>Figure III.1: Evolution du paramètre scalaire TALAF en fonction de la taille d'un défaut sur la bague extérieure</i> | 46 |
| <i>Figure III.2: Evolution du paramètre scalaire, THIKAT en fonction de la taille d'un défaut sur La race extérieure</i> | 46 |
| | |
| <i>Figure IV.1: Banc d'essai de roulements de Case Western Reserve Université (CWRU)</i> | 51 |
| <i>Figure IV.2 : Caractéristiques géométriques d'un roulement</i> | 53 |
| <i>Figure IV.3 : les quartés charges</i> | 55 |
| <i>Figure IV.4 : les valeurs l'indicateur RMS (valeur efficace) pour machine sans défaut</i> | 56 |
| <i>Figure IV.5 : les valeurs l'indicateur Peak pour machine sans défaut</i> | 57 |
| <i>Figure IV.6 : les valeurs l'indicateur skewness pour machine sans défaut</i> | 58 |
| <i>Figure IV.7: les valeurs l'indicateur kurtosis pour machine sans défaut</i> | 59 |
| <i>Figure IV.8: les valeurs l'indicateur Crest factor pour machine sans défaut</i> | 60 |
| <i>Figure IV.9: les valeurs l'indicateur Shape factor pour machine sans défaut</i> | 61 |
| <i>Figure IV.10: les valeurs l'indicateur impulse factor pour machine sans défaut</i> | 62 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Figure IV.11: les valeurs l'indicateur TALAF pour machine sans défaut.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figure IV.12: les valeurs l'indicateur THIKAT pour machine sans défaut.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Figure IV.13 : les charges pour défaut baguent interne pour la charge 0.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Figure IV.14 : Exemple de simulation les défauts de roulement pour charge 0 de MAS.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figure IV.15: les charges pour défaut bague interne pour la charge 1.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figure IV.16: les charges pour défaut baguent interne pour la charge 2.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figure IV.17: les charges pour défaut baguent interne pour la charge 3.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure IV.18: les valeurs l'indicateur RMS (valeur efficace).....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure IV.19: les valeurs l'indicateur Peak.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure IV.20: les valeurs l'indicateur skewness</i> | <i>75</i> |
| <i>Figure IV.21: les valeurs l'indicateur kurtosis.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figure IV.22: les valeurs l'indicateur Crest factor.....</i> | <i>79</i> |
| <i>Figure IV.23: les valeurs l'indicateur Shape factor.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figure IV.24: les valeurs l'indicateur impulse factor.....</i> | <i>83</i> |
| <i>Figure IV.25: les valeurs l'indicateur Talaf.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figure IV.26: les valeurs l'indicateur THIKAT.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figure IV.27: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 0.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Figure IV.28: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 1.....</i> | <i>91</i> |
| <i>Figure IV.29: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 2.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Figure IV.30: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 3.....</i> | <i>93.</i> |
| <i>Figure IV.31: les valeurs l'indicateur RMS (valeur moyen).....</i> | <i>94</i> |
| <i>Figure IV.32: les valeurs l'indicateur Peak.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Figure IV.33: les valeurs l'indicateur Skwnesse.....</i> | <i>98</i> |
| <i>Figure IV.34: les valeurs l'indicateur kurtosis.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Figure IV.35: les valeurs l'indicateur Crest factor.....</i> | <i>102</i> |
| <i>Figure IV.36: les valeurs l'indicateur Shape factor</i> | <i>104</i> |

Figure IV.37: les valeurs l'indicateur impulse factor106

Figure IV.38: les valeurs l'indicateur TALAF108

Figure IV.39: les valeurs l'indicateur THIKAT110

Liste des tableaux

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tableau III.1 : Norme NFE 90-300 utilisée pour la surveillance des machines tournantes.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tableau IV.1 : Caractéristiques du roulement 6205-2RS JEMSKF</i> | <i>53</i> |
| <i>Tableau IV.2 : Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement 6205-2RS JEM SKF.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Tableau IV.3 : les résultats les indicateurs scalaires pour mouture sans défaut</i> | <i>55</i> |
| <i>Tableau IV.4: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Tableau IV.5: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement Pour bague interne.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Tableau IV.6 : les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement.....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tableau IV.7 : les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tableau IV.8: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement Pour la charge</i> | |
| <i>0 bague extérieure</i> | <i>90</i> |
| <i>Tableau IV.9: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement Pour la charge</i> | |
| <i>1 bague extérieure</i> | <i>91</i> |
| <i>Tableau IV.10: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement Pour la charge</i> | |
| <i>2 bague extérieure</i> | <i>92</i> |
| <i>Tableau IV.11: les résultats les indicateur scalaire les défauts de roulement Pour la charge</i> | |
| <i>3 bague extérieure</i> | <i>93</i> |

Liste des abréviations

RMS : Root Mean Squar.

FC : Facteur de crête.

KU : Kurtosis.

K : Le facteur K.

M4 : Le moment statistique d'ordre 4.

M2 : Le moment statistique d'ordre 2

IF: Impulse Factor

SF: Shape Factor

Skew : skewness

CA: Coefficients ondelette d'approximation.

CD: Coefficients ondelette de détails.

TO: La transformée en ondelettes.

TF: La transformée de Fourier.

BF: Défaut de la bille.

IRF: Défaut dans la bague interne.

ORF: Défaut dans la bague externe

Liste des symboles

N : Le nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles).

dm : Le diamètre primitif.

db : Le diamètre des éléments roulants (bille).

α : Angle de contact.

frot : Fréquence de rotation de la bague intérieure.

fext : Fréquence de rotation de la bague extérieure.

\bar{S} : La valeur moyenne des amplitudes.

fr : La fréquence de rotation

finner : La fréquence caractéristique du défaut de la bague intérieur

fouter : La fréquence caractéristique du défaut de la bague extérieur

fball : La fréquence caractéristique du défaut de la bille

A_c : Amplitude crête

A_i : Approximation d'ordre i

D : Diamètre moyen.

D_{cc} : Déplacement crête à crête

D_i : Détail d'ordre i

N : Nombre d'échantillons prélevés dans le signal

N_r : Vitesse de rotation

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : moteur asynchrone et ses défauts

| | | |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | <i>Introduction</i> | 2 |
| 2 | <i>Schéma principale</i> | 2 |
| 3 | <i>Symboles</i> | 3 |
| 4 | <i>Constatation</i> | 3 |
| | 4.1 <i>Le stator</i> | 3 |
| | 4.2 <i>Le rotor</i> | 4 |
| 5 | <i>Couplage de stator</i> | 5 |
| | 5.1 <i>Couplage étoile</i> | 5 |
| | 5.2 <i>Couplage triangle</i> | 5 |
| 6 | <i>Les défauts de machine asynchrones</i> | 6 |
| | 6.1 <i>Défauts statoriques</i> | 6 |
| | 6.2 <i>Défauts rotoriques</i> | 7 |
| | 6.3 <i>Les causes de défauts</i> | 7 |
| 7 | <i>Analyse statistique des origines des défauts statoriques et rotoriques</i> | 8 |
| 8 | <i>Le comportement de la machine asynchrone à rotor bobiné a des défauts suivants</i> | 9 |
| 9 | <i>Défauts statoriques</i> | 9 |
| | 9.1 <i>Court-circuit entre phases statorique</i> | 9 |
| | 9.2 <i>Un court-circuit entre spires de la même phase</i> | 10 |
| | 9.3 <i>Défaut d'ouverture d'une phase</i> | 11 |
| 10 | <i>Défauts rotoriques</i> | 11 |
| | 10.1 <i>Cassure de barres</i> | 11 |

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 10.2 Rupture d'anneaux..... | 12 |
| 10.3 Défaut d'excentricité | 12 |
| 10.3.1 Excentricité statique..... | 13 |
| 10.3.2 Excentricité Dynamique..... | 13 |
| 10.3.3 Excentricité mixte..... | 14 |
| 10.4 Défauts de roulement..... | 14 |
| 10.4.1 Les causes de dégradation de roulements | 15 |
| 10.4.2 Processus de dégradation d'un roulement..... | 15 |
| 10.4.3 Fréquences cinématiques des roulements | 17 |
| 1) Défaut de la bague intérieure | 17 |
| 2) Défaut de la bague extérieure | 17 |
| 3) Défaut de la cage | 17 |
| 4) Défaut de la bille | 17 |
| 11) Conclusion | 18 |

Chapitre II : la maintenance conditionnelle

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 1) Introduction | 20 |
| 2) Définition La maintenance | 20 |
| 3) Rôle de la maintenance | 21 |
| 4) Objectif de la maintenance | 22 |
| 5) Derviche maintenance au sein de l'entreprise..... | 22 |
| 5.1) Situation dans l'entreprise | 22 |
| 1) La centralisation | 22 |
| 2) Les avantages | 23 |
| 3) La décentralisation | 23 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6) Mission du service maintenance | 23 |
| 7) Organisation du service maintenance | 24 |
| 7.1) Maintenance centralisée | 24 |
| 7.2) Maintenance décentralisée | 24 |
| 8) Les types de maintenance | 25 |
| 8.1) La maintenance corrective | 25 |
| 8.1.1) Les types de maintenance corrective | 26 |
| 1) La maintenance corrective curative | 26 |
| 2) La maintenance corrective palliative | 27 |
| 8.2) La maintenance préventive | 27 |
| 8.2.1) Les types de maintenance préventive | 28 |
| 1) Maintenance préventive systématique | 28 |
| 2) Maintenance préventive conditionnelle | 30 |
| 8.2.2) Les avantages | 30 |
| 8.2.3) Objectifs de la maintenance conditionnelle | 31 |
| 8.2.4) Cas d'application | 32 |
| 8.2.5) Organisation de la maintenance conditionnelle | 33 |
| 8.2.6) Les outils des maintenances conditionnelle | 34 |
| 1) Mesure de la température | 34 |
| 2) Mesure des vibrations (niveau, fréquence) | 35 |
| 3) Mesure des détériorations surfaciques ou interne par contrôles non destructifs | 35 |
| 4) Mesure de la teneur en résidus des huiles et lubrifiants | 37 |
| 9) Conclusion. | 37 |

Chapitre III : les indicateurs scalaires

| | | |
|---|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Introduction..... | 39 |
| 2 | Grandeurs physiques d'un signal vibratoire..... | 39 |
| 3 | La grandeur physique en déplacement..... | 39 |
| 4 | La grandeur physique en vitesse..... | 40 |
| 5 | Les outils du diagnostic et de la surveillance par l'analyse vibratoire..... | 41 |
| 6 | Rappel des indicateurs scalaire..... | 42 |
| | 6.1 La valeur efficace ou le RMS (Root Mean Square)..... | 43 |
| | 6.2 Valeur crête (Peak)..... | 43 |
| | 6.3 Valeur moyenne..... | 43 |
| | 6.4 Le Kurtosis..... | 43 |
| | 6.5 Skewness..... | 44 |
| | 6.6 Le Facteur de crête (Crest Factor CF)..... | 45 |
| | 6.7 Factor de forme (The Shape Factor SF)..... | 45 |
| | 6.8 TALAF..... | 45 |
| | 6.9 THIKAT..... | 46 |
| 7 | Conclusion..... | 47 |

Chapitre IV : Diagnostic des défauts du moteur asynchrone par analyse temporelle

| | | |
|---|----------------------------------------------------------|----|
| 1 | Introduction..... | 50 |
| 2 | Banc d'essai des roulements « Bearing Data Center »..... | 51 |
| 3 | Descripteurs fréquentiels..... | 52 |
| 4 | L'analyse temporelle..... | 54 |
| 5 | Simulation les défaut roulement de MAS..... | 55 |
| | 5.1 Pour mouture sans défaut..... | 55 |
| | 5.1.1 RMS (valeur efficace)..... | 56 |
| | 5.1.2 Peak..... | 57 |
| | 5.1.3 Skewness..... | 58 |

| | |
|----------------------------------------------|----|
| 5.1.4 Kurtosis | 59 |
| 5.1.5 Crest factor | 60 |
| 5.1.6 Shape factor | 61 |
| 5.1.7 Impulse factor..... | 62 |
| 5.1.8 TALAF | 63 |
| 5.1.9 THIKAT | 64 |
| 5.1.10 Commenter générale | 65 |
| 5.2 La bague intérieure | 66 |
| • Charge 0 :1797tr/min..... | 66 |
| • Pour charge 1 :1772tr/min..... | 68 |
| • Charge 2 :1750tr/min..... | 69 |
| • Pour la charge 3 :1730tr/min..... | 70 |
| 5.2.1 RMS (valeur efficace) | 71 |
| 5.2.2 Peak | 73 |
| 5.2.3 Skewness | 75 |
| 5.2.4 Kurtosis..... | 77 |
| 5.2.5 Crest factor..... | 79 |
| 5.2.6 Shape factor | 81 |
| 5.2.7 Impulse factor..... | 83 |
| 5.2.8 TALAF | 85 |
| 5.2.9 THIKAT | 87 |
| 5.2.10 Commenter générale | 89 |
| 5.3 Pour Défaut de la bague extérieure | 90 |
| • Charge 0 :1797tr/min..... | 90 |
| • Charge 1 :1772tr/min..... | 91 |
| • Charge 2 :1750tr/min..... | 92 |
| • Charge 3 :1730tr/min..... | 93 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 5.3.1 RMS (valeur efficace) | 94 |
| 5.3.2 Peak | 96 |
| 5.3.3 Skewness | 98 |
| 5.3.4 Kurtosis..... | 100 |
| 5.3.5 Crest factor | 102 |
| 5.3.6 Shape factor | 104 |
| 5.3.7 Impulse factor..... | 106 |
| 5.3.8 TALAF..... | 108 |
| 5.3.9 THIKAT | 110 |
| 5.3.10 Commenter générale | 112 |
| 6 comparions | 113 |
| 7 Conclusion | 114 |

Conclusion générale

Bibliographie

Introduction Générale

Actuellement, le monde de l'industrie dispose des machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes, dont le but est de produire en quantité et d'améliorer en qualité pour répondre à la demande dans un environnement très concurrentiel. Pour cela, il est nécessaire d'assurer le bon fonctionnement qui est un atout majeur permettant d'atteindre une compétitivité optimale des outils de production.

La maintenance des machines nécessite une bonne compréhension des phénomènes liés à l'apparition et au développement des défauts. Détecter l'apparition d'un défaut à un stade précoce et suivre son évolution présente un grand intérêt industriel. En effet, il existe un vaste choix de techniques utilisées dans la surveillance des machines telles que : l'émission acoustique, l'analyse vibratoire, la thermographie et l'analyse des huiles

L'objectif de cet article est d'analyser la sensibilité d'indicateurs scalaires de défauts extraits du temps signaux de domaine aux dommages de palier se manifestant par une augmentation de la taille et du nombre de défauts localisés. Six indicateurs scalaires sont considérés : Peak, RMS, Crest factor, Kurtosis,

Facteur d'impulsion et facteur de forme. Une nouvelle application logicielle, appelée BEAT (Baring Toolbox), a été développée afin de simuler la réponse vibratoire des roulements aux excitations produites par défauts localisés. La prévisibilité du modèle de simulation a déjà été confirmée par comparaisons précédentes avec les résultats d'expériences réalisées sur un banc d'essai de roulements. Simulation

Les résultats montrent que ces indicateurs temporels peuvent être utilisés pour la prédiction précoce d'un défaut au cours du premier stade de la dégradation. Cependant, ils deviennent moins sensibles à mesure que les dégâts augmentent et devenir très sévère. Deux nouveaux descripteurs appelés TALAF et THIKAT, qui combinent descripteurs conventionnels, sont développés afin d'améliorer le diagnostic jusqu'au point où des signes ultimes de défaillance catastrophique sont observés, pour diagnostiquer la gravité de la dégradation dans quatre étapes et d'aider les gestionnaires à programmer leurs opérations de maintenance.

L'ensemble du travail défini ci-dessus est reparti sur quatre chapitre :

Le premier chapitre est consacré à des études bibliographiques liées au domaine du diagnostic des machines tournantes tel que les éléments de constitution d'une machine asynchrone et aussi un aperçu sur les différents défauts pouvant survenir dans la machine asynchrone d'écureuil et leurs causes et les différentes méthodes de diagnostic d'une machine asynchrone.

Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de différents types de maintenance et nous nous sommes concentrés sur la maintenance conditionnelle

Le troisième chapitre, nous avons expliqué l'importance de l'analyse des vibrations dans la machine et nous avons parlé des indicateurs scalaires, tels que le RMS, la Kurtosis, le facteur de crête, et par la suite des indicateurs et les deux indicateurs nouveaux TALAF et ITHIKAT et leur rôle dans la révélation des défauts.

Le quatrième chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus après l'application des indicateurs scalaires

Et profitant d'eux pour l'apparition de défauts, car nous avons comparé les indicateurs entre eux en termes de diamètre et en termes de charges nous constatons que tous les indicateurs ne sont pas stables

Nous vous laissons avec la recherche et je prie Dieu que vous aimiez la recherche.

Chapitre I

1) Introduction :

La machine asynchrone connue également sous le terme `anglo-saxon` de la machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On les retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, train, propulsion des navires), de l'industrie (machine-outil), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes. Pour fonctionner en courant monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes des courants triphasés.[1]

2) Schéma principale :

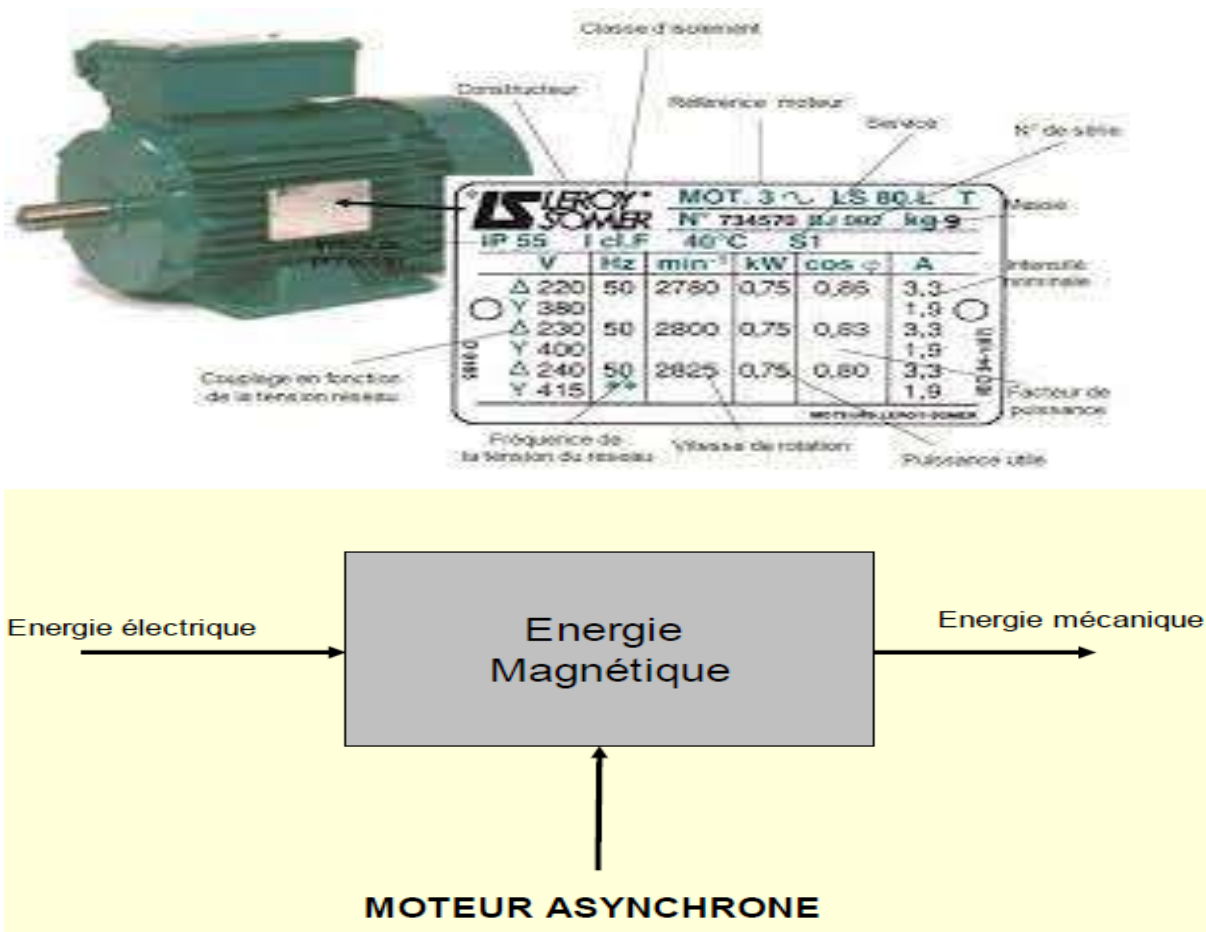


Figure I.1 : schéma principale de machine asynchrone

3) Symboles :

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine asynchrone



Figure I.2 : symbole de machine asynchrone

4) CONSTITUTION :

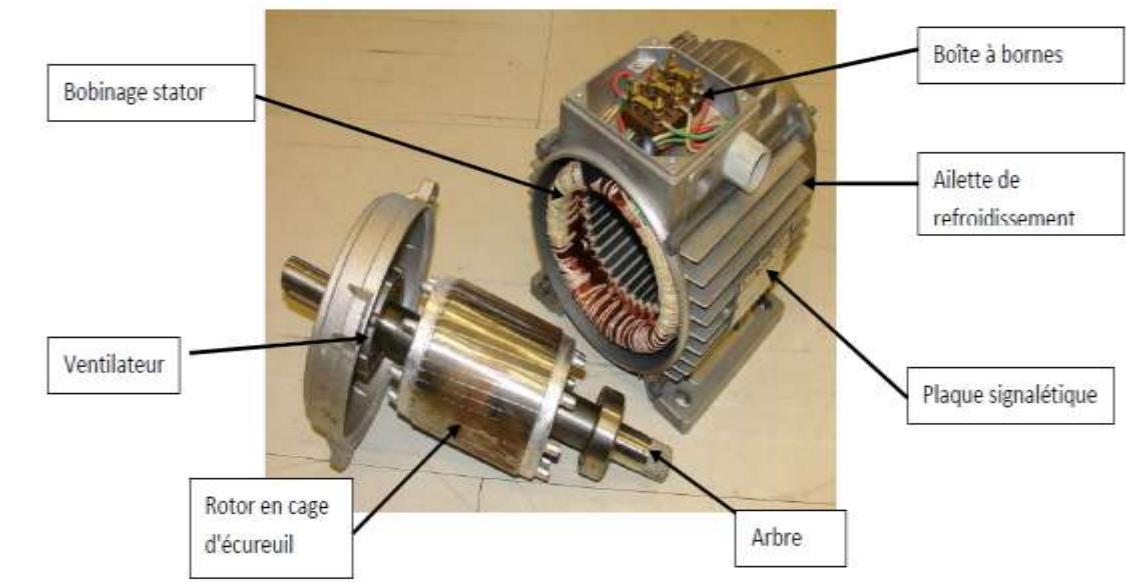


Figure I.3 : constitution de machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de deux éléments principaux :

4.1) Le stator :

Le stator d'un moteur asynchrone est identique à celle d'un moteur synchrone (MS), 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de $2\pi/3$ qui sont alimentés par un système de tension équilibrées. Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

- De la carcasse,
- Des paliers,
- Des flasques de palier,

- *Du ventilateur refroidissant le moteur,*
- *Le capot protégeant le ventilateur [2]*

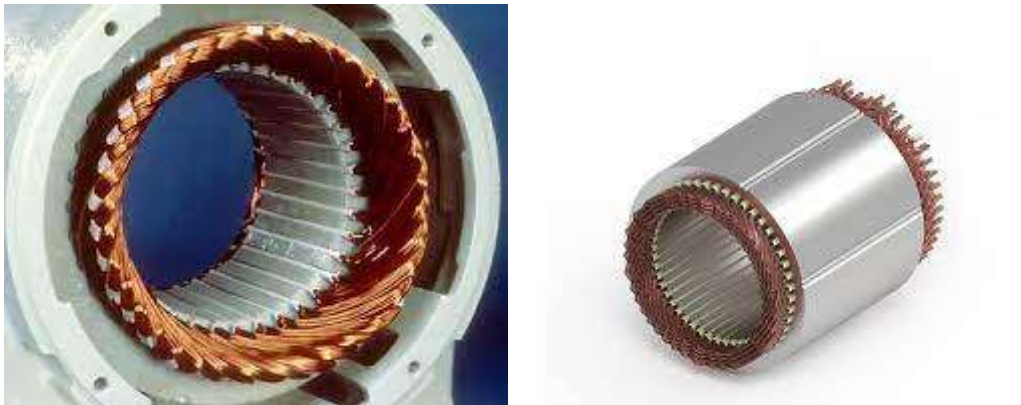


Figure I.4: Schéma de stator pour machine asynchrone

4.2) Le rotor :

Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MS, bobinage triphasé décalés de $2\pi/3$ à même nombre de pôles que celle du stator MS.

Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité.

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur.

Il se compose essentiellement :

- *D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.*
- *D'une cage d'écurieil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices. [2]*



Figure I.5: Schéma de rotor pour machine asynchrone

5) Les couplages

5.1) COUPLAGE DU STATOR

Le stator peut être alimenté selon deux couplages : étoile ou triangle. La tension aux bornes des enroulements (bobinages) ne sera pas la même suivant le couplage.

5.1.1) Couplage étoile : 

Le schéma de raccordement est donné ci-contre :

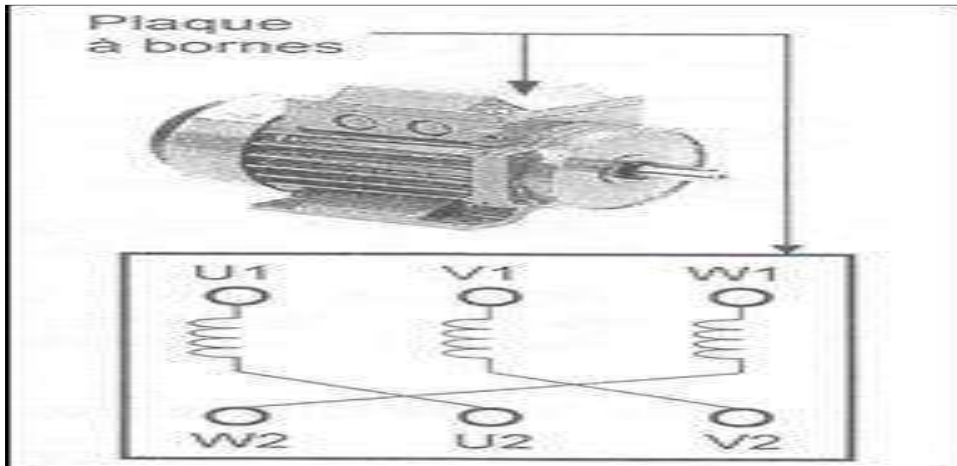



Figure I.6: couplage étoile de machine asynchrone

5.2) Couplage triangle : 

Dans ces conditions, l'enroulement voit à ses bornes la tension composée du réseau

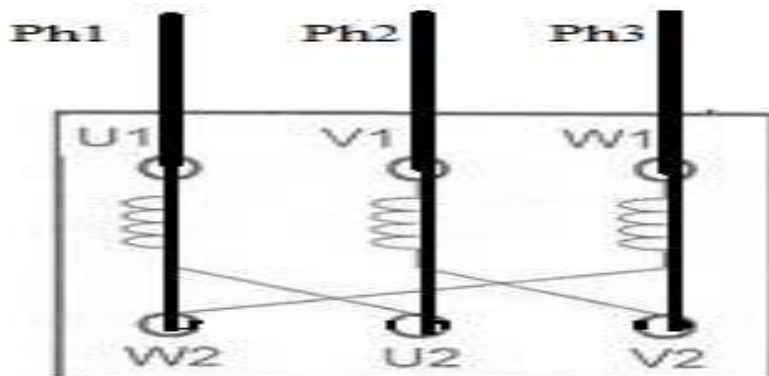


Figure I.7: couplage triangle de machine asynchrone

Exemple par type d'indication :

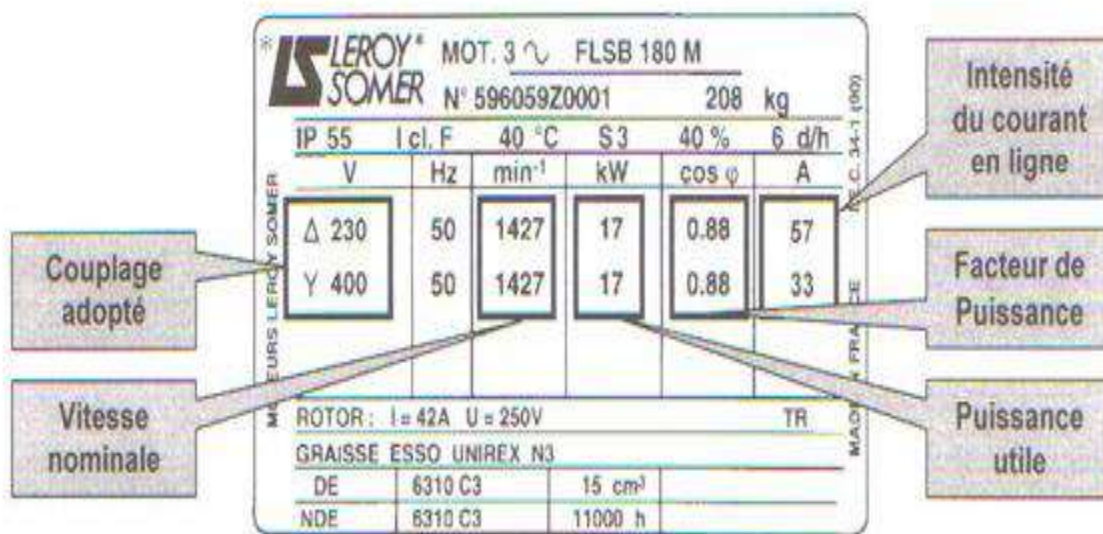


Figure I.8: indication de machine asynchrone

6) Les défauts de machine asynchrones :

Principaux défauts de la machine asynchrone, causes et conséquences :

Si l'on élimine les pannes dues à des causes intrinsèques, c'est-à-dire, résultant d'une mauvaise conception (mauvais choix des matériaux), d'une mauvaise fabrication (défauts d'usinage) ou d'un mauvais montage (serrage, désalignement) du moteur, les défaillances usuelles d'une machine asynchrone sont les suivantes : [3]

6.1) Défauts statoriques :

1. Court-circuit entre phases statorique.
2. Court-circuit entre spire d'une même phase.
3. Ouverture d'une phase.
4. Défauts du circuit magnétique (ruptures de tôles).

6.2) Défauts rotoriques :

1. Cassure de barres.
2. Rupture d'anneaux.
3. Défauts de roulement.
4. Excentricité statique et dynamique.
5. Excentricité mixte.

6.3) Les causes de défauts :

- 1) les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, etc.
- 2) les amplificateurs de défauts : surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement, etc.
- 3) les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Les machines électriques et les systèmes d'entraînement sont soumis à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être classés selon leurs causes en deux grandes familles les défauts à causes internes et les défauts à causes externes.

Les défauts externes sont provoqués par les tensions d'alimentation, la charge mécanique

Ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine. Les défauts internes sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques, bobinages du stator et du rotor, entrefer mécanique, cage rotorique, . . .) [5]

A titre d'exemple, nous pouvons citer d'une manière non exhaustive les défauts suivants :

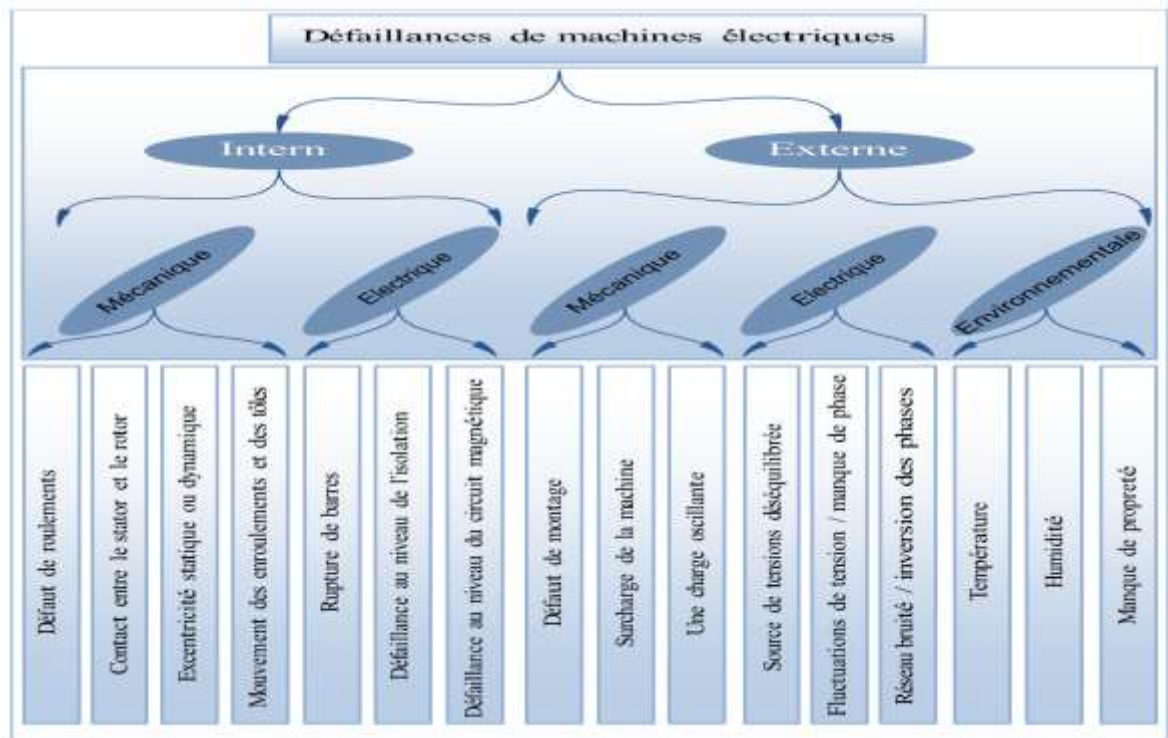


Figure I.9: défaillances de machine asynchrone

7) Analyse statistique des origines des défauts statoriques et rotoriques

Les origines des défaillances statoriques sont principalement dues à un problème : thermique (surcharge sur l'arbre du moteur); électrique (diélectrique, bobinage); environnemental (agression). Par ailleurs, pour le rotor, les effets sont essentiellement dus à un problème :[4]

1. Thermique (surcharge)
2. Electromagnétique (force)
3. Résiduel (déformation)
4. Dynamique (arbre de transmission)
5. Mécanique (roulement)
6. Environnemental (agression).

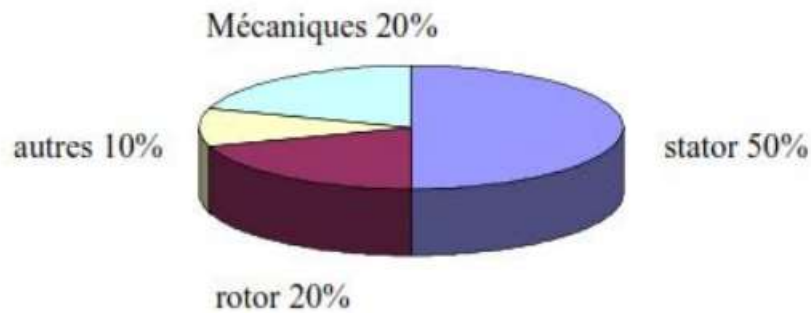


Figure I.10 : Défauts de la machine asynchrone en pourcentage [4]

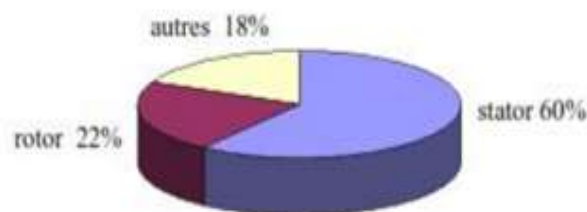


Figure I.11 : Répartition des types de défauts des machines asynchrones de moyenne puissance [4]

8) Le comportement de la machine asynchrone à rotor bobiné a des défauts

suivants :

1. Coupure d'une phase statorique ;
2. Coupure de deux phases statoriques ;
3. Coupure d'une phase rotorique ;
4. Coupure de deux phases rotoriques. [4]

9) Défauts statoriques ;

9.1) Court-circuit entre phases statorique

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-

circuits proche et du neutre entre deux phases engendrent un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [6]

9.2) Un court-circuit entre spires de la même phase

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée. Une légère variation de l'amplitude sur les autres phases modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage. De ce fait, une dégradation accélérée des isolants, peut provoquer, ainsi, un défaut en cascade (apparition d'un 2ème court-circuit). Cependant le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste, sensiblement, identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [7].

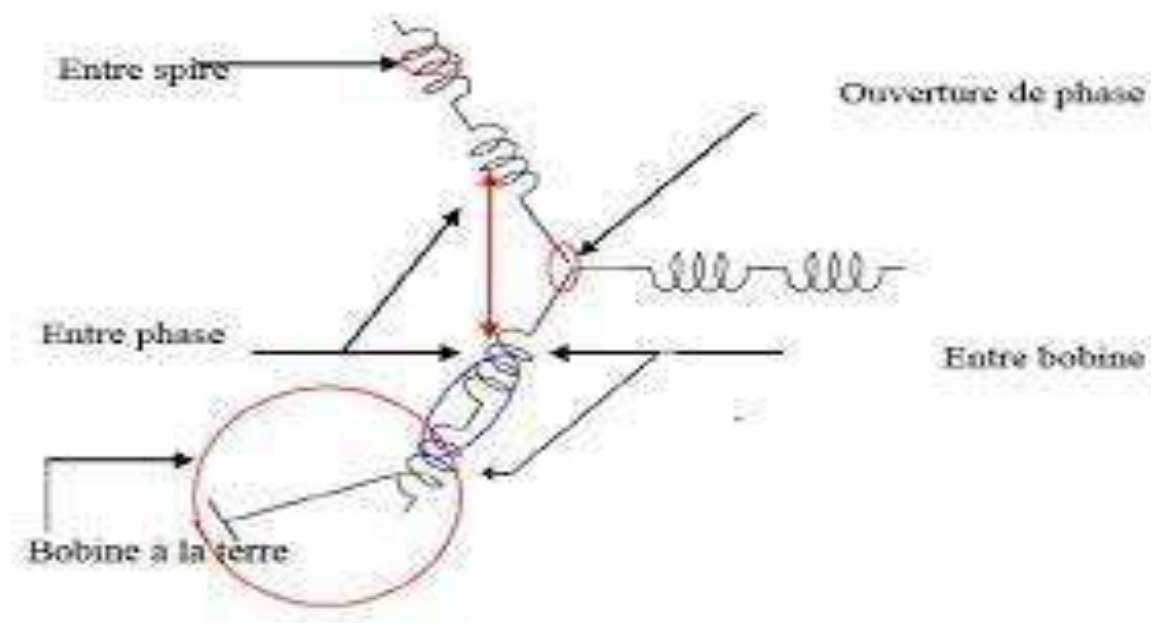


Figure I.12 : Représentation des différents défauts statorique possibles

9.3) Défaut d'ouverture d'une phase :

L'ouverture d'une phase statorique ou bien rotorique pourrait être causée par l'absence d'une phase d'alimentation dans le réseau, une erreur de montage de la machine, détérioration d'un composant électrique raccordé en série etc., ce défaut provoque une augmentation de l'amplitude de couple et les courants des autres phases même les phases rotoriques, et des fortes oscillations niveau du couple et la vitesse, Ce défaut est moins grave par rapport au défaut de court-circuit. [8]

10) Défauts rotoriques :

10.1) Cassure de barres

Une cassure d'une barre peut être totale ou bien partielle. Partant de la structure multi-enroulements, la cassure partielle d'une barre est souvent modélisée par élévation de sa résistance à des taux reflétant le degré de sévérité voulu. Une cassure totale se traduit par l'annulation complète de la branche équivalente dans la structure multi-enroulements diminuant ainsi le nombre de mailles rotoriques à flux radiaux à $(Nb-1)$. Les mailles résultantes ne sont plus identiques ce qui impose une restructuration du modèle d'état.

Une forte augmentation de la résistance des barres rotoriques peut aussi modéliser leur cassure totale



Figure I.13 : Photo d'une barre cassée

10. 2) Rupture d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. [6]

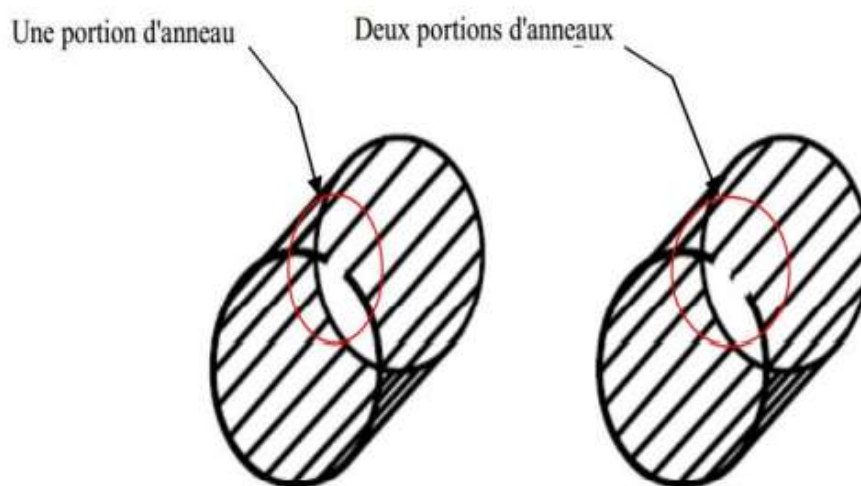


Figure I.14 : Rupture d'un anneau

10.3) Défaut d'excentricité :

Il existe deux types de défauts d'excentricité associés aux moteurs à induction : l'excentricité statique et l'excentricité dynamique. Quand l'excentricité est statique, l'épaisseur d'entrefer entre le stator et le rotor varie, mais la position de l'entrefer minimum reste fixe.

L'excentricité dynamique (DE) existe lorsque l'axe de rotation coïncide avec l'axe du stator mais pas avec l'axe du rotor, l'emplacement de l'entrefer minimum change alors avec la position angulaire du rotor et tourne avec lui. Pour l'excentricité mixte (ME), les deux défauts (SE) et (DE) sont présents en même temps et l'axe de rotation est différent des deux axes du stator et du rotor. [9]

10.3.1) Excentricité statique

Peut-être causée par des défauts de fabrication du noyau du stator (c'est-à-dire de forme ovale) et les problèmes d'installation, où le rotor peut ne pas être monté exactement dans le centre du stator. [9]

10.3.2) Excentricité Dynamique

Peut-être causée par des défauts de fabrication du rotor, où le diamètre du rotor n'est pas concentrique avec le centre de l'arbre, et les problèmes de roulement, où il pourrait y avoir un mouvement radial dans le roulement dû à des défauts d'usure ou de fabrication. Quand l'excentricité est dynamique, la différence d'entrefer entre le stator et le rotor varie mais la position de l'entrefer minimum tourne avec le rotor [9]

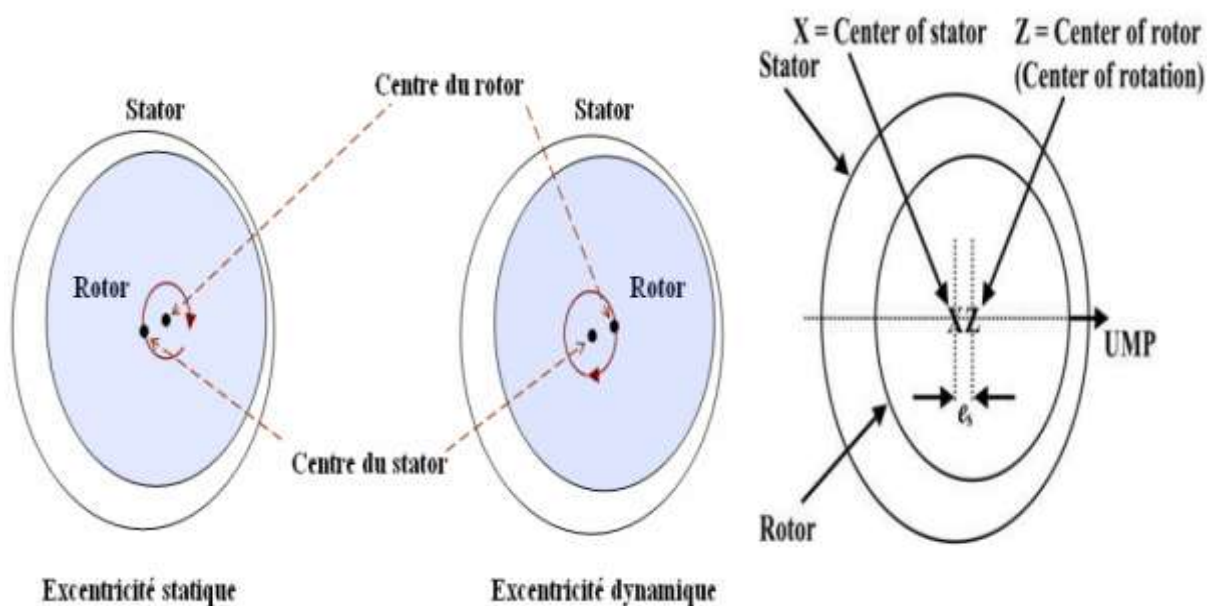


Figure I.15: Défauts d'excentricité

10.3.3) Excentricité mixte

En présence d'excentricités statique et dynamique, c'est à dire une excentricité mixte, il y aura une apparition des harmoniques de basses fréquences (F_m) et de la fréquence de la fondamentale donnée par la relation ci-dessous : [9]

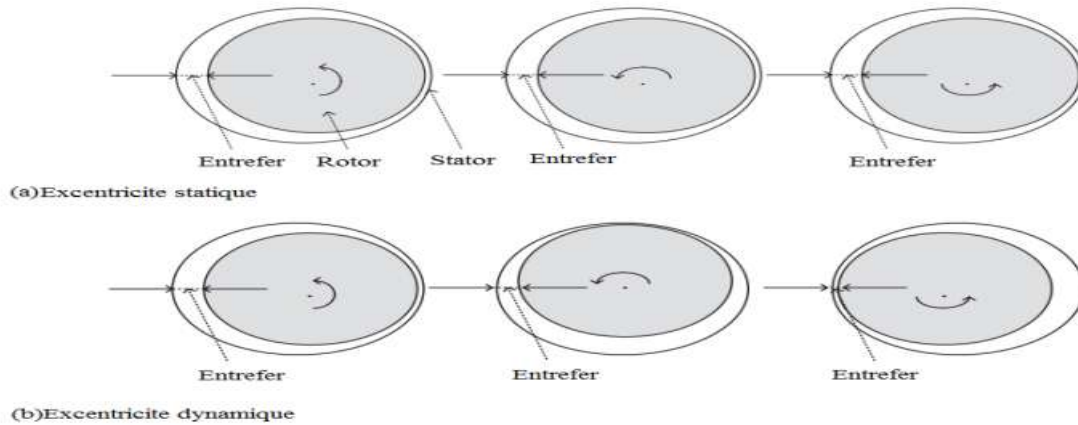


Figure I.16: Défauts d'excentricité (statique, dynamique)

10.4) Défauts de roulement

Les défauts de roulement se manifestent comme des défauts d'asymétrie au rotor, qui sont usuellement rangés dans la catégorie des défauts relatifs à l'excentricité. Les roulements sont constitués de 4 éléments : Une bague externe, une bague interne et une rangée de billes gardées par une cage. Parce que les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiaux entre le rotor et le stator dans le machin [10]

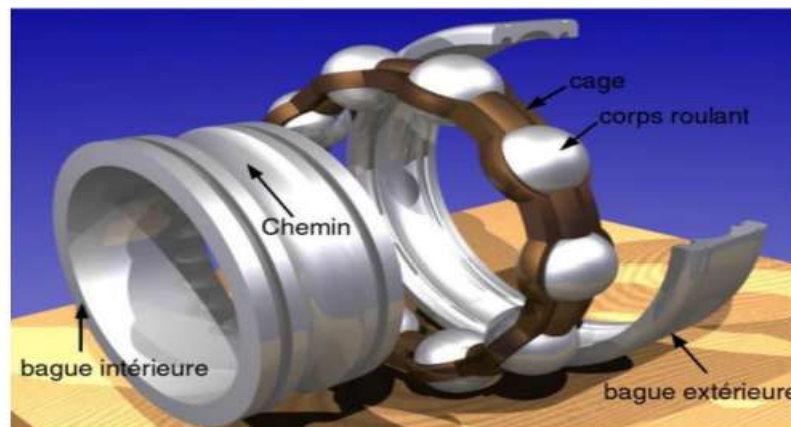


Figure I.17: Défauts de roulement

Les défauts de roulements sont généralement détectés en analysant l'amplitude des composants de la fréquence de défaut de roulement, pendant le fonctionnement en régime permanent, où les amplitudes des composants ont tendance à augmenter à mesure que la gravité de défaut augmente.

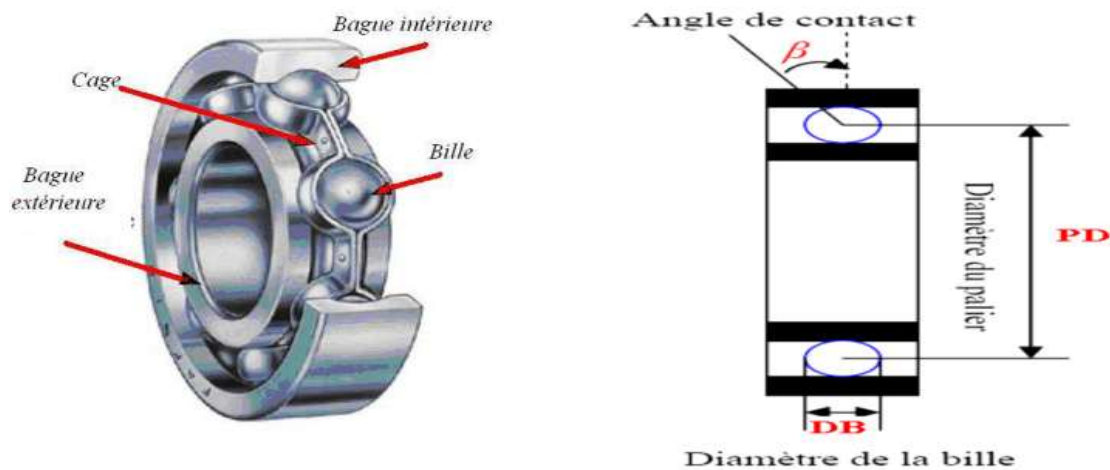


Figure I.18: Structure d'un roulement à billes

10.4.1) Les causes de dégradation de roulements :

1. Usure normale,
2. Surcharge,
3. Défaut de graissage,
4. Défaut de montage,
5. Agents extérieurs, ...

La dégradation d'un roulement (plus de 60 /°) de défauts dans les machines tournantes se traduit généralement par un écaillage des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée. [10]

10.4.2) Processus de dégradation d'un roulement

- 1) Lorsqu'un roulement tourne, les contacts métalliques entre les éléments roulants et les cages émettent des bruits de fond aléatoires. Ce bruit de fond crée un spectre plat [10]

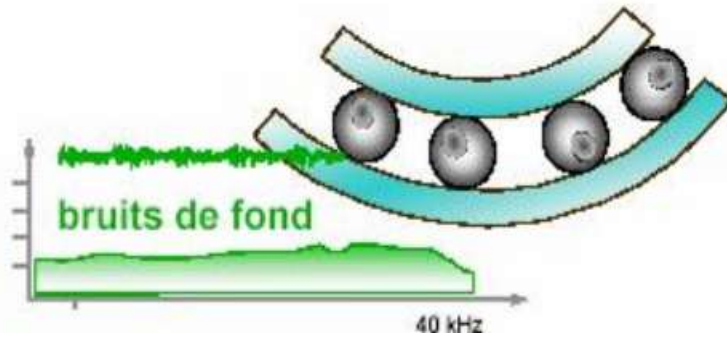


Figure I.19: bruit de fond

2) La plupart des usures de roulements débutent par une fêlure qui se transforme en craquelure. La craquelure va produire des impacts énergétiques en haute fréquence.

[10]

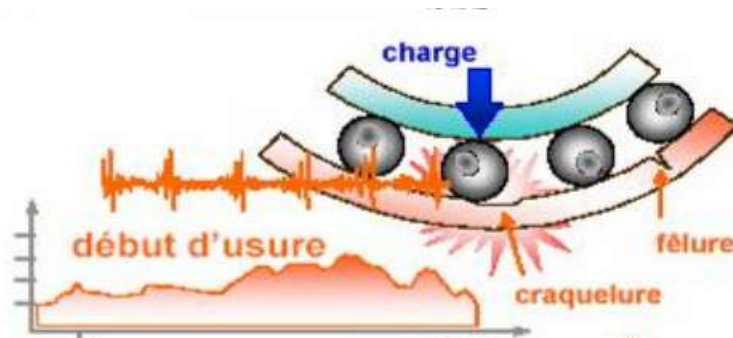


Figure I.20: début d'usure

3) Au fur et à mesure que l'usure progresse :

- Les défaut tendent à se lisser
- Il y a moins d'impacts ;
- Le bruit de fond de la bonne piste devient modulé ;
- Dès que le défaut est significatif, Les billes vont éroder la cage interne en sautant

[10]

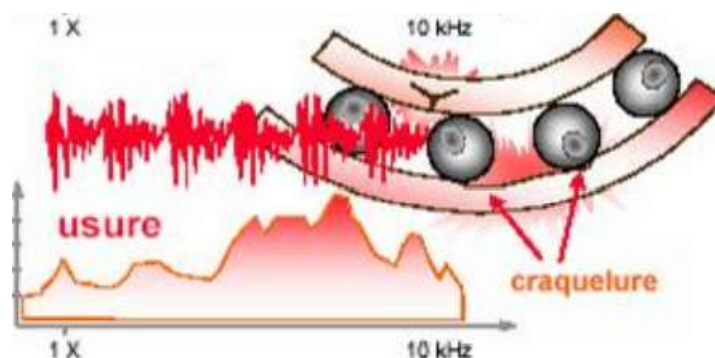


Figure I.21: l'usure progresse

10.4.3) Fréquences cinématiques des roulements :

Les défauts de roulement peuvent se manifester comme des défauts de l'asymétrie du rotor. Ils sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité, or les défauts liés aux roulements à billes peuvent se manifester aux fréquences de vibrations, tels que : [10]

1) Défaut de la bague intérieure :

Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et le contraire

$$f_{be} = \frac{f_r * N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad \text{I.1}$$

2) Défaut de la bague extérieure :

C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement. Elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (Bague extérieure tournante)

$$f_{bi} = \frac{f_r * N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad \text{I.2}$$

3) Défaut de la cage :

Elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, afin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad \text{I.3}$$

4) Défaut de la bille :

$$f_{bille} = \frac{f_r * D_m}{2 * D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \quad \text{I.4}$$

Avec :

f_r : la fréquence de rotation de la machine ;

N_b : le nombre de billes ;

D_b : le diamètre de la bille ;

Dm : la distance entre les centres des billes diamétralement opposées ; [10]

11) Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les éléments de constitution du moteur asynchrone et le principe de fonctionnement de la machine. On a présenté aussi les différents défauts qui peuvent affecter les différents défauts de la machine (court-circuit, rupture ou cassures des barres et anneau et excentricité rotorique...), ainsi que les causes et les conséquences des défauts

Le chapitre suivant sera consacré au dé généraliste sur la maintenance conditionnelle

Chapitre II

1) Introduction

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels

2) Définition La maintenance :

La maintenance est définie comme étant « toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management. ». Maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel, pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations avec un coût global optimum. La figure représente le diagramme des différents concepts de maintenance et les évènements associés. [11]

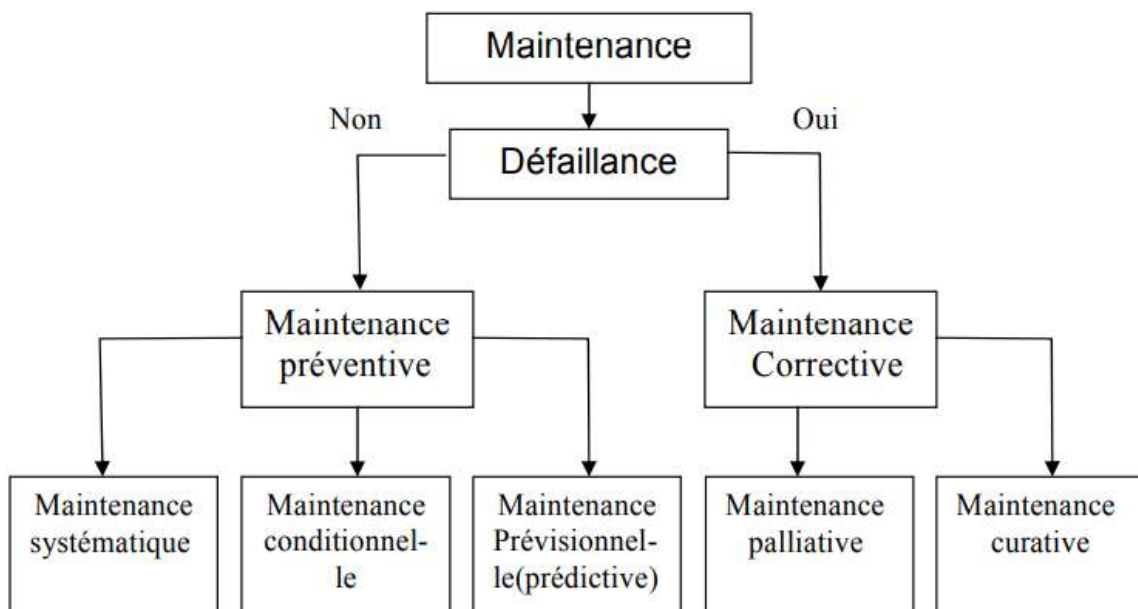


Figure II.1: Diagramme des différents concepts de maintenance

3) Rôle de la maintenance :

Le rôle de la fonction maintenance et du dépannage dans une entreprise (quel que soit son type et son secteur d'activité) est donc de garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué. Pour atteindre ces objectifs, la politique de maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie oblige de suivre les points suivants : [12]

3.1) Le service maintenance (ou « dépannage ») intervient principalement en cas de Problème :

- 1. Il dépanne en urgence.*
- 2. Il répare en atelier.*
- 3. Il effectue l'entretien quotidien des matériels.*

3.2) Le service maintenance (ou « dépannage ») est là pour éviter les pannes et les ralentissements de production :

Les interventions en urgence engendrant de coûteux arrêts de production, on met en place des procédures de prévention (d'évitement) systématiques des pannes majeures.

3.3) Le service maintenance (ou « dépannage ») doit générer des profits :

Le service maintenance évite des pannes : il fait donc gagner de l'argent. Mais il coûte aussi : salaires, matériels de maintenance, stock de pièces de rechange, arrêt de production pour la maintenance préventive.

3.4) Le service maintenance (ou « dépannage ») est en concurrence avec les sous-traitants maintenanciers :

Après avoir fait la preuve de sa rentabilité, le service maintenance doit faire preuve de plus de rentabilité que si on avait recours à des sociétés spécialisées dans la maintenance.

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré

d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations.

La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- 1) Prévisions à long terme : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.*
- 2) Prévisions à moyen terme : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels. [12]*

4) Objectif de la maintenance :

L'objectif principal de la maintenance devrait être d'assurer le fonctionnement du système d'équipements de production. En outre, l'entretien devrait fournir les bons paramètres :

Coût, fiabilité, maintenabilité et la productivité, pour tout système de fabrication automatisé.

Coetzee (2004) partage cette opinion sur l'objectif de l'entretien, indiquant que : « Il est la tâche de la fonction de maintenance pour soutenir le processus de production avec des niveaux adéquats de disponibilité, de fiabilité et de fonctionnement à un coût acceptable ».

Diverses approches pour effectuer l'entretien existent. En outre, diverses définitions de l'entretien ont été proposées au fil des années, le point commun étant qu'ils se sont éloignés de la perception traditionnelle de l'entretien pour réparer les objets cassés. L'entretien selon l'ISO est défini comme : « La combinaison de toutes les actions techniques, administratives et organisationnelles au cours du cycle de vie d'un actif, lui permettant de conserver ou de récupérer un état de fonctionnement spécifié » [15]

5) LE SERVICE MAINTENANCE AU SEIN DE L'ENTREPRISE :

5.1) SITUATION DANS L'ENTREPRISE : [13]

Il existe 2 tendances :

1) La centralisation

Toute la maintenance est assurée par un service

2) Les avantages :

- 1) *Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication,*
- 2) *Possibilité d'investir dans des matériels onéreux grâce au regroupement,*
- 3) *Vision globale de l'état du parc des matériels à gérer,*
- 4) *Gestion plus aisée et plus souple des moyens en personnels,*
- 5) *Rationalisation des moyens matériels et optimisation de leur usage (amort*
- 6) *Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles,*
- 7) *Communication simplifiée avec les autres services grâce à sa situation centralisée [13]*

3) La décentralisation :

La maintenance est confiée à plusieurs services, de dimension proportionnellement plus modeste, et liés à chacun des services de l'entreprise.

Dans ce cas, le service maintenance n'a pas de direction unique. Les différents pôles maintenance adjoints aux autres services de l'entreprise dépendent bien souvent hiérarchiquement de ces derniers. Les avantages sont : [13]

- 1) *Meilleures communications et relations avec le service responsable et utilisateur du parc à maintenir,*
- 2) *Effectifs moins importants dans les différentes antennes,*
- 3) *Réactivité accrue face à un problème,*
- 4) *Meilleure connaissance des matériels,*
- 5) *Gestion administrative allégée.*

6) Mission du service maintenance :

- Variété des actions qui constituent souvent le quotidien de la mission d'un service maintenance :

- 1) *Maintenance préventive et corrective de tous les systèmes dont le service a la charge ainsi que toutes les opérations de révisions, contrôles, etc...*

- 2) *Travaux d'installation et de mise en route de matériels neufs ;*
- 3) *Travaux directement liés aux conditions de travail : sécurité, hygiène, environnement, pollution ;*
- 4) *Amélioration, reconstruction et modernisation des installations ;*
- 5) *Gestion des pièces de rechange, des outillages et des moyens de transport et de manutention*
- 6) *Fabrication de certaines pièces détachées ;*
- 7) *Travaux divers dans les locaux de l'entreprise, agrandissements, déménagements ;*
- 8) *Gestion des différentes énergies et des réseaux de communication. [10]*

7) Organisation du service maintenance [14] :

Deux types d'organisation peuvent être mises en place selon la spécificité et la taille de l'entreprise :

7.1) Maintenance centralisée :

Ce type d'organisation prévoit la centralisation de toutes les activités de maintenance sous forme d'une seule entité. Cette entité gère la maintenance globale de toute l'entreprise (ateliers et secteurs). Parmi les avantages de ce type d'organisation on peut citer :

- 1) *facilité de planning*
- 2) *facilité de surveillance*
- 3) *magasins bien équipés*
- 4) *contrôle effectif de la main-d'œuvre*

7.2) Maintenance décentralisée :

Chaque secteur d'activité a son atelier sectoriel de maintenance comme caractéristique de ce type d'organisation, on trouve :

- 1) *service rapide*
- 2) *connaissances spécialisées*
- 3) *une prise en charge de chaque installation*
- 4) *moins de paperasse*
- 5) *les frais réels de maintenance par poste de travail. [14]*

8) Les types de maintenance :

En se concentrant sur « ... la conserver, ou restaurer à ... » dans la définition de l'entretien, il devient évident que l'on peut effectuer l'entretien en deux types principaux : la maintenance corrective et la maintenance préventive (voir Figure I.)

Les deux types d'entretien traditionnels sont largement utilisés dans pratiquement tous les secteurs industriels [16].

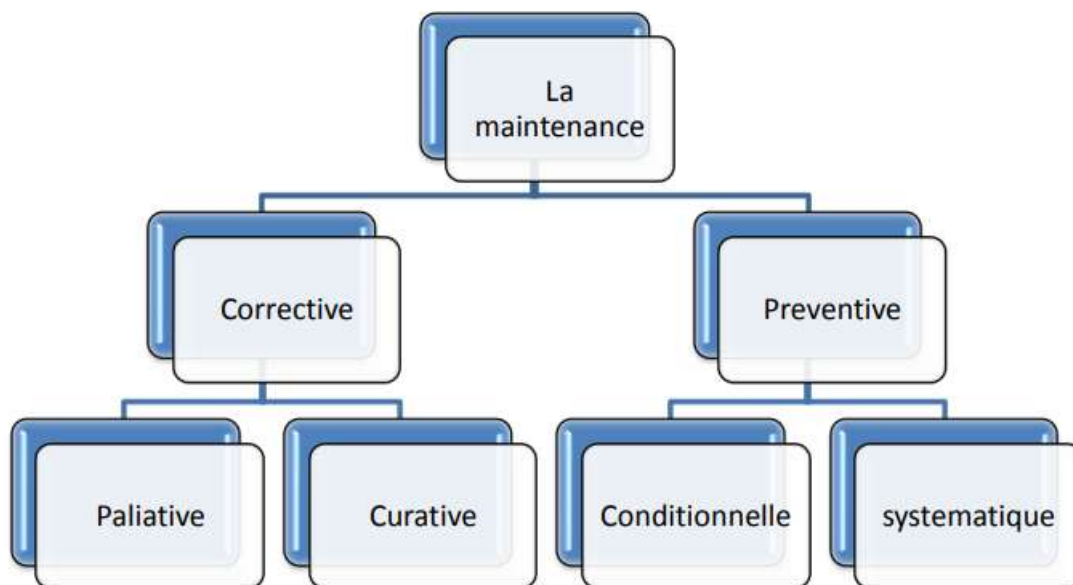


Figure II.2 : vue d'ensemble des différents types de maintenance.

8.1) La maintenance corrective :

Semblable à des travaux de réparation, est entreprise après une panne ou lorsque la défaillance évidente a été localisée. Selon la norme (SS-EN 13306), la maintenance corrective est définie comme suit : « Entretien effectué après la reconnaissance de la faute et destiné à mettre un élément dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. ». Pour les travaux de réparation, certaines approches de modélisation sont disponibles. Avec la réparation minimale, l'élément défaillant n'est restauré à son état de fonctionnement et l'élément continue comme si rien n'est arrivé. La probabilité d'une défaillance (le taux d'échec) reste le même qu'il était juste avant l'échec. En utilisant l'approche de réparation minimale signifie que l'élément n'est rendu à un « aussi mauvais que vieux » condition, La réparation minimale peut être exécutée pour diverses raisons, comme le manque de temps, les

pièces de rechange, la compétence, etc. Si l'article est à la place remplacée par un nouveau composant du même type, ou si elle est restaurée à un état « aussi bon que neuf », le taux d'échec diminue au niveau du moment où l'élément vient d'être mis en service. On appelle cela un processus de renouvellement ou parfois une réparation maximale. Ces types de réparations sont les extrêmes de travail de réparation [17].

En cas de panne sur les fonctions critiques, la maintenance corrective doit être effectuée immédiatement. Cependant, pour les échecs qui n'ont pas ou peu de conséquences sur le fonctionnement du système complet, la maintenance peut être différée dans le temps à une occasion mieux adaptée. Cependant, signifie que la maintenance corrective à son meilleur ne doit être utilisé que sur les zones non critiques où les coûts d'investissement sont faibles, les conséquences de l'échec sont faibles, aucun risque de sécurité sont immédiats, et l'identification de l'échec rapide et réparation d'une défaillance rapide sont possibles, signifie également que les entreprises par défaut adoptent souvent la maintenance corrective inappropriée, ce qui à long terme peut devenir coûteux. La maintenance corrective est parfois appelée : L'entretien routier [16], l'entretien entraîné l'échec, l'entretien à base d'échec, et la gestion à l'échec d'entretien [15]

8.1.1) Les types de maintenance corrective :

1) La maintenance corrective curative :

Cette dernière a pour but la réparation complète de l'installation (ou de la machine) à la suite d'identification du problème sans perturbation du processus ou de l'utilisation du système rattaché à cette machine. Par exemple un moteur d'essuie-glace de voiture cassé n'empêchera pas celle-ci de rouler. Une maintenance curative visera à remplacer le moteur défaillant par un moteur neuf afin de résoudre définitivement le problème. En milieu industriel, il pourrait s'agir d'un dépoussiéreur dont le débit d'aspiration se verrait réduit à cause du colmatage des filtres. Cela n'empêchera en rien le processus, il risque juste d'y avoir plus de poussière et de dépôts dû au manque d'aspiration. La maintenance corrective curative consisterait à remplacer les filtres à manche afin de redonner à la machine sa dépression initiale dans le but de remplir sa tâche à 100%. [18]

2) La maintenance corrective palliative :

La maintenance corrective palliative intervient lorsqu'un problème important ou bloquant, a été identifié. Ici, l'objectif est de réparer provisoirement le défaut afin de rétablir l'utilisation du matériel avant une maintenance curative ou une maintenance préventive. Un tuyau d'arrosage qui fuit à cause d'un trou et réduisant fortement le débit d'eau se verrait réparé provisoirement par l'enroulement d'adhésif autour de la fuite dans le but de pallier le problème sur le moment. Afin d'éviter tout risque futur d'une nouvelle fuite, la maintenance curative ou préventive à réaliser serait de remplacer le tuyau ou réduire sa longueur jusqu'à la fuite dans le but d'obtenir un tuyau parfaitement étanche. Dans l'industrie, un convoyeur à bande dont la bande serait déchirée empêcherait toute utilisation de ce dernier. La solution serait dans un premier temps de ré-agrafer provisoirement la bande pour pouvoir réutiliser le convoyeur. Dans un second temps, lors d'une opération de maintenance curative permettra de corriger définitivement le problème par le changement complet de la bande ou une réparation par vulcanisation de celle-ci. La détection du symptôme peut être suffisante dans une démarche de maintenance palliative, mais le diagnostic est indispensable à toute action de maintenance corrective. [18]

8.2) La maintenance préventive :

La maintenance préventive a été définie comme : « Maintenance effectuée à des intervalles prédéterminés ou en fonction de critères prescrits et destiné à réduire la probabilité de défaillance ou de la dégradation du fonctionnement d'un élément. ». La maintenance préventive est divisée en deux types, maintenance systématique et maintenance conditionnelle. Maintenance systématique est planifiée et organisé sans l'apparition de toutes les activités de surveillance. La programmation peut être basée sur le nombre d'heures d'utilisation, le nombre de fois qu'un élément a été utilisé ; le nombre de kilomètres les articles a été utilisés, selon les dates prescrites, et ainsi de suite. L'entretien est mieux adapté systématique à un élément qui a un âge visible ou USURE caractéristique et où les tâches de maintenance peuvent être effectuées à un moment qui est sûr empêchera un échec de se produire [16]

Les buts de la maintenance préventive, sont [19] :

- 1. Augmenter la durée de vie des matériels ;*
- 2. Diminuer la probabilité des défaillances en service ;*

3. *Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne ;*
4. *Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective ;*
5. *Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions ;*
6. *Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant ;*
7. *Améliorer les conditions de travail du personnel de production ;*
8. *Diminuer le budget de maintenance ;*
9. *Supprimer les causes d'accidents graves ;*

8.2.1) Les types de maintenance préventive :

1) Maintenance préventive systématique :

La maintenance systématique est un type de maintenance planifiée dans le temps (graissage, lubrification, nettoyage, dépoussiérage, calibrage.....). Il s'agit là d'éviter les causes de défaillances et de vieillissement des composantes du système. Généralement, la maintenance préventive systématique s'adresse aux éléments dont le coût des pannes est élevé, mais ne revenant pas trop cher en changement (les meilleurs exemples sont le changement systématique de l'huile, des filtres, changement de la courroie de synchronisation, des roulements, des paliers de rotation ...). À noter que dans une maintenance planifiée, le remplacement des composantes, se fait dans des échéances inférieures à leurs durées de vie, ce qui peut constituer dans d'autres conditions, une sorte de gaspillage [19]

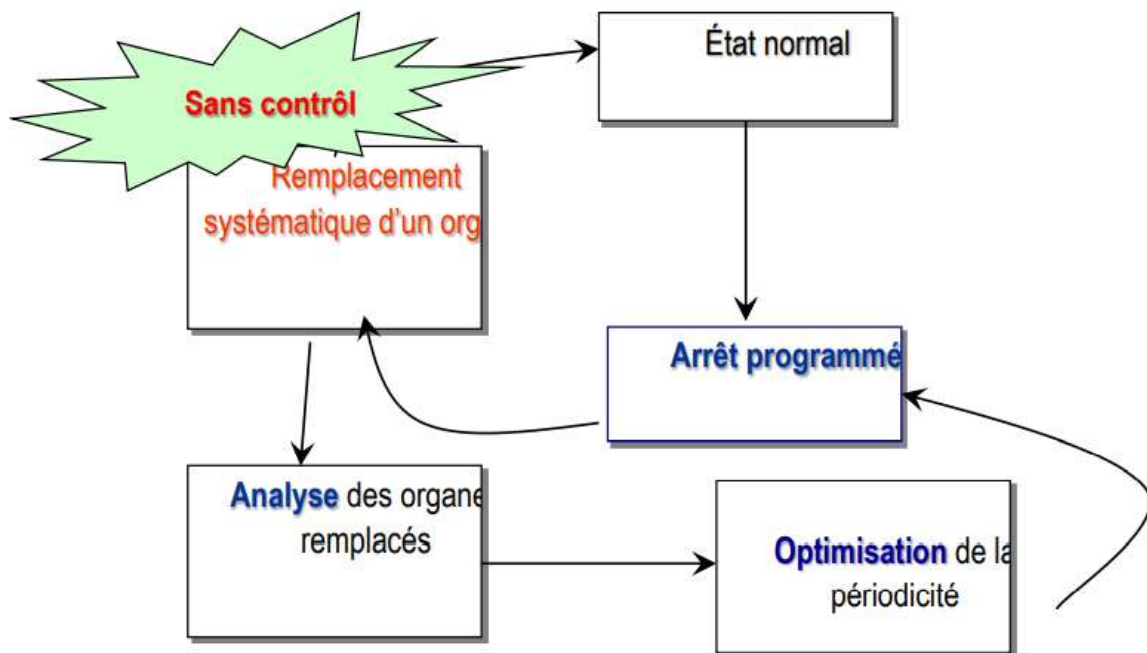


Figure II.3 : plan de travail préventive systématique

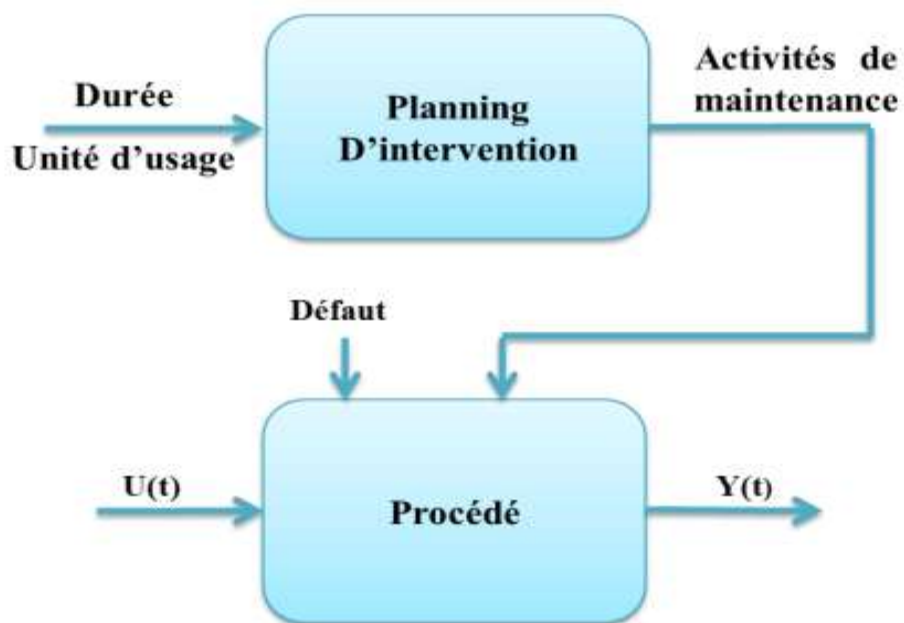


Figure II.4 : Maintenance préventive systématique

2) Maintenance préventive conditionnelle :

C'est un type de maintenance déclenché par suite d'un symptôme observable (température, vibration, jeu excessif, ...) permettant de prédire une défaillance prochaine. Il s'agit là d'intervenir juste avant que la panne ne survienne. La maintenance préventive conditionnelle est réalisée dès lors qu'une mesure dépasse une valeur précise (seuil) d'une grandeur physique (température, pression...). La maintenance préventive conditionnelle s'adresse aux pièces des machines coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillées par des méthodes non – destructives (vibration, huile, température, courant, etc.). Autrement dit, on ne change l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure affectant les performances du fonctionnement. La maintenance préventive conditionnelle nécessite une équipe de maintenance de niveau technologique plus élevé formée en méthodes du diagnostic. [19]

8.2.1) Les avantages :

- 1) *Réduction de coût et de la durée de réparation par rapport à l'entretien préventif systématique ;*
- 2) *L'accroissement de la durée de vie des pièces par rapport à une politique de changement systématique ;*
- 3) *Remplacement uniquement des pièces défectueuses ;*
- 4) *Pas de catastrophes et sécurité accrue ;*
- 5) *Planification optimisée des périodes de travail ;*
- 6) *Meilleur rendement de la production*

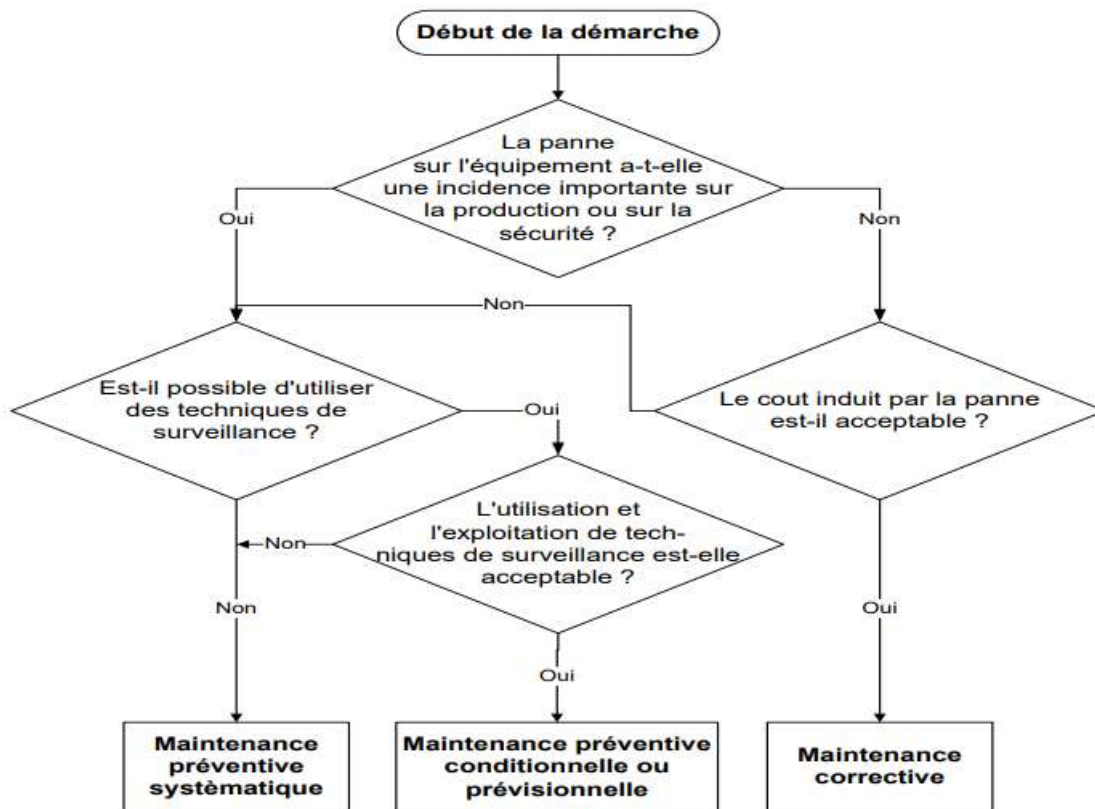


Figure II.5: début de la démarche de Maintenance

8.2.2) Objectifs de la maintenance conditionnelle :

- 1) *Éliminer ou limiter le risque de panne, l'intervention ayant lieu avant que la dégradation n'atteigne un caractère critique (et donc, ralentir le vieillissement)*
- 2) *Limiter les perturbations subies par l'utilisateur, en réalisant une meilleure préparation des interventions,*
- 3) *Réduire les dépenses de maintenance en intervenant à un stade précoce des dégradations, évitant ainsi les remises en état très coûteuses*

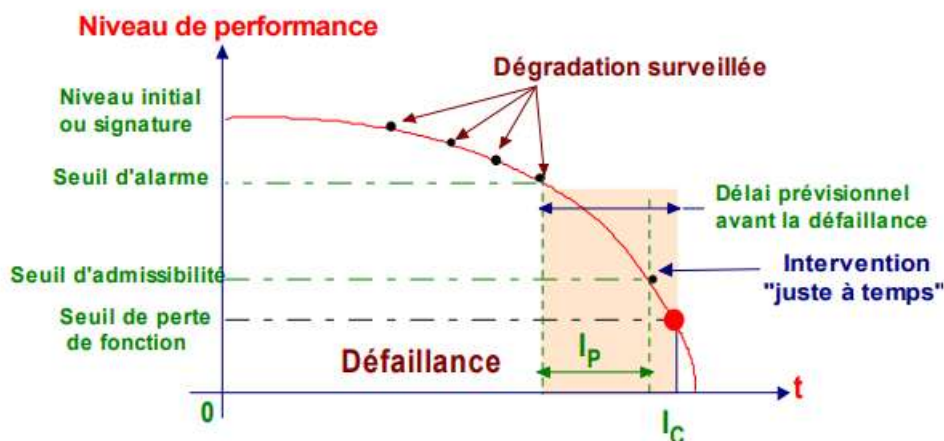


Figure II.6 : principe de la maintenance conditionnelle

8.2.3) Cas d'application : [20]

Cette méthode d'entretien ne doit pas être appliquée indistinctement à tous les équipements. Elle n'est rentable que sur du matériel en bon état, neuf ou récemment révisé, et occupant une place importante, voire stratégique, dans le processus de fabrication (c'est un équipement clé).

Il est donc inutile de l'appliquer à du matériel robuste et présentant peu de risque, à des équipements secondaires, dont les pannes ont peu de répercussion sur la production ou alors à des machines en surnombre susceptibles d'être relevées en cas de défaillance. La méthodologie de mise en œuvre réside en neuf points :

- 1) Sélection de la défaillance à anticiper ;
- 2) Sélection d'un ou plusieurs paramètres significatifs de la défaillance sélectionnée ;
- 3) Choix des capteurs ;
- 4) Choix du mode de collecte des informations (manuellement à l'automatiquement) ;
attention au snobisme de la télésurveillance, car rien ne remplace l'homme (« l'homme et un capteur » disent souvent les japonais !)
- 5) Détermination des seuils d'alarme et d'admissibilité ;
- 6) Choix du mode de traitement de l'information, et donc de la génération des alarmes ;
- 7) Définition des procédures après alarmes ;
- 8) Organisation de l'intervention préventive ;
- 9) Retour d'expérience, validation du processus de surveillance, optimisation des seuils.

8.2.4) Organisation de la maintenance conditionnelle :

Dans la (figure) on définit l'organisation de la maintenance conditionnelle par l'organigramme suivant : [21]

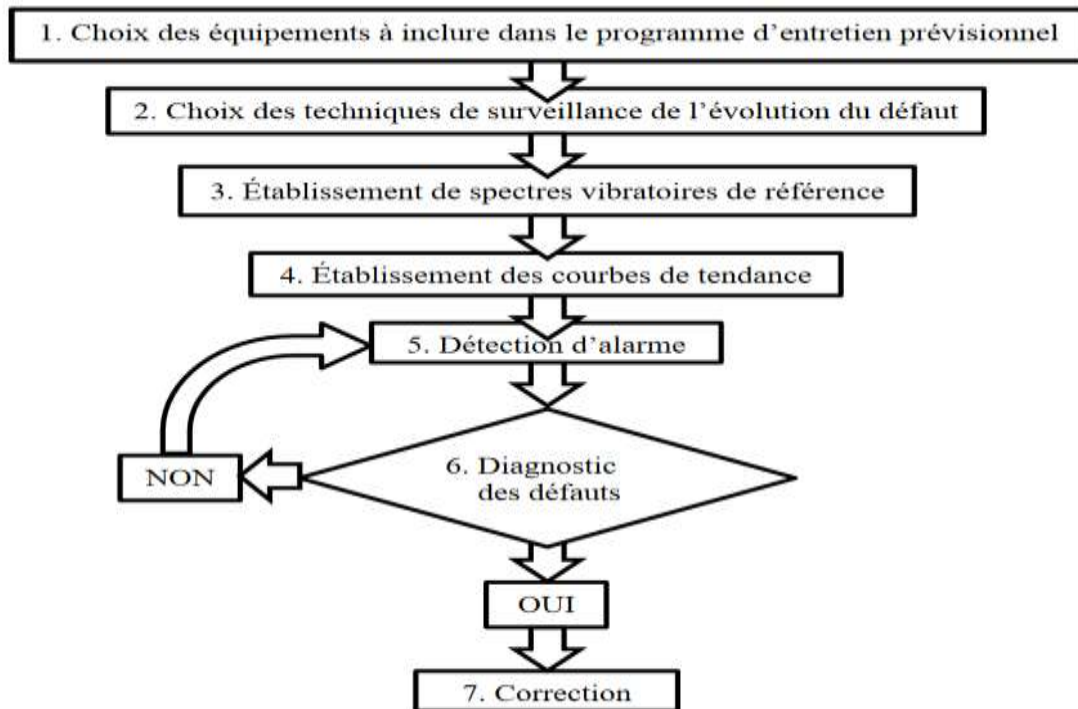


Figure II.7: Organisation de la maintenance conditionnelle

Cette étape comprend :

- 1) la codification des équipements, l'inventaire et la sélection du type d'entretien appliqué à chaque équipement.
- 2) le choix de la technique de mesure, leur périodicité, leur endroit et repérage, la création d'une route et des dossiers de suivi.
- 3) la détermination s'occupe de la détermination des alarmes.
- 4) la prise de mesure, l'enregistrement et la gestion des données vibratoires.
- 5) la vérification du seuil d'alarme.
- 6) la détermination de l'élément défaillant.
- 7) le Changement ou correction de l'élément défaillant [21]

8.2.5) Les outils des maintenances conditionnelle :

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- *Le niveau et la qualité de l'huile*
- *Les températures et les pressions*
- *La tension et l'intensité des matériels électriques*
- *Les vibrations et les jeux mécaniques, ...*

De tous les paramètres énumérés, l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. Sa compréhension autorise la prise de décisions qui sont à la base d'une surveillance est soit périodique, soit continue. Avantage : la connaissance du comportement se fait en temps réel à condition de savoir interpréter les résultats. A ce niveau, l'informatique prend une place primordiale. Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis il est rentabilisé rapidement. Cette méthode de maintenance, pour être efficace, doit dans tous cas être comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel. Ces méthodes doivent être dans la mesure du possible standardisées entre les différents secteurs (production et périphériques) ; ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel. Avec l'évolution actuelle des matériels et leurs tendances à être de plus en plus fiables, la proportion des pannes accidentelles sera mieux maîtrisée. La maintenance préventive diminuera quantitativement d'une façon systématique mais s'améliorera qualitativement par la maintenance conditionnelle [22]

1) Mesure de la température [20]

Grâce aux techniques de thermographie infrarouge ; ces techniques permettent de mesurer les luminances, d'établir une cartographie (zones isothermes) et de suivre son évolution dans le temps. En maintenance, il ne s'agit pas de connaître avec la plus grande précision la température absolue d'un point, mais plutôt d'identifier les zones thermiques anormales et de quantifier l'urgence d'intervention :

- Détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous-dimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d'un palier),
- Détection des ponts thermiques et donc d'absence d'isolation thermique pouvant être néfaste au composant électronique sensible voisin,
- Détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations, etc.

Par analogie avec la médecine, faire de la thermographie infrarouge, c'est comme prendre sa température. [20]

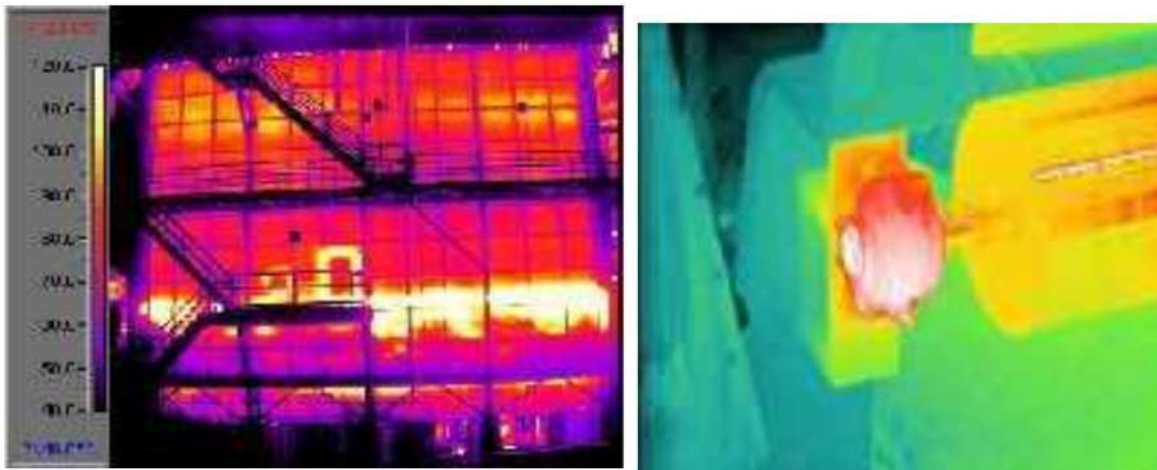


Figure II.8 : Cartographie thermique d'un bâtiment Figure II.9 : Défaut sur un palie

2) Mesure des vibrations (niveau, fréquence) :

Bruits et jeux mécaniques ; toutes les machines, et particulièrement les machines tournantes, vibrent et le spectre des fréquences de leurs vibrations à un profil très particulier lorsqu'elles sont en état de bon fonctionnement.

Dès que des phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement, de désalignement, de balourd, etc. apparaissent, l'allure de ce spectre change, ce qui permet là encore, de quantifier l'intervention.

Par analogie avec la médecine, faire de l'analyse vibratoire c'est enregistrer puis dépouiller un électrocardiogramme.

L'investissement à prévoir pour ce type de mesure va de 2 kDTU (off-line) à 115 kDTU (on-line). [20]

3) Mesure des détériorations surfaciques ou interne par contrôles non destructifs : [20]

- 1) *Ultrasons pour la détection et le suivi des fissures internes : appareillage utilisant le principe des sonars, l'onde émise réfléchi sur le défaut interne donne un écho dont on peut analyser la profondeur et la forme[20]*



Figure II.10 : Mesure d'une fissure interne par ultrasons

- 2) *Ressuage pour la mise en évidence des fissures débouchâtes : il repose sur l'aptitude de certains liquides à pénétrer dans la discontinuité surfacique puis à ressortir par capillarité de celles-ci.*



a – Imprégnation du colorant



b – Rinçage



c – Application du révélateur



d – Apparition d'une fissure

Figure II.11 : Technique du ressuage

4) Mesure de la teneur en résidus des huiles et lubrifiants :

La surveillance des lubrifiants industriels consiste à mesurer l'état de dégradation et de contamination des lubrifiants pour connaître leur capacité à assurer correctement leur fonction. Les facteurs responsables de l'évolution d'un lubrifiant sont :

- la pollution par des liquides (eau, solvants),
- la pollution par des particules (poussières, matériaux plastiques, fibres, etc..) causée par le processus lui-même et son environnement.
- les particules métalliques dues à l'usure ou la corrosion provenant des composants parcourus par le lubrifiant,
- l'oxydation, en présence d'air ou d'atmosphère corrosive, surtout lorsque les variations de température sont importantes.

La quantité de particules est un indicateur précieux de l'état de dégradation d'une machine. Le type de particules indique en effet la provenance de l'usure, donc la pièce défaillante. Ces analyses peuvent être réalisées en laboratoire grâce à des kits spécifiques d'analyse :

Centrifugation, gravimétrie, [20]

9) Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la présentation des différents types de maintenance envisageables dans un environnement industriel et aux principales étapes et outils nécessaires pour la mise en place d'une démarche de surveillance et de diagnostic.

Avant de tester l'efficacité de certaines méthodes précitées et de contribuer à l'analyse des systèmes en présence de défauts, nous jugeons utile de faire une présentation des défauts mécaniques qui peuvent affecter un entraînement électrique, ce qui fait l'objet du second chapitre

Chapitre III

1) Introduction :

Depuis quelques années, un ensemble de travaux aussi bien théoriques que pratiques se sont développés sur une famille de fonctions appelées ondelettes. Ces recherches ont eu un regain d'intérêt d'une part parce qu'elles proposent des algorithmes plus efficaces pour des problèmes pratiques pour lesquelles techniques classiques avaient montré leurs limites et d'autre part parce qu'elles apportent un formalisme mathématique attrayant dans la reformulation de plusieurs problèmes dans différents domaines scientifiques. Cette reformulation entraîne de nouvelles approches, de solutions et d'interprétations bien au-delà de ce qui avait été obtenu jusqu'alors. [26] La plupart des signaux sont non stationnaires, ce qui empêche la méthode de la transformée de Fourier (FT) et la transformée de Fourier à court terme (TFCT) de pouvoir les étudier à cause de leurs limitations vers ce type de signaux. Dans ce chapitre, on va présenter une étude préliminaire sur les méthodes destinées à ce type de signaux. Elles sont les méthodes de transformée en l'ondelette (TO) ou (WT) pour « wavelet transform », la méthode de transformation en ondelettes est expliquée de façon détaillée en donnant un aperçu général sur cette méthode son historique, le principe d'utilisation, les différents types d'ondelettes, et la manière de calcul de la transformation en ondelettes continué, discrète et aussi la transforme plus important, transforme en paquet d'ondelettes.[25]

2) Grandeurs physiques d'un signal vibratoire

Un mouvement vibratoire d'un organe mécanique délivré à partir d'un accéléromètre peut être caractérisé par trois grandeurs physiques, obtenues par intégrations successives. Selon les besoins de l'utilisateur et la nature de défaut à détecter, le mouvement délivré par le capteur peut être exprimé en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération. Généralement, les grandeurs physiques sont choisies en fonction des bandes de fréquences et la nature des défauts.

3) La grandeur physique en déplacement

Ce type de grandeur est utilisée pour mettre en évidence des phénomènes en basses fréquences comme le balourd, le desserrage, les frottements. Le calcul de la valeur crête à crête en déplacement entre 10 et 1000 Hz permet de vérifier si le balourd est acceptable pour une machine tournante.

En effet, le déplacement crête à crête D_{cc} entre 10 et 1000 Hz en micron mètre est un indicateur préconisé par l'API (American Petroleum Institute). Il est utilisé par tout industriel intervenant dans la pétrochimie et est sensible aux phénomènes basses fréquences. Le niveau acceptable maximal est donné, quelle que soit la machine, par la formule suivante :

$$DCC = 25.4 \sqrt{(12000/Nr)} \quad \text{III.1}$$

N_r : vitesse de rotation (tr/min)

4) La grandeur physique en vitesse

Cette grandeur représente l'énergie dispensée par mouvement vibratoire ; elle permet d'observer des phénomènes de basses et moyennes fréquences comme le balourd et le désalignement. Elle s'avère inefficace pour les défauts en hautes fréquences tels que les roulements.

L'expression de la valeur efficace (RMS) en vitesse permet de suivre le niveau vibratoire engendré par un organe dans les machines tournantes avec les différentes catégories de la machine, dans ce contexte nous trouvons la norme NFE 90-300 (voir tableau 2.1).

| Classe IV | Classe III | Classe II | Classe I | RMS en mm/s |
|-----------|------------|-----------|----------|-------------|
| 28 | | | | D |
| 18 | | | D | D |
| 11.2 | | D | | C |
| 7.1 | D | | C | C |
| 4.5 | | C | | B |
| 2.8 | C | | B | B |
| 1.8 | | B | | A |
| 1.12 | B | | A | A |
| 0.71 | | A | | |
| 0.45 | A | | | |

Tableau III.1 : Norme NFE 90-300 utilisée pour la surveillance des machines tournantes

Classe I : Parties individuelles de moteurs et de machines, liées intégralement à la machine complétée en état de fonctionnement normal. (Les moteurs de production électrique jusqu'à 15 kW sont des exemples typiques des machines de cette catégorie).

Classe II : Machines de taille moyenne, (moteurs électriques de puissance 15 kW à 75 kW) sans assise spéciales, moteurs ou machines connectés rigidement (jusqu'à 300 kW) sur assises spéciales.

Classe III : Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises lourdes et rigides qui sont relativement raides dans le sens du mesurage des vibrations.

Classe IV : Grosses machines motrices et autres grosses machines avec masses en rotation montées sur des assises qui sont relativement souples dans le sens du mesurage des vibrations (par exemple, turbo-alternateurs et turbines à gaz avec une puissance supérieure à 10 MW), Par ailleurs, les quatre zones représentées dans le tableau sont représentatives de l'état de Santé de la machine.

Zone A : Les vibrations des machines nouvellement mises en service se placent normalement dans cette zone.

Zone B : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme acceptables pour un service de longue durée sans la moindre restriction.

Zone C : Les machines dont les vibrations se situent dans cette zone sont normalement considérées comme ne convenant pas pour un service de longue durée en continu. En général, la machine peut fonctionner dans ces conditions pendant une durée limitée, jusqu'à ce que l'occasion se présente pour prendre les mesures correctives qui s'imposent.

Zone D : Les valeurs de vibrations constatées dans cette zone sont normalement considérées comme suffisamment importantes pour endommager la machine.

5) **Les outils du diagnostic et de la surveillance par l'analyse vibratoire :**

Nous présentons dans ce paragraphe les différents outils de traitement du signal adéquats à la détection des défauts d'engrenages et de roulements par l'analyse vibratoire. De nombreux travaux ont été réalisés dans l'objectif de déterminer la signature de défauts isolés d'engrenages ou de roulements sur les signaux d'accélération. Ils ont permis de développer et définir les principaux outils de traitement de mesures adaptés pour le suivi de comportement des machines tournantes. Il s'agit de décrire les outils principalement disponibles, tels que l'analyse spectrale, l'analyse du signal enveloppe, pour les méthodes fréquentielles et les outils statistiques tels que les indicateurs scalaires pour les méthodes temporelles. [28]

6) **Rappel des indicateurs scalaire :**

Une définition concise des indicateurs scalaire a été donnée par Boulenger [23] :

Les indicateurs scalaires associent à un signale, le plus souvent observé sous sa forme temporelle en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou scalaire, Plusieurs indicateur sont utilisé dans la maintenance conditionnelle des machine tournantes :

La valeur efficace ou RMS, la valeur crête ou une combinaison de ces deux paramètres représentés par le kurtosis et le facture de crête

A partir de cette définition plusieurs points peuvent être dégagés :

- 1. Les indicateurs scalaires sont calculés à partir d'un signal temporel, la grandeur représentative de ce signal doit être minutieusement choisie.*
- 2. La durée d'analyse doit être suffisamment grande pour contenir l'information re- cherchée. Selon Boulenger : elle doit contenir au minimum plusieurs dizaines de tours ou plusieurs périodes de répétition des forces impulsives induites par le défaut.*
- 3. Un indicateur scalaire est un nombre, donc sa valeur doit être significative d'un état de dégradation du système ou au moins comparable à des valeurs de référence.*

Le diagnostic des machines tournantes par les indicateurs statistiques temporels est l'une des techniques les plus faciles, les plus simples et les moins couteuses, car leur utilisation permet de contrôler et de suivre l'aggravation du défaut.

Un indicateur temporel est un nombre scalaire, représentatif du mouvement vibratoire d'un organe mécanique en accélération, en vitesse, en déplacement. Il est, de ce fait, plus important de suivre son évolution dans le temps. Car son suivi fournit des informations non seulement sur la gravité de défaut, mais également sur les décisions stratégiques relatives à tout remplacement immédiat de la pièce endommagée.

Les indicateurs temporels fréquemment utilisés dans les diagnostics industriels sont les suivants : peak, RMS, kurtosis (Ku), facteur de crête (CF), facteur de forme (SF) et facteur d'impulsion (IF)

Nous donnons ci-après la définition de tous les indicateurs utilisés dans la présente étude.

6.1) La valeur efficace ou le RMS (Root Mean Square)

L'approche la plus simple de l'utilisation des indicateurs scalaires consiste à calculer la valeur efficace, appelée encore RMS (Root Mean Square).

Pour un signal $x(t)$ le RMS est donné par :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad III.2$$

Où : x_i est l'amplitude de l'accélération du signal de l'échantillon i et N est le nombre d'échantillons du signal.

6.2) Valeur crête (Peak) :

La valeur crête, qui représente la valeur maximale du signal, est très utilisée dans le suivi vibratoire des machines tournantes, car une augmentation de cette grandeur, donc de l'énergie vibratoire, est signe d'une éventuelle dégradation. La valeur crête est donnée par :

$$A_C = \sup_{1 \leq i \leq N} |x_i| \quad III.3$$

6.3) Valeur moyenne :

La valeur moyenne est calculée à partir de la moyenne des amplitudes du signal ; elle est donnée par :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad III.4$$

Contrairement à la valeur efficace et valeur crête d'un signal, il y a des indicateurs spécifiques aux roulements comme le facteur de crête et le Kurtosis qui sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles telles que les écaillages de roulements. Le principal avantage de ces indicateurs réside dans le fait qu'ils ne tiennent pas compte de l'historique.

6.4) Le Kurtosis

Le paramètre de kurtosis a été introduit pour la première fois par le mathématicien Britannique Pearson en 1905, pour comparer entre une distribution quelconque et la distribution Gaussienne ou normale.

Il représente le taux d'aplatissement de la distribution d'amplitude d'un signal. Pour une distribution normale ou gaussienne les valeurs du Kurtosis mesurées sont inférieures à 3. Pour un signal ayant un Kurtosis > 3 , généralement il est caractéristique de la présence de chocs répétés, c'est le cas d'un défaut d'engrenage ou de roulement.

Le Kurtosis est le rapport entre le moment d'ordre 4 et le moment d'ordre 2 au carré d'un signal. Il a l'avantage d'être indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine. Mathématiquement le kurtosis d'un signal $x(t)$ est considéré comme étant une normalisation du moment statistique d'ordre quatre, il est égal au rapport entre ce même moment et celui d'ordre deux au carré, soit :

$$Ku = \frac{M_4 x(t)}{M_2 x(t)^2} \quad III.5$$

Où M_4 et M_2 représentent respectivement le moment statistique d'ordre quatre et deux (appelé encore écart type). Plus explicitement le kurtosis est donné par :

$$Ku = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad III.6$$

x_i : est le signal temporel en accélération.

\bar{x} : est la valeur moyenne des amplitudes.

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

6.5) Skewness

Le skewness (skew) est basé sur le moment d'ordre 3, défini par la formule, Cet indicateur donne une mesure de l'asymétrie du signal par rapport à sa valeur

moyenne, d'où son efficacité pour la détection de tout changement de cette caractéristique.

$$Skew = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad \text{III.7}$$

6.6) Le Facteur de crête (Crest Factor CF) :

Mathématiquement le facteur de crête d'un signal $x(t)$ correspond au rapport entre sa valeur crête et le RMS, de ce fait il est exprimé par :

$$Cf = \text{Peak/RMS} \quad \text{III.8}$$

6.7) Factor de forme (The Shape Factor SF):

Le facteur d'impulsion (IF) et le facteur de crête (CF) sont sensibles à la gravité du défaut par contre, le facteur de forme (SF) ne l'est pas. Il est donné par:

$$SF = \frac{RMS}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|} \quad \text{III.9}$$

6.8) TALAF

L'indicateur TALAF est défini par la formule

$$TALAF = \log \left(ku + \frac{RMS}{RMS0} \right) \quad \text{III.10}$$

Où $RMS0$ est la valeur quadratique moyenne définie pour un roulement sain.

Si la valeur moyenne quadratique initiale $RMS0$ n'est pas connue ou n'a pas été enregistrée, la méthode peut fonctionner en considérant toute valeur initiale qui peut être obtenue au début de la surveillance.

Cette valeur étant une constante, elle n'a aucune influence sur la pente de Talaf mais uniquement sur son amplitude.

Lorsque le paramètre TALAF est tracé comme illustré à la figure 1, les données de toutes les simulations superposées pour donner une courbe de dégradation en quatre étapes.

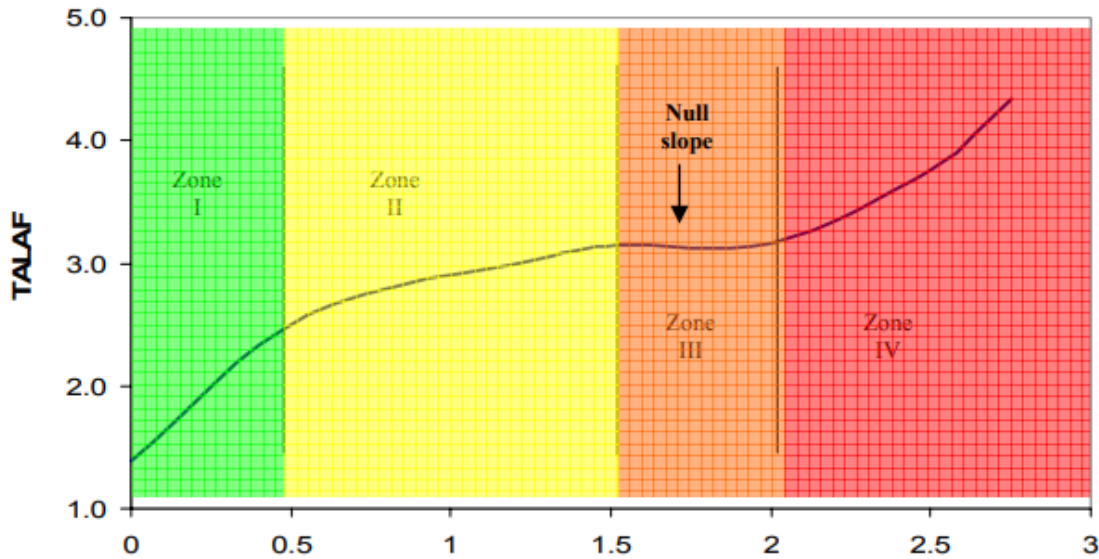


Figure III.1: Evolution du paramètre scalaire TALAF en fonction de la taille d'un défaut sur la bague extérieure

6.9) **THIKAT** :

Le nouveau paramètre, THIKAT, représenté sur la figure 2, informe l'utilisateur et/ou le décideur sur le degré de confiance dans la poursuite de l'utilisation d'un roulement qui a déjà été diagnostiqué comme défectueux

$$THIKAT = \log(Ku^{Cf} + \left(\frac{RMS}{RMS0}\right)^{Peak}) \quad III.11$$

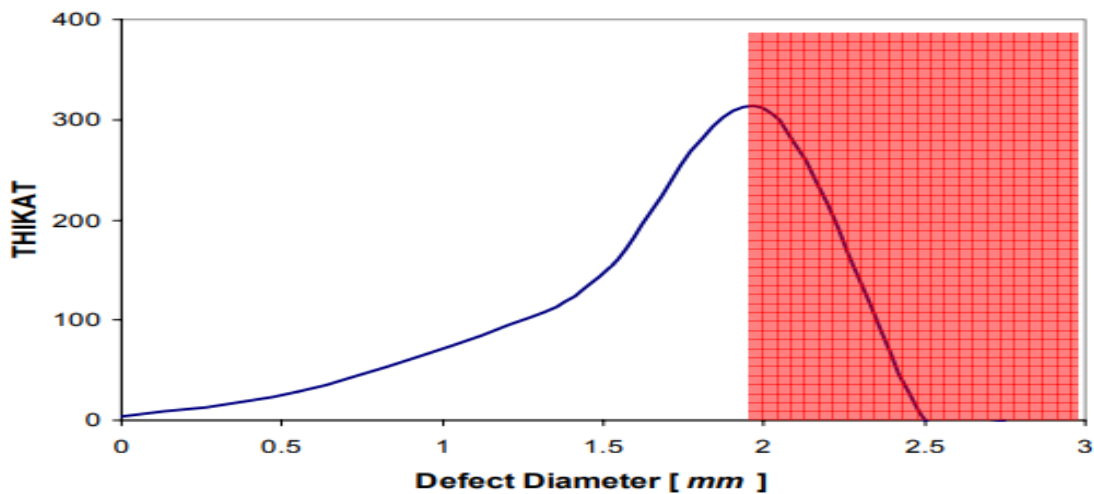


Figure III.2: Evolution du paramètre scalaire, THIKAT en fonction de la taille d'un défaut sur la race extérieure

Conclusion :

Le développement de ces indicateurs est en baisse

Fonctions monotones de dégradation. De plus, si l'analyse des tendances n'est pas effectuée, ils

Il est difficile de les utiliser comme indicateurs de suivi sans être liés au développement la valeur RMS de l'amplitude du signal. Malheureusement, ces indicateurs numériques chutent de Le nombre de défauts et la vitesse de rotation et ils sont incapables de détecter les défauts Résultant de dégâts considérables. Il révèle la propagation de l'erreur, mais ne prédit pas quand L'erreur deviendra excessive.

Pour fournir des informations plus utiles aux équipes de maintenance, deux nouveaux scalaires de domaine temporel Des indicateurs ont été conçus. Le premier paramètre est appelé TALAF et permet une description de l'évolution de l'endommagement en combinant les données de Kurtosis et les valeurs RMS. Ce présente le dommage en quatre stades : la première zone désignée comme dommage de stade I correspond à l'initiation du défaut ; les deuxième et troisième désignés comme dommages de stade II et stade III dommages respectivement, correspondent à la progression du défaut, et enfin, le quatrième, désigné comme dommage de stade IV, correspond à la défaillance catastrophique du roulement. À tout moment la taille du défaut est située en zone IV, la panne est imminente, et un arrêt de la chaîne de production doit être anticipé de toute urgence pour peu de temps après. En conséquence, il est recommandé d'effectuer entretien uniquement après l'étape 3. Cette étape est identifiée par une pente nulle de TALAF, tandis que l'étape 4 est marqué par une forte augmentation de la pente du TALAF.

Le deuxième nouveau paramètre appelé THIKAT, exprimé en termes de plusieurs paramètres (Ku, RMS,

CF, Peak), illustre la confiance dans l'utilisation du roulement défectueux. Chaque fois que la pente de la courbe est positive, il est toujours possible d'utiliser le roulement. Cependant, lorsque la pente devient négative, un défaillance catastrophique imminente doit être anticipée. Thikat donnera une alarme à la fin de l'étape 3.

C'est un meilleur prédicteur de la gravité que Kurtosis qui donnerait une alarme trop tôt à la fin de la deuxième étape de la dégradation. De plus, Thikat est plus sensible au nombre (ou propagation) des défauts et à la vitesse de rotation du rotor.

Chapitre IV

1) Introduction :

Les roulements sont des éléments clés de la machine, dont la défaillance sans avertissement préalable peut endommager le système à des niveaux incorrigibles. Dans la plupart des cas, le coût du roulement n'est pas significatif par rapport aux pertes de production causées par l'entretien imprévu résultant de la défaillance du roulement. Cela nécessite un système de diagnostic robuste pour les roulements. Ce chapitre traite du diagnostic des roulements avec la course intérieure. Une méthode basée sur les vibrations pour détecter et identifier les dommages des roulements est plus courante en raison de la facilité de mesure, et les données mesurées peuvent ensuite être traitées dans le domaine temporel, le domaine de fréquence et le domaine temporel afin d'extraire des informations utiles qui peuvent être liées à la gravité et au type de dommages des roulements.

Dans la recherche uniquement nous nous sommes disputés sur des questions secondaires, nous avons expliqué le roulement et l'erreur et les raisons de leur apparition et résultat que nous avons obtenus après l'apparition du dysfonctionnement et ne parle pas de la façon dont pour l'étudier et le traiter et pour l'étudier il y a deux méthodes :

1) Méthode temporelle

2) Méthode fréquentielle

Et nous avons parlé de cette méthode dans la section précédente avec des détails fastidieux, et dans cet article nous utiliserons la méthode temporelle

Nous avons mentionné plus tôt que le roulement a les défauts suivants :

1) Défaut de la bague intérieure

2) Défaut de la bague extérieure

3) Défaut de la cage

4) Défaut de la bille

2) Banc d'essai des roulements « Bearing Data Center » :

Des signaux de vibrations (accélérations) sont obtenus en exploitant les données mises à disposition sur le site du Case Western Reserve University (CWRU, Bearing Data Center).

[24] Les signaux sont mesurés, à une fréquence d'échantillonnage $F_s = 12 \text{ kHz}$ durant 10 sec, sur une machine électrique triphasée de 1.5 kW (2 HP : horse power) couplé à une charge qui détermine sa vitesse. L'enregistreur de données est équipé de filtres passe-bas à l'étage d'entrée pour l'anti-aliasing. Étant donné que la fréquence maximale des signaux de vibration ne dépasse pas 5 kHz, la fréquence d'échantillonnage est suffisante.

Les données ont été acquises à partir des paliers roulants sous différentes charges et différentes conditions des roulements. Comme illustré par la figure IV.1, les roulements à billes sont installés dans un moteur à induction entraîné par un système mécanique

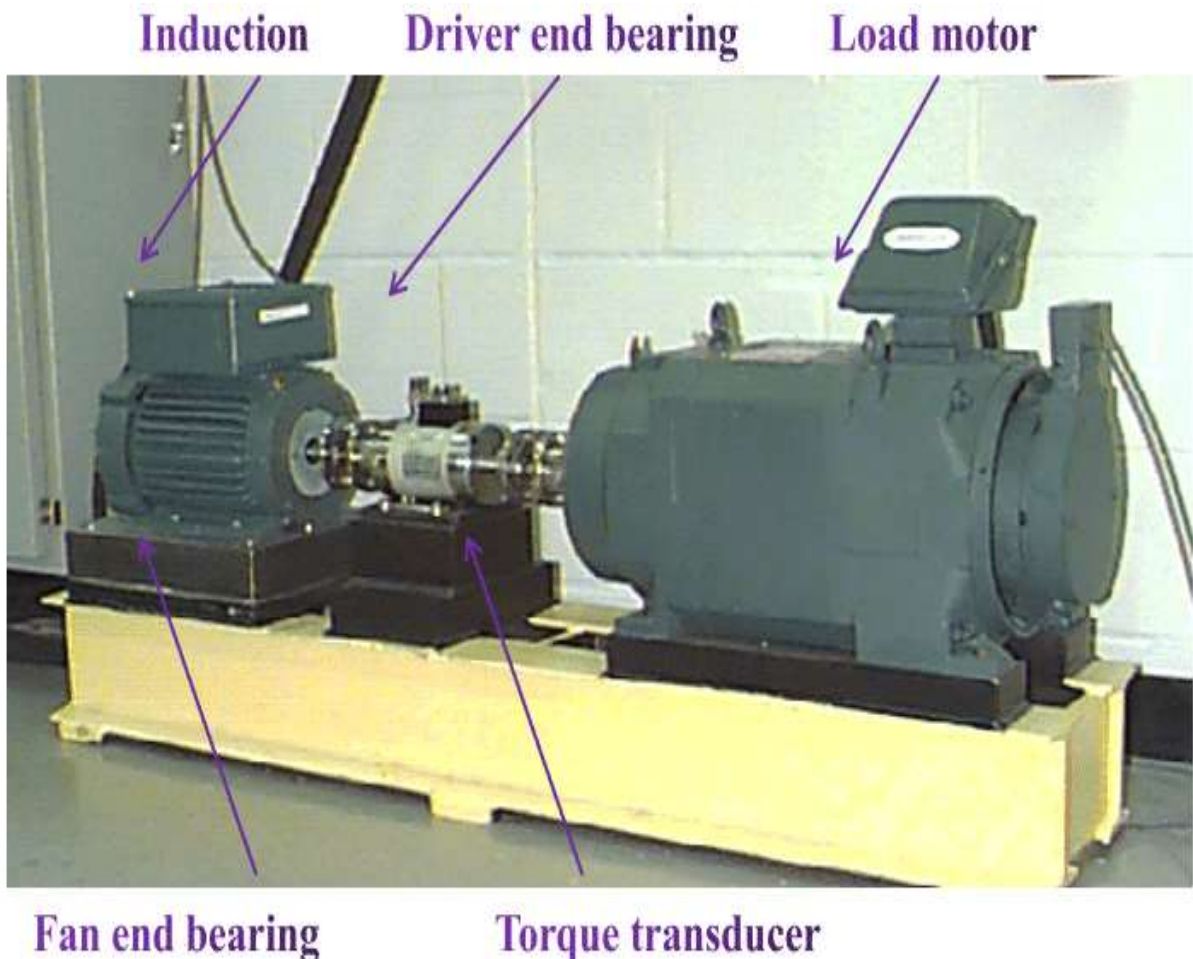


Figure IV.1: Banc d'essai de roulements de Case Western Reserve University (CWRU)

Des défauts de bague interne, bague externe et défauts de billes sont introduits dans les roulements par électroérosion (Electrical Discharge Machining : EDM). La technique EDM est un procédé de traitement de métaux durs ou des composants mécaniques qui ne pouvaient pas être pénétrée avec des procédés classiques. Le défaut correspond alors à un trou circulaire, sa taille est ainsi définie par son diamètre. Les diamètres des défauts sont de 0.1778 mm (0.007 inch), 0.3556 mm (0.014 in), 0.5334 mm (0.021 in) et 0.7112 mm (0.028 in) correspondent à des défauts naissant, modéré, sévère et très sévère respectivement. Chaque roulement a été testé avec quatre différentes charges (1, 2, 3 et 4 charges). Pour les quatre conditions de charge, les signaux ont été mesurés avec des vitesses de rotation de l'ordre de 1797 tr/mn, 1772 tr/mn, 1750 tr/mn, et 1730 tr/mn respectivement. L'ensemble des données est acquis à l'aide d'accéléromètres fixés sur la cage du moteur par des aimants sous quatre conditions de fonctionnement différentes : condition normale, défaut de la bille (BF), défaut dans la bague interne (IRF), et défaut dans la bague externe (ORF). Les capteurs sont placés à la position 12 heures (verticale) pour les défauts de billes et les défauts de la cage interne. Puisque les défauts de la bague externe sont des défauts stationnaires, le placement du défaut relativement à la zone de charge du roulement influe directement sur la réponse vibratoire du système moteur/roulement. Ainsi, et en vue de considérer cet effet, des essais sont effectués avec des défauts de la bague externe situés aux positions 3 heures (directement dans la zone de charge), 6 heures (orthogonale à la zone de charge) et 12 heures comme illustré.

3) Descripteurs fréquentiels :

Les descripteurs fréquentiels qui sont plus utilisés dans la reconnaissance de l'emplacement du défaut. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. [25]

La figure IV.0 illustre les cotes de fabrication d'un roulement :

- db : Diamètre de bille.
- dm : Diamètre primitive.
- α : Angle de contact.

L'angle de contact α est l'angle que fait la ligne de contact du roulement avec la direction radiale

($\alpha = 0$).

- n : le nombre d'éléments roulants ($n=9$).

Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication, Nous avons trois paramètres fréquentiels :

- Fréquence de passage des billes sur la bague extérieure f_{outer} (BPFO : Ball Pass Frequency of the Outer race (Hz)).
- Fréquence de Passage des billes sur la bague intérieure f_{inner} (BPFI : Ball Pass Frequency of the Inner race (Hz)).
- La fréquence de rotation de la bille f_{ball} (BSF : Ball Spin Frequency (Hz)).

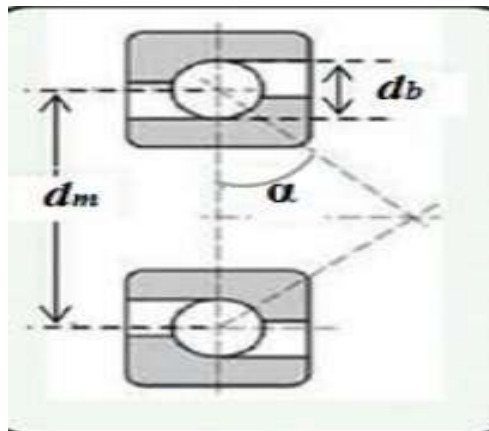


Figure IV.2 : Caractéristiques géométriques d'un roulement.

Une mesure vibratoire sur un palier d'un moteur électrique tournant à 1730 tr/min En se basant sur les caractéristiques du roulement 6205-2RS JEM SKF données dans le tableau III.1 :

| Diamètre Intérieur | Diamètre Extérieur | Nombre De Bille | Diamètre de Bille (Db) | Diamètre Primitive (dm) |
|--------------------|--------------------|-----------------|------------------------|-------------------------|
| 25mm | 52mm | 9 | 7,94mm | 38,5mm |

Tableau IV.1 : Caractéristiques du roulement 6205-2RS JEMSKF

Les fréquences caractéristiques sont déterminées à partir de la géométrie du roulement et de la cinématique de la machine étudiée. Elles sont données par les équations suivantes :

$$f_{bi} = \frac{f_r * N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad IV.1$$

$$f_{be} = \frac{f_r * N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad IV.2$$

$$f_c = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \quad IV.3$$

$$f_{bille} = \frac{f_r * D_m}{2 * D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \quad IV.4$$

La fréquence de rotation f_r , pour une vitesse de rotation de $N = 1730 \text{ rpm}$ est égale à :

$$g = (n_s - n_r) / n_s = (1800 - 1730) / 1800 = 0,0388$$

$$f_r = (1 - g) \cdot f_s / p = (1 - 0,0388) \cdot 60 / 2 = 29 \text{ Hz}$$

| <i>F_{bi}</i> (de la bague intérieure) | <i>F_{be}</i> (la bague extérieure) | <i>F_c</i> (la cage) | <i>F_{bille}</i> (de la bille) |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| 103 Hz | 156.5 Hz | 11.44 Hz | 67 Hz |

Tableau IV.2 : Fréquences caractéristiques pour les défauts de roulement 6205-2RS JEM SKF

4) L'analyse temporelle :

Nous avons calculé les indicateurs pour chaque bande de charge dans tous les détails.

Une étude numérique a été menée sur les indicateurs numériques de temps et leur capacité à suivre l'ampleur de l'augmentation et le nombre de défauts locaux, Les résultats de simulation montrent que ces indicateurs de temps traditionnels peuvent, utilisé pour la prédiction précoce de l'erreur dans les premiers stades de la détérioration.

5) Simulation les défaut roulement de MAS

5.1) Pour mouture sans défaut :

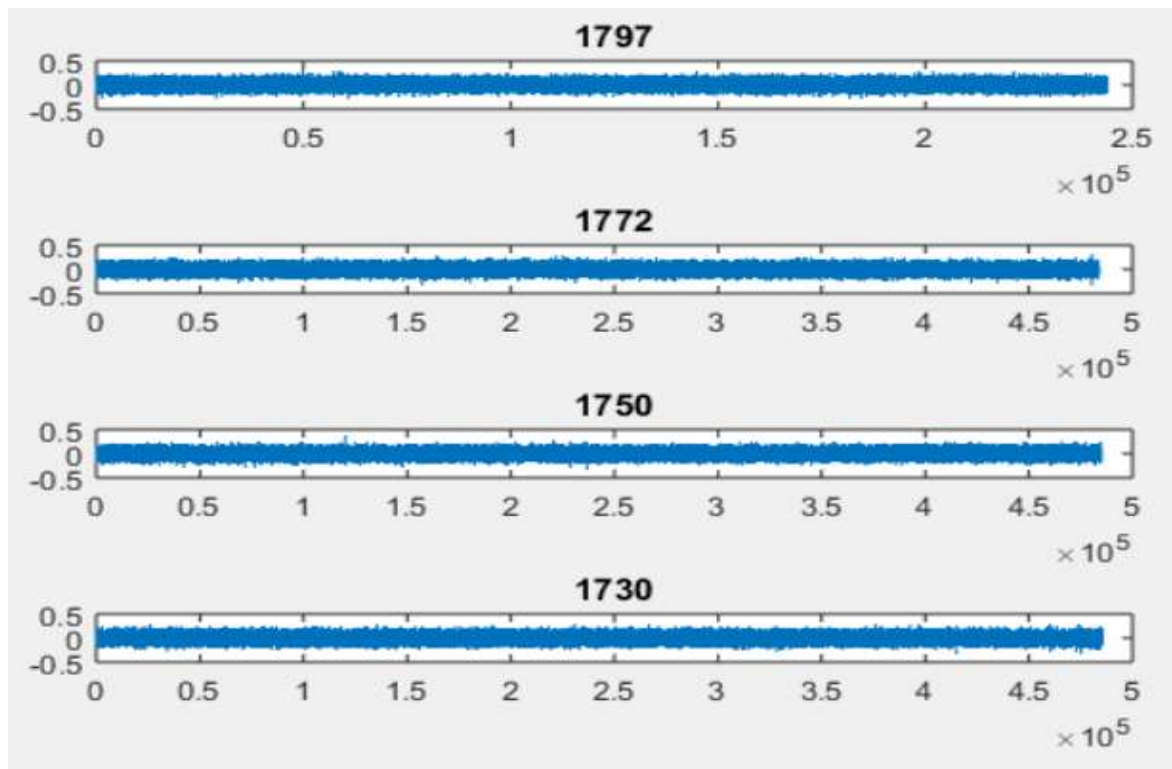


Figure IV.3 : les quartés charges

| | 1797 | 1772 | 1750 | 1730 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Rms | 0.0738 | 0.0664 | 0.0643 | 0.0659 |
| Peak2peak | 0.5979 | 0.6634 | 0.6861 | 0.5902 |
| skewness | -0.0354 | -0.1730 | -0.1671 | -0.1275 |
| Kurtosis | 2.7642 | 2.9306 | 2.9251 | 2.9572 |
| Crest factor | 4.2196 | 5.2129 | 5.5847 | 4.6515 |
| Shape factor | 1.2399 | 1.2409 | 1.2400 | 1.2446 |
| Impulse factor | 5.2317 | 6.4686 | 6.9252 | 5.7891 |
| talaf | 1.3255 | 1.3688 | 1.3674 | 1.3755 |
| THIKAT | 4.3040 | 5.6086 | 5.9968 | 5.0497 |

Tableau IV.3 : les resulta les indicateurs scalaires pour mouture sans défaut

1) RMS (valeur efficace) :

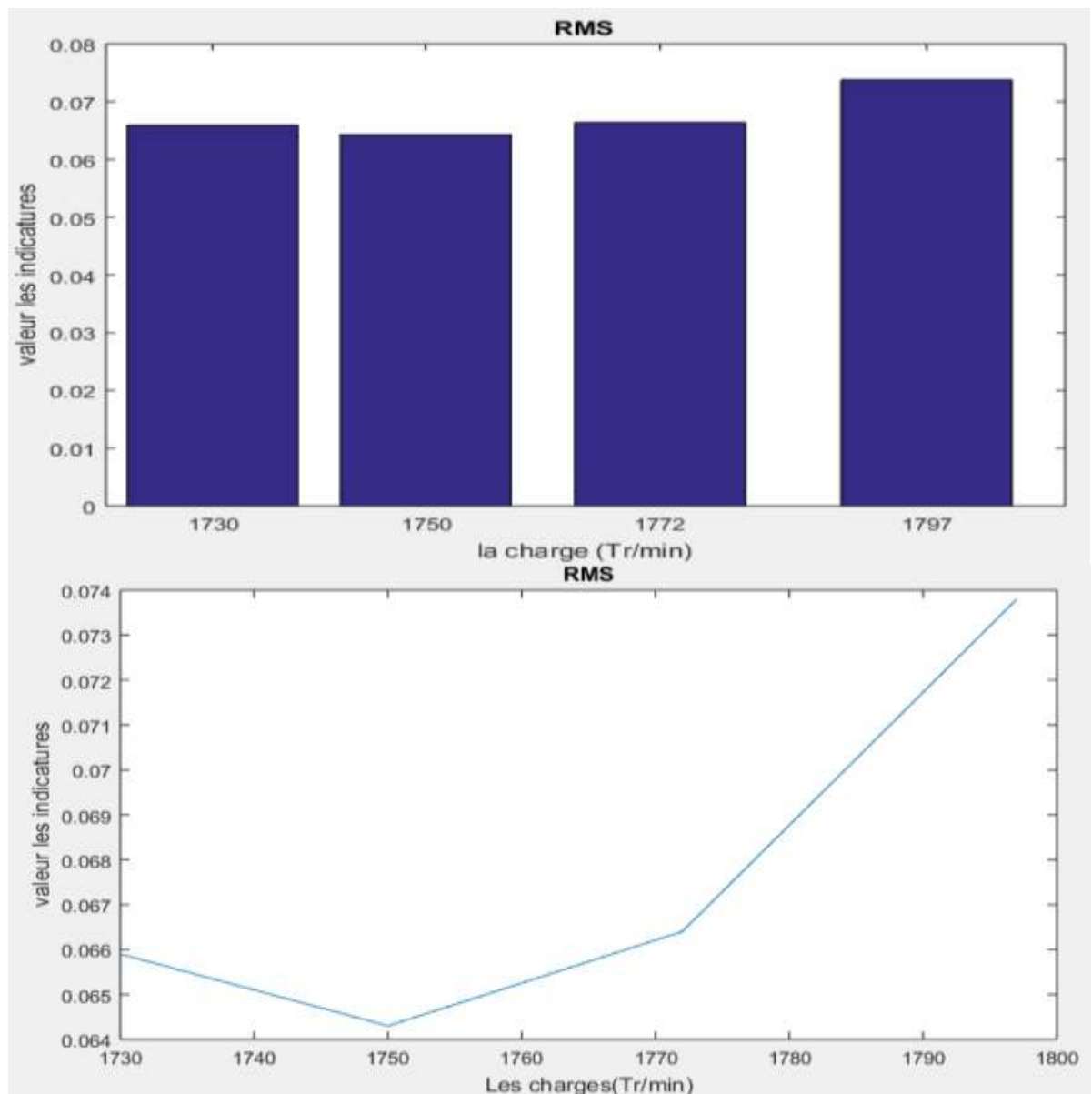


Figure IV.4 : les valeurs l'indicateur RMS (valeur efficace) pour machine sans défaut

Commenter :

L'indicateur RMS pour machine sans défaut sont diminué et augment avec change le charge :

Pour charge vide (0) tourne 1797 Tr/min il est considéré comme la plus grande valeur par rapport les autres charges et les valeurs pour charge 1 (1772Tr/min) et charge 2 (1750Tr/min) diminue par rapport le charge 0 et pour charge 3 (1730Tr/min) augment par rapport le charge 2.

2) Peak :

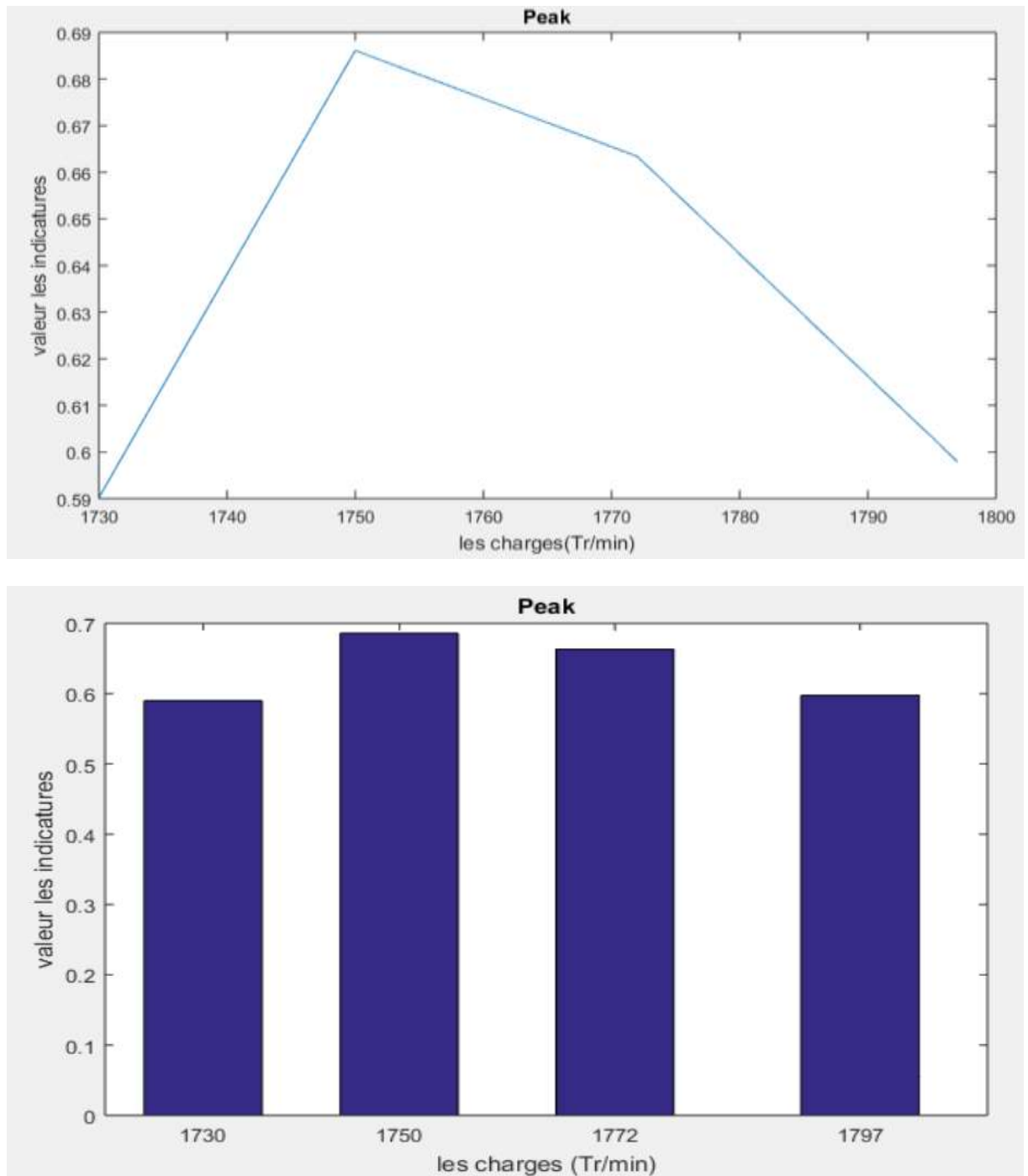


Figure IV.5 : les valeurs l'indicateur Peak pour machine sans défaut

Commenter :

On constate que plus on change de type de charge, plus les valeurs d'indicateur Peak augmente, Pour charge 1 (1772 Tr/min) et charge 2(1750Tr/min) augmentant par apport le charge 0 (1797Tr/min) puis le charge 3 (1730Tr/min) diminue par apport les autres

3) Skewness :

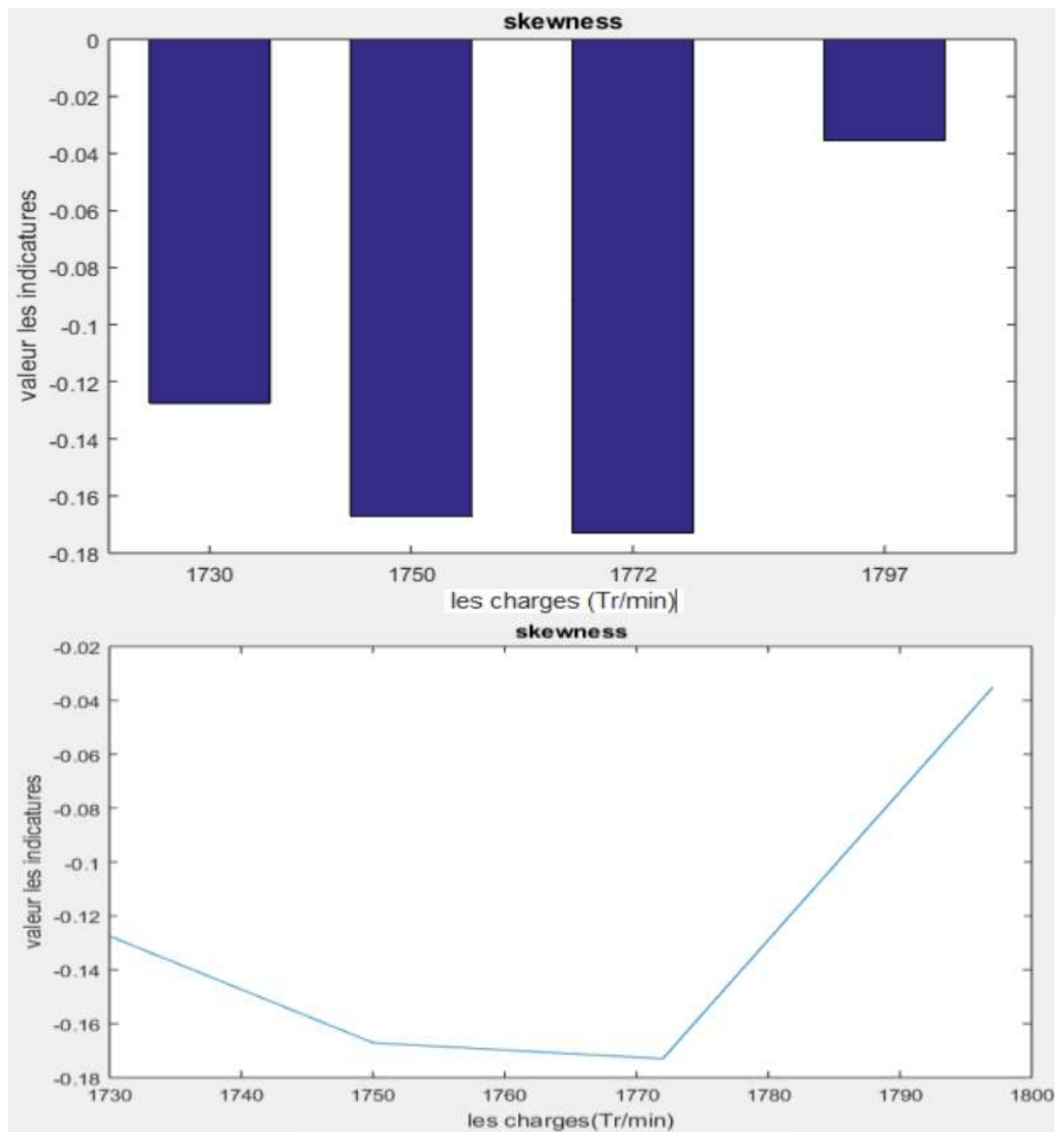


Figure IV.6 : les valeurs l'indicateur skewness pour machine sans défaut

Commenter :

Toutes les valeurs d'indicateur cet valeur négative

Plus nous modifions les charges plus les valeurs seront basses qu'avant par exemple pour charge 1 diminue par rapport le charge 0 (vide) et la valeur pour charge 0 très grande par rapport les autres et les valeurs pour charge 2 et 3 diminue par rapport le charge 1

4) Kurtosis :

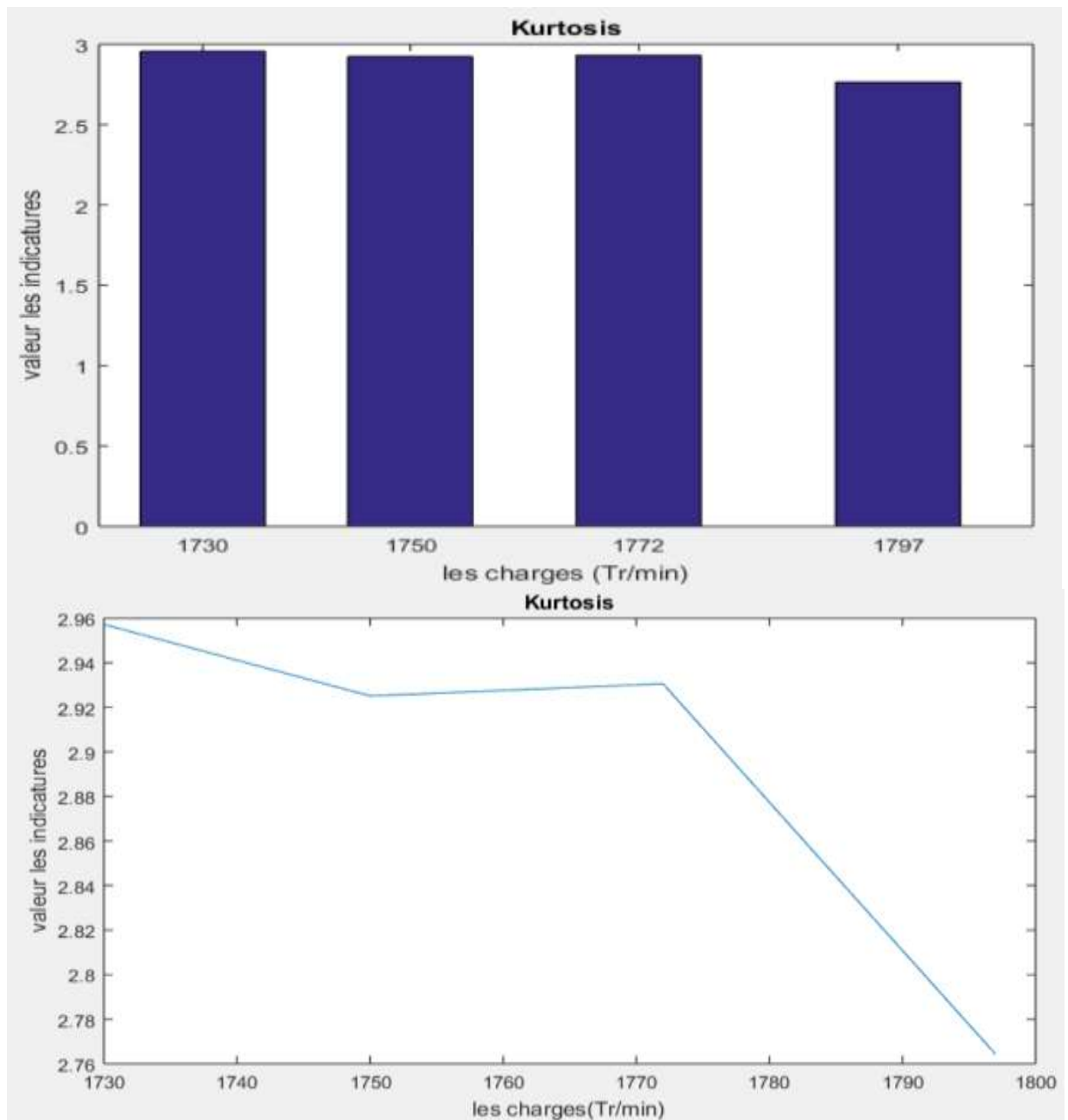


Figure IV.7: les valeurs l'indicateur kurtosis pour machine sans défaut

Commenter :

Plus nous modifions les charges plus les valeurs seront augment

Pour charge 1 et 2 et 3 augmentent par rapport le charge 0, et ils grandissent les uns par rapport aux autres

Et l'indicateur kurtosis cet indicateur stable pour machine sans défaut

5) Crest factor :

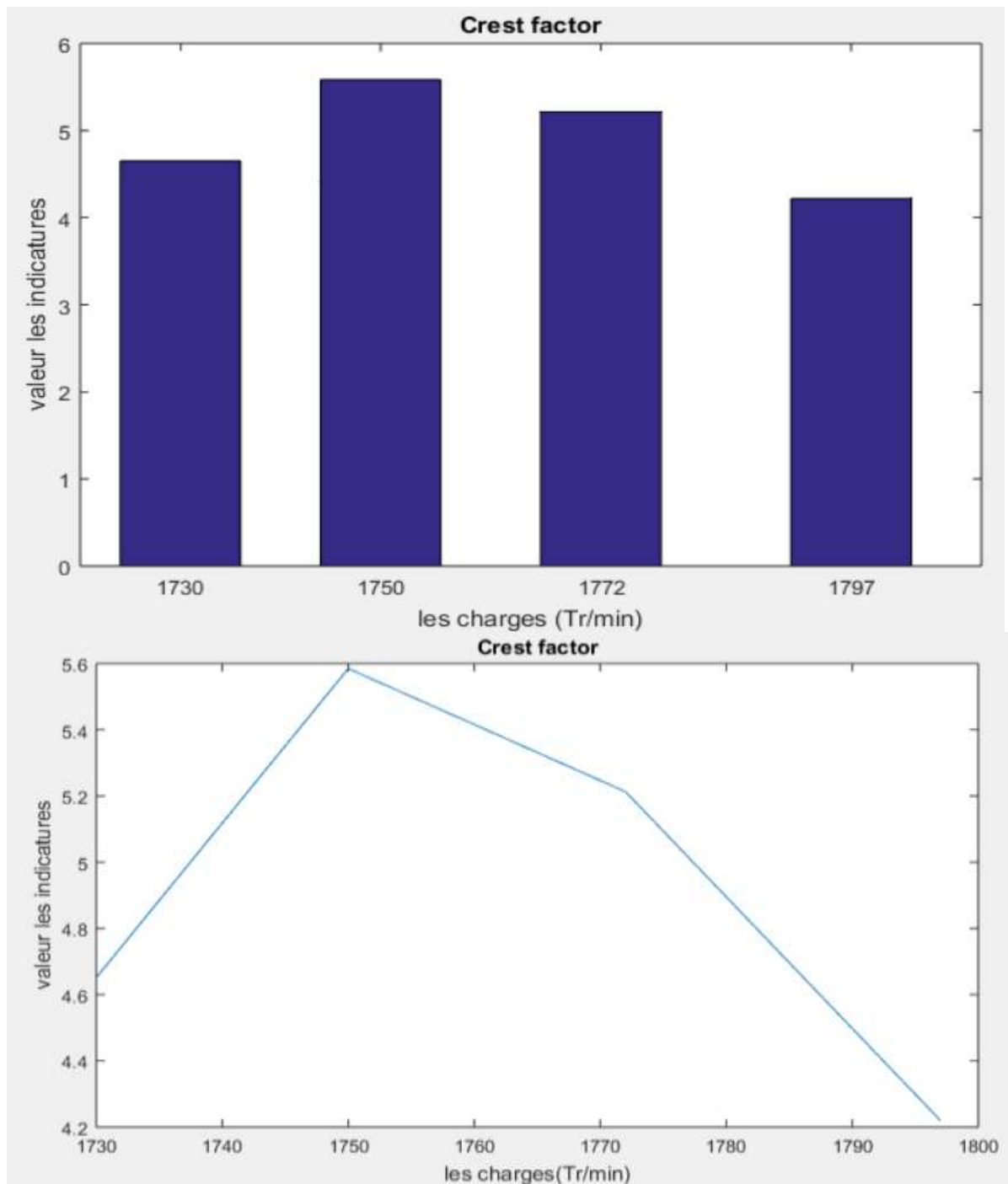


Figure IV.8: les valeurs l'indicateur Crest factor pour machine sans défaut

Commenter :

On constate que plus on change de type de charge, plus les valeurs d'indicateur Peak augmente, Pour charge 1 (1772 Tr/min) et charge 2(1750Tr/min) augmentant par apport le charge 0 (1797Tr/min) puis le charge 3 (1730Tr/min) diminue par apport les autres

6) Shape factor :

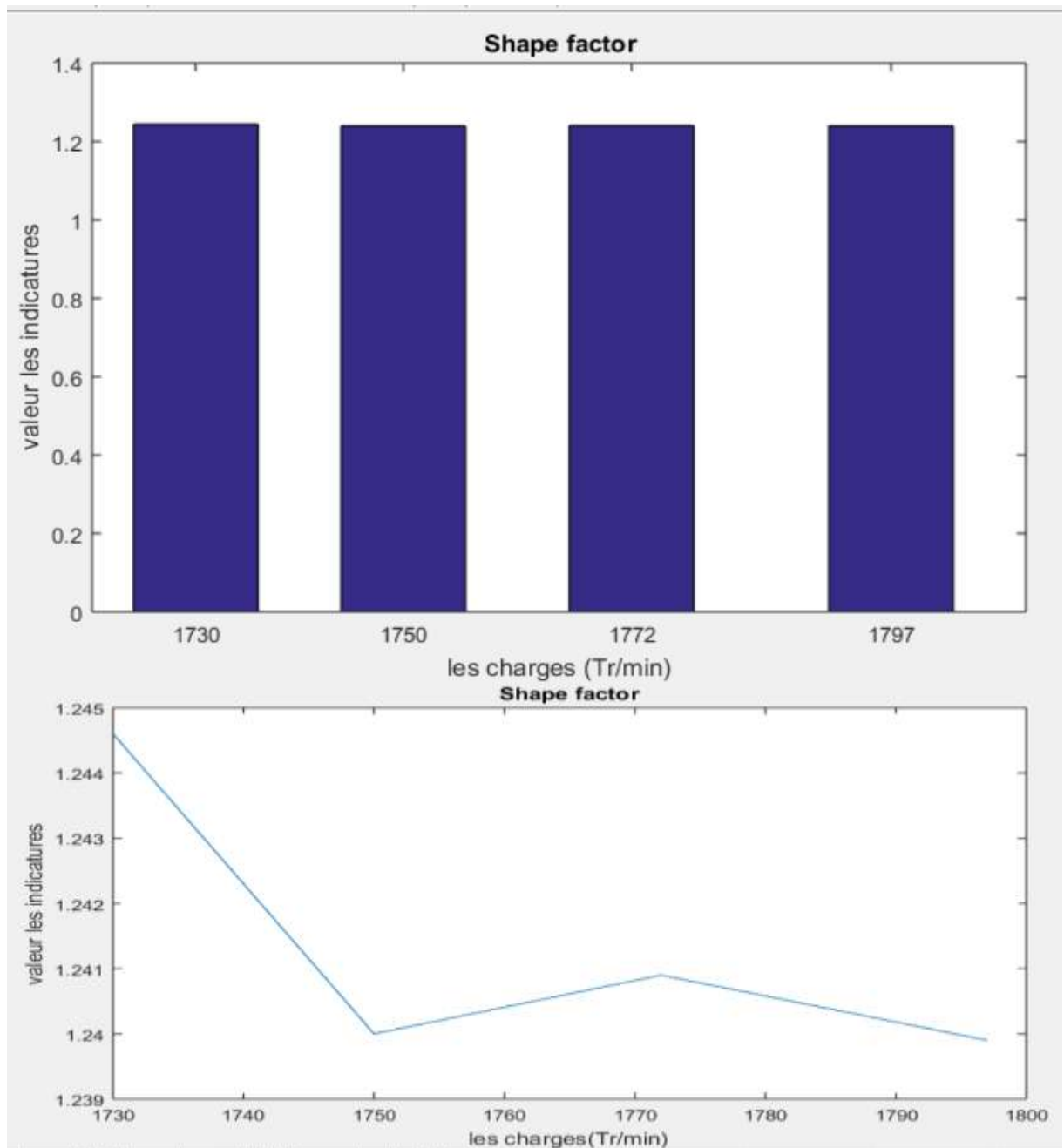


Figure IV.9: les valeurs l'indicateur Shape factor pour machine sans défaut

Commenter :

Pour l'indicateur Shape factor les valeurs normales et presque égale, mais il y a un léger changement par exemple pour la valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et le même pour valeur de charge 2 diminue par rapport le charge 1 et la valeur pour charge 3 très grande par rapport les autres.

7) Impulse factor :

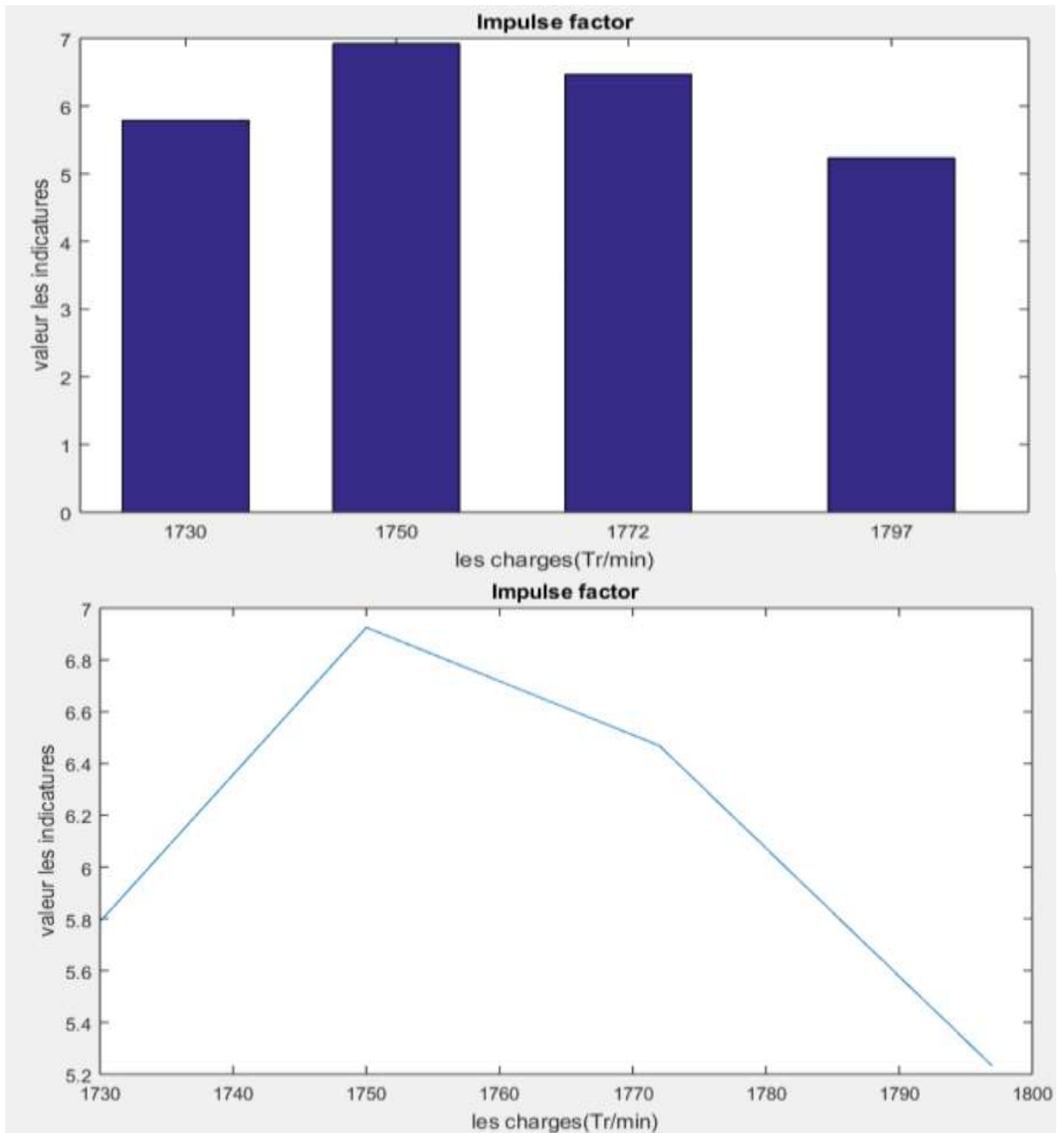


Figure IV.10: les valeurs l'indicateur impulse factor pour machine sans défaut

Commenter :

On constate que plus on change de type de charge, plus les valeurs d'indicateur Peak augmente.

Pour charge 1 (1772 Tr/min) et charge 2(1750Tr/min) augmentant par rapport le charge 0 (1797Tr/min) puis le charge 3 (1730Tr/min) diminue par rapport les autres

8) TALAF :

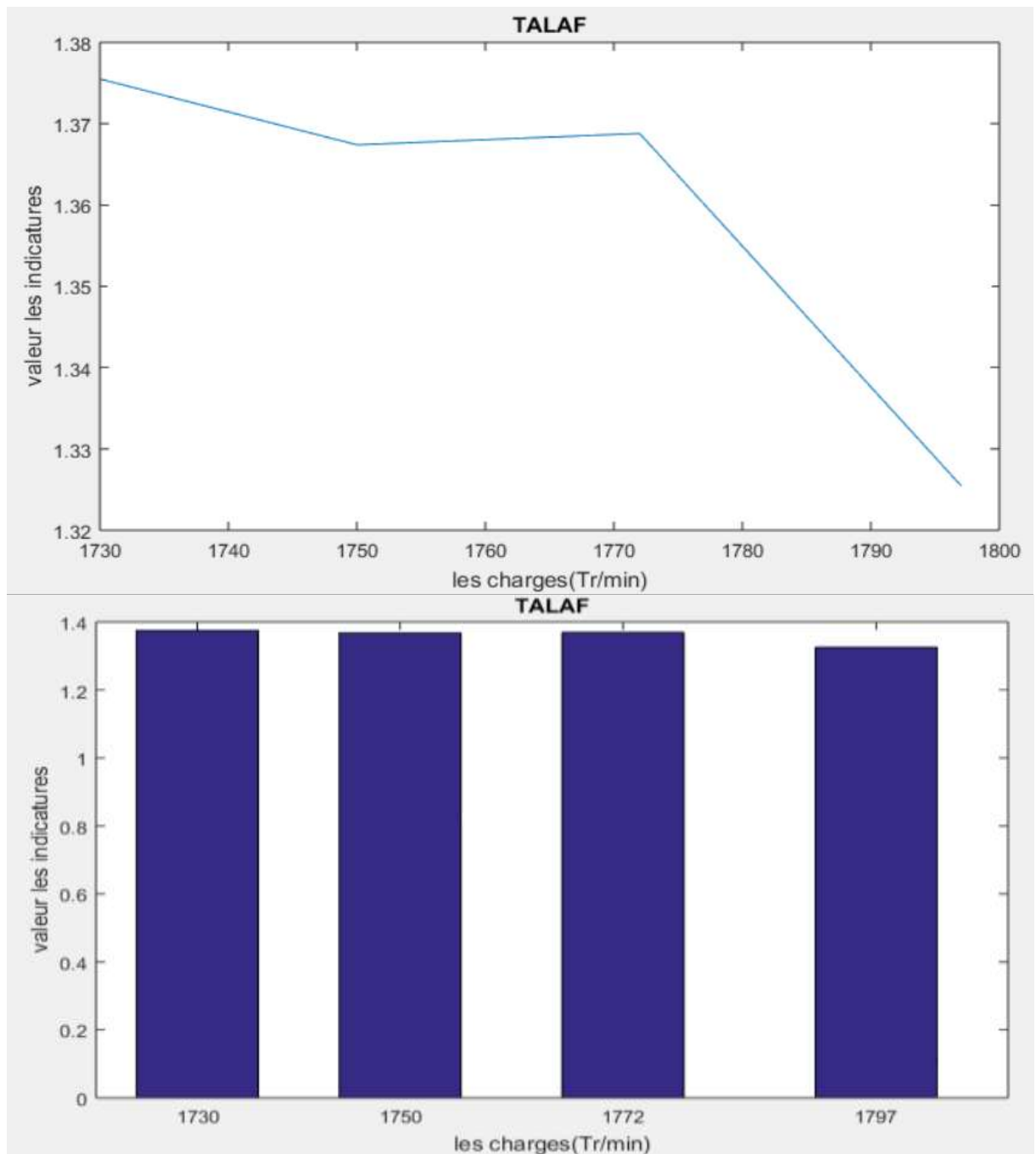


Figure IV.11: les valeurs l'indicateur TALAF pour machine sans défaut

Commenter :

Pour l'indicateur Shape factor les valeurs normales et presque égale, mais il y a un léger changement par exemple pour la valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et le même pour valeur de charge 2 diminue par rapport le charge 1 et la valeur pour charge 3 très grande par rapport les autres.

9) THIKAT :

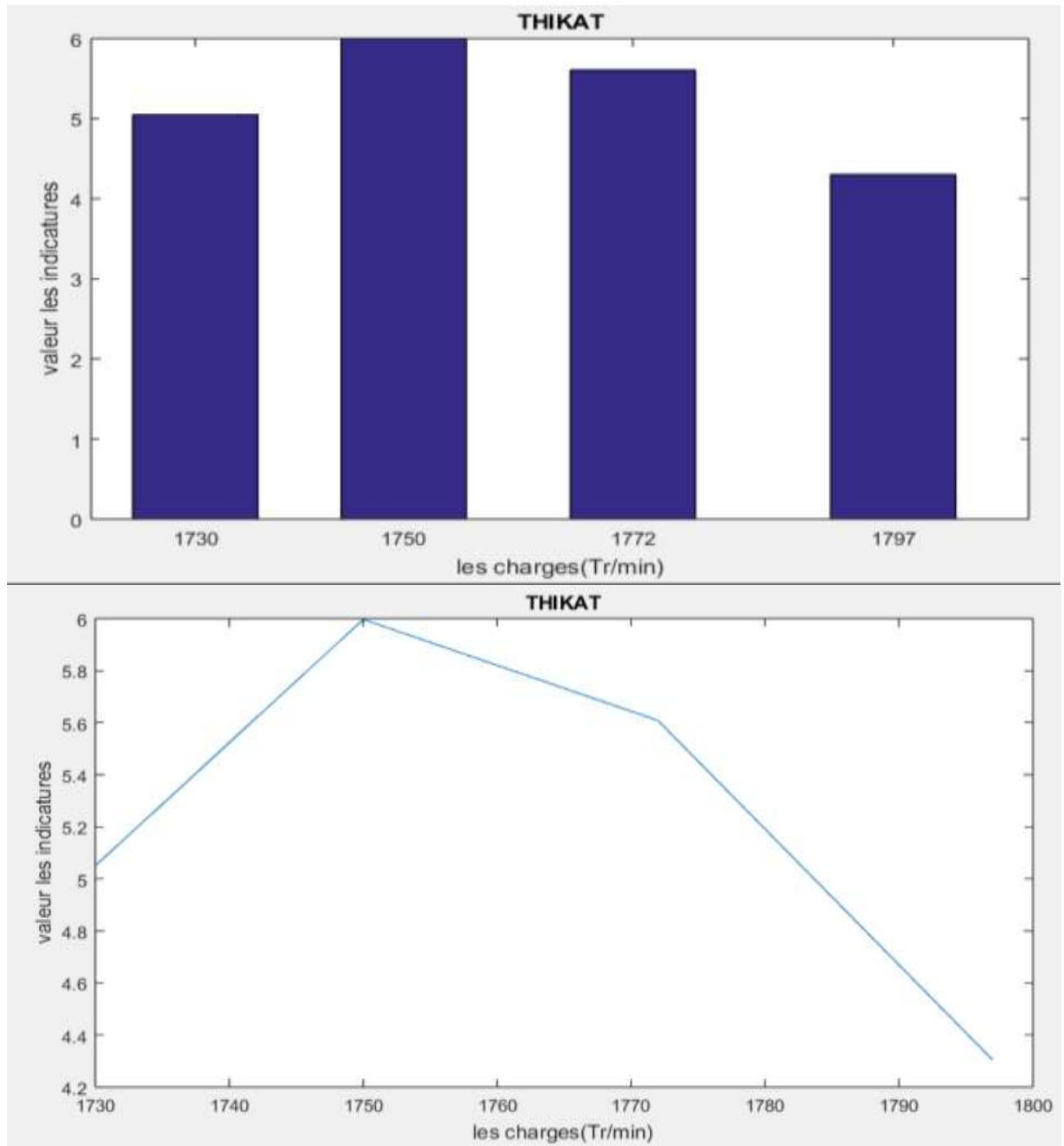


Figure IV.12: les valeurs l'indicateur THIKAT pour machine sans défaut

Commenter :

On constate que plus on change de type de charge, plus les valeurs d'indicateur Peak augmente.

Pour charge 1 (1772 Tr/min) et charge 2 (1750 Tr/min) augmentant par rapport le charge 0 (1797 Tr/min) puis le charge 3 (1730 Tr/min) diminue par rapport les autres

10) Commenter générale :

La fonction de ces indicateurs est nous alerter qu'une erreur s'est produite ou se produira à l'avenir et d'être prêt à y remédier.

Ces valeurs que nous avons étudiées précédemment sont valeurs pour machine normale machine sans défaut cet valeur parfait, donc les valeurs et si le changement change pour chaque indicateur cela signifie qu'il peut y avoir une erreur dans la future.

On voit que les indicateurs sont augment et diminue pour chaque charge, et ils sont tous positifs sauf l'indicateur 'skewness' cet indicateur négative et cette valeur c'est sa vraie valeur.

On obtient trois indicateurs fixe et stable il est :

- 1) Kurtosis
- 2) Shape factor
- 3) Talaf

Ils sont les mieux placés pour découvrir ce qui ne va pas et nous avertir

5.2) La bague intérieure :

Pour Défaut de la bague intérieure Il y a 4 charges :

5.2.1) Charge 0 : 1797tr/min

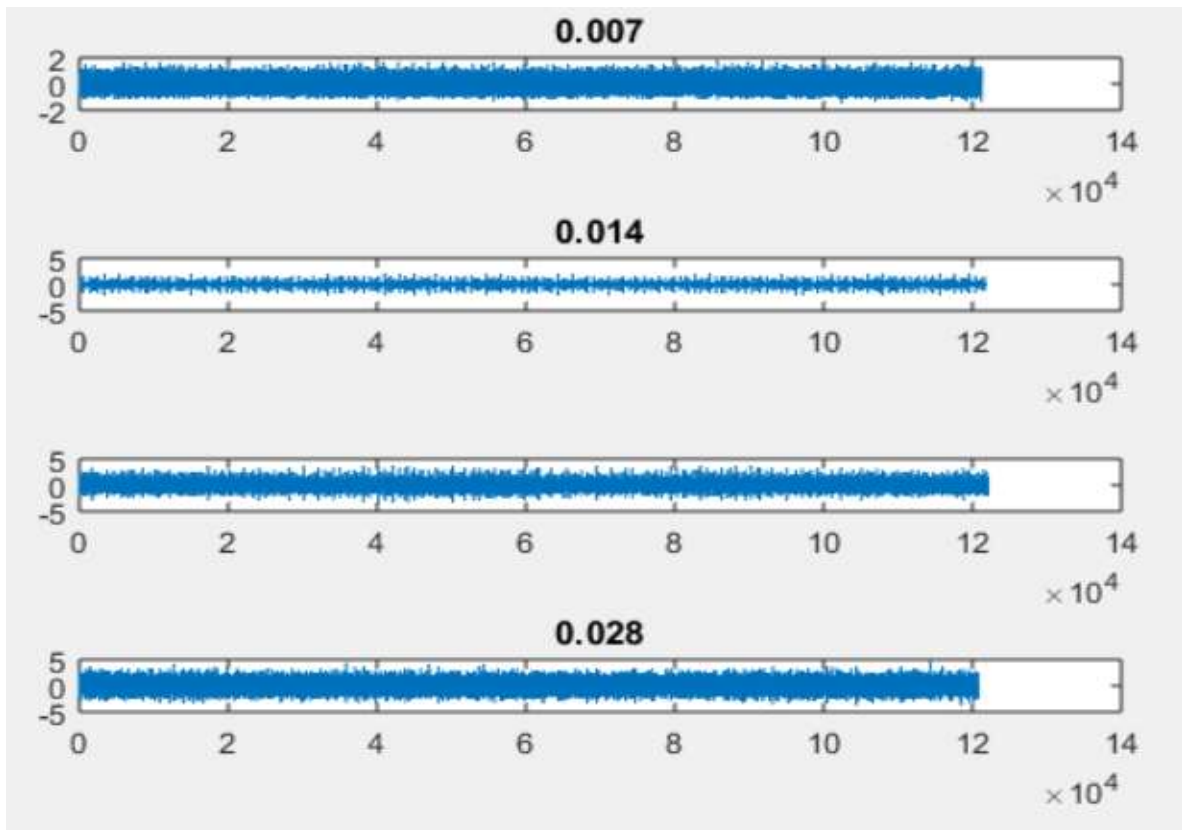
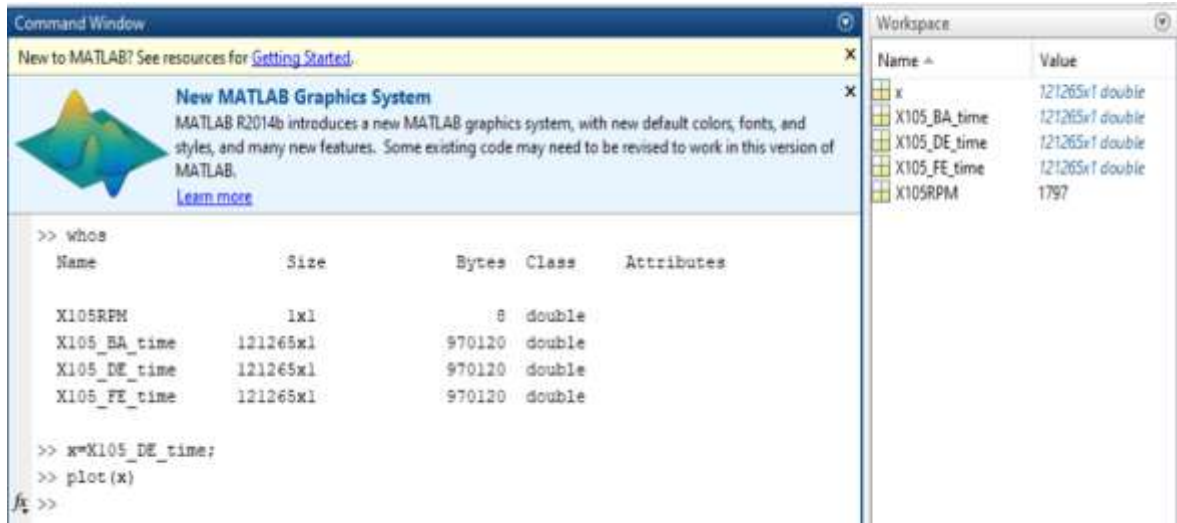


Figure IV.13 : les charges pour défaut baguette interne pour la charge 0

Maintenant on fait simulation les défauts par Matlab et en utilisant méthode temporelle :

Exemple pour la charge 0 (1797tr/min) et défaut bague intérieure :

```

Editor - C:\Users\doons\OneDrive\Bureau\TimeFeatures (1).m*
TimeFeatures (1).m* x +
1 - x = x(:); % 1. les valeur de signale
2 - xm = sum(x)/length(x); % 2. Mean
3 - xrms = rms(x); % 3. RMS
4 - xsd = std(x); % 4. Standard deviation
5 - xp = max(abs(x)); % 5. Peak
6 - xsk = skewness(x); % 6. Skewness
7 - xkurt= kurtosis(x); % 7. Kurtosis
8 - xcrf = xp/sqrt(sum(x.^2)/length(x)); % 8. Crest factor
9 - xc1f = max(abs(x))/((sum(sqrt(abs(x)))/length(x))^2); % 9. Clearance factor
10 - xsf = (sqrt(sum(x.^2)/length(x)))/(sum(abs(x))/length(x)); % 10. Shape factor
11 - xif = xp/(sum(abs(x))/length(x)); % 11. Impulse factor
12 - xp2p = max(x)-min(x); % 12. Peak-to-peak
13 - xtal = log(xkurt+(xrms/xrms0)) % 13. TALAF
14 - xthik= log((xkurt^xcrf)+(xrms/xrms0)^xp2p) % 14. THIKAT
    
```

Figure IV.14 : Exemple de simulation les défauts de roulement pour charge 0 de MAS

Les résultats pour 4 charges pour le défaut les bagues intérieures :

| | rms | Peak2peak | skewness | Kurtosis | Crest factor | Shape factor | Impulse factor | Talaf | THIKAT |
|-------|--------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|----------------|--------|---------|
| 0,007 | 0,2915 | 3,1189 | 0,164 | 5,3959 | 5,9653 | 1,3957 | 8,3257 | 2.2350 | 10.0584 |
| 0,014 | 0.1978 | 3.9451 | -0,0588 | 21.9574 | 10.1642 | 1.6946 | 17.2242 | 3.2043 | 31.3982 |
| 0,021 | 0.5254 | 7.1597 | 0.3025 | 7.4450 | 7.2101 | 1.4597 | 10.5245 | 2.6785 | 14.9789 |
| 0,028 | 0.8384 | 8.4175 | 0.1031 | 3.3967 | 5.7075 | 1.2759 | 7.2820 | 2.6917 | 20.4557 |

Tableau IV.4: les resulta les indicateur scalaire les défauts de roulement

5.2.2) Pour charge 1 :1772tr/min

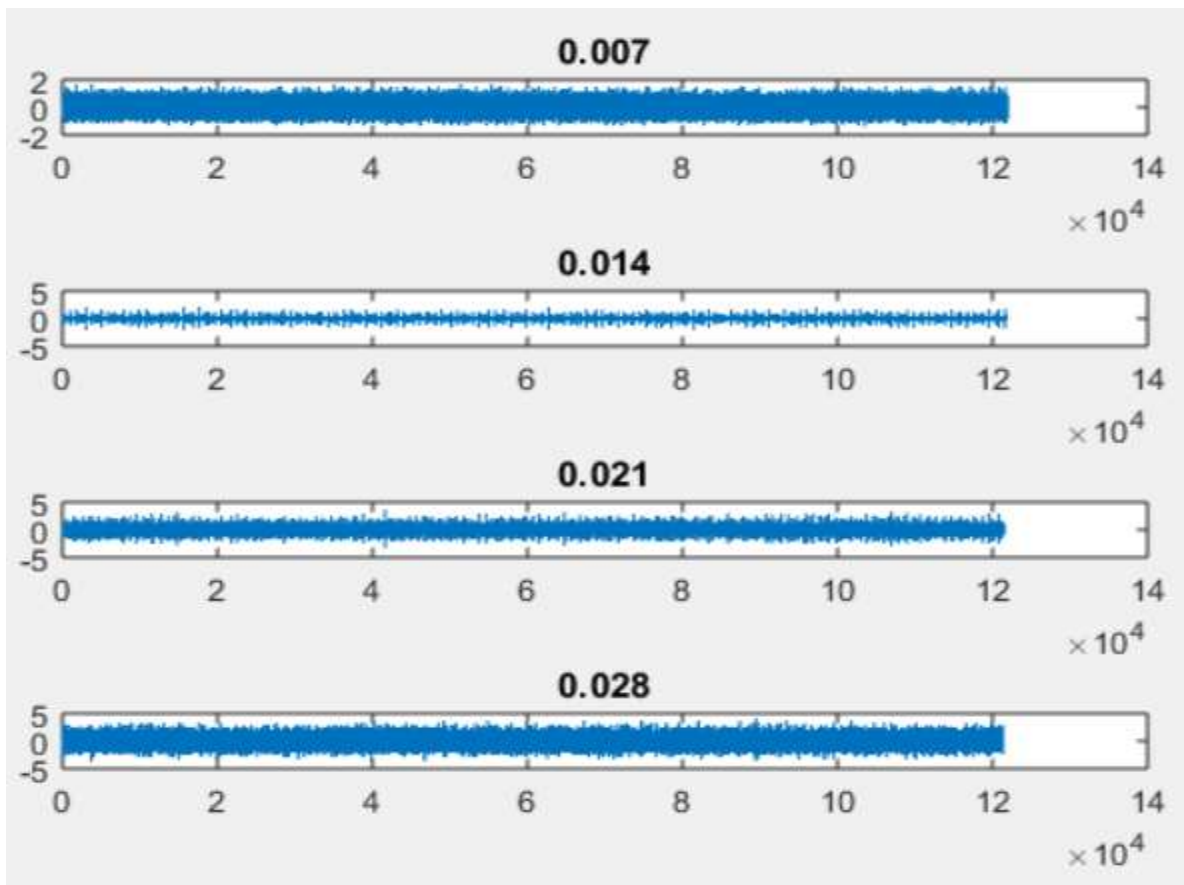


Figure IV.15: les charges pour défaut bague interne pour la charge 1

Les résultats pour 4 diamètres pour le défaut les bagues intérieures pour la charge 1 :

| | <i>rms</i> | <i>Peak2peak</i> | <i>skewness</i> | <i>Kurtosis</i> | <i>Crest factor</i> | <i>Shape factor</i> | <i>Impulse factore</i> | <i>talaf</i> | <i>THIKAT</i> |
|-------|------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------|---------------|
| 0,007 | 0.2929 | 2.9838 | 0.1304 | 5.5423 | 5.3973 | 1.4105 | 7.6131 | 2.2979 | 9.2504 |
| 0,014 | 0.1655 | 4.0316 | 0.0030 | 22.0843 | 12.2655 | 1.6701 | 20.4841 | 3.2018 | 37.9601 |
| 0,021 | 0.4418 | 6.9701 | 0.2563 | 7.6667 | 8.3426 | 1.4781 | 12.3313 | 2.6617 | 17.0154 |
| 0,028 | 0.8376 | 7.6477 | 0.0988 | 3.1956 | 4.6930 | 1.2641 | 5.9325 | 2.7606 | 19.3853 |

Tableau IV.5: les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement Pour bague interne

5.2.3) Charge 2 : 1750tr/min

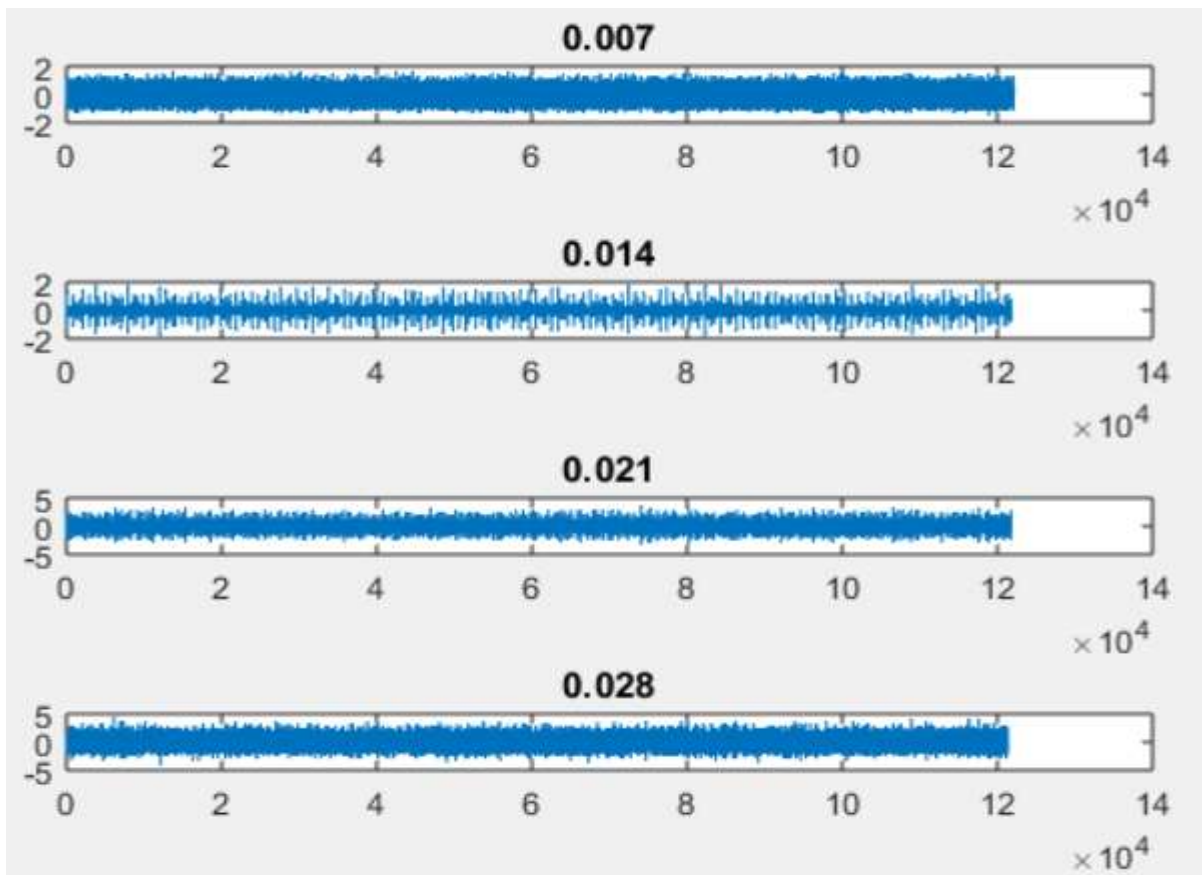


Figure IV.16: les charges pour défaut baguette interne pour la charge 2

Les résultats pour 4 diamètres pour le défaut les bagues intérieures pour la charge 2 :

| | rms | Peak2peak | skewness | Kurtosis | crest factor | shape factor | impluse facteur | talaf | THIKAT |
|-------|--------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|-----------------|--------|---------|
| 0,007 | 0.2995 | 3.0652 | 0.0904 | 5.5638 | 5.4743 | 1.4017 | 7.6735 | 2.3245 | 9.4047 |
| 0,014 | 0.1631 | 3.7347 | 0.0235 | 21.6862 | 11.5321 | 1.6520 | 19.0512 | 3.1873 | 35.4805 |
| 0,021 | 0.4889 | 6.7471 | 0.2486 | 8.0580 | 7.4113 | 1.5003 | 11.1192 | 2.7512 | 15.6210 |
| 0,028 | 0.8413 | 8.7313 | 0.1445 | 3.2863 | 5.3973 | 1.2673 | 6.8403 | 2.7955 | 22.4519 |

Tableau IV.6 : les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement

5.2.4) Pour la charge 3 :1730tr/min

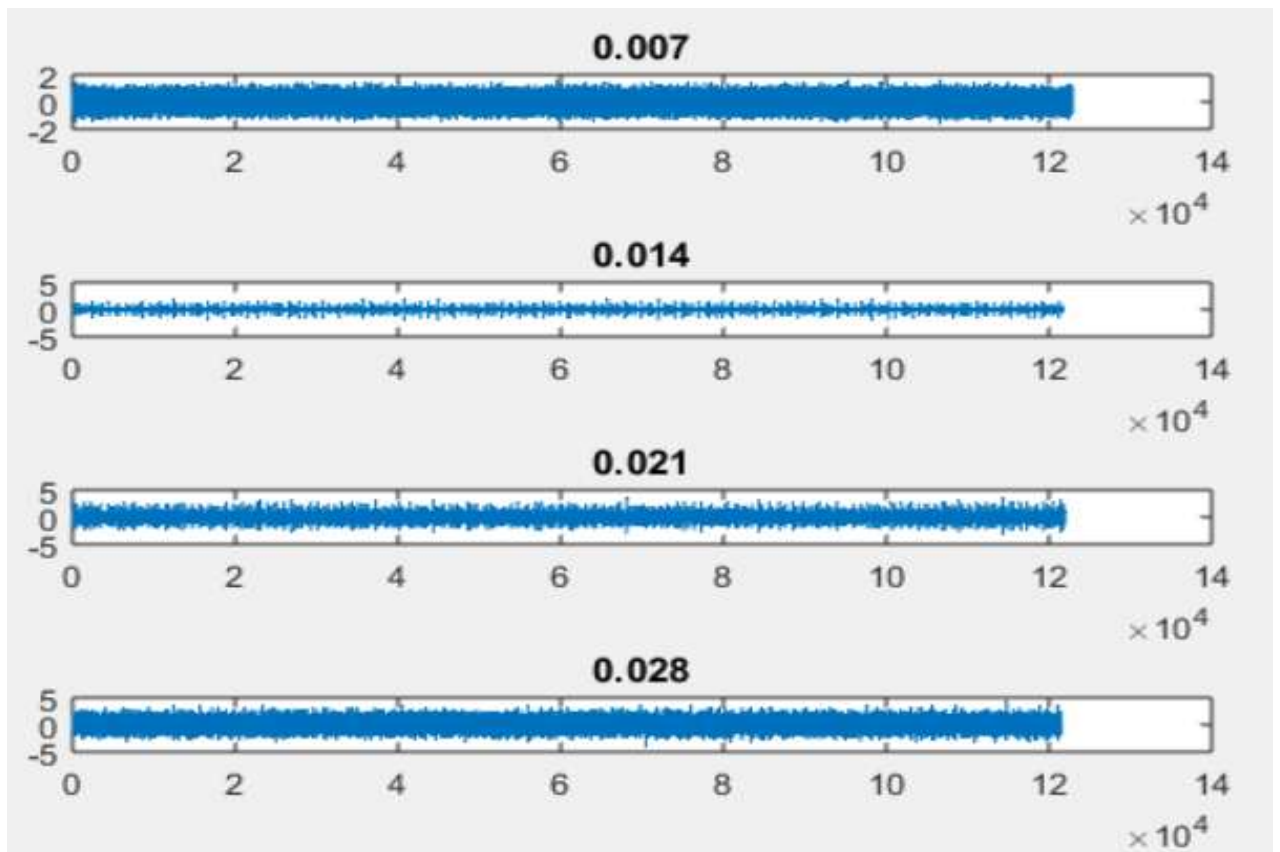


Figure IV.17: les charges pour défaut baguette interne pour la charge 3

Les résultats pour 4 diamètres pour le défaut les bagues intérieures pour la charge 3 :

| | <i>rms</i> | <i>Peak2peak</i> | <i>skewness</i> | <i>Kurtosis</i> | <i>crest factor</i> | <i>shape factor</i> | <i>impluse factor</i> | <i>talaf</i> | <i>THIKAT</i> |
|-------|------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| 0,007 | 0.3136 | 3.2070 | -0.0132 | 5.2911 | 5.3298 | 1.3992 | 7.4575 | 2.3076 | 8.9000 |
| 0,014 | 0.1808 | 4.1445 | 0.0334 | 18.1640 | 11.7649 | 1.5653 | 18.4151 | 3.0401 | 34.1116 |
| 0,021 | 0.4487 | 6.7025 | 0.3032 | 8.3451 | 8.0560 | 1.4812 | 11.9329 | 2.7183 | 17.1066 |
| 0,028 | 0.8231 | 8.1673 | 0.1617 | 3.3169 | 5.2811 | 1.2726 | 6.7208 | 2.7605 | 20.6221 |

Tableau IV.7 : les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement

1) *RMS (valeur efficace)*

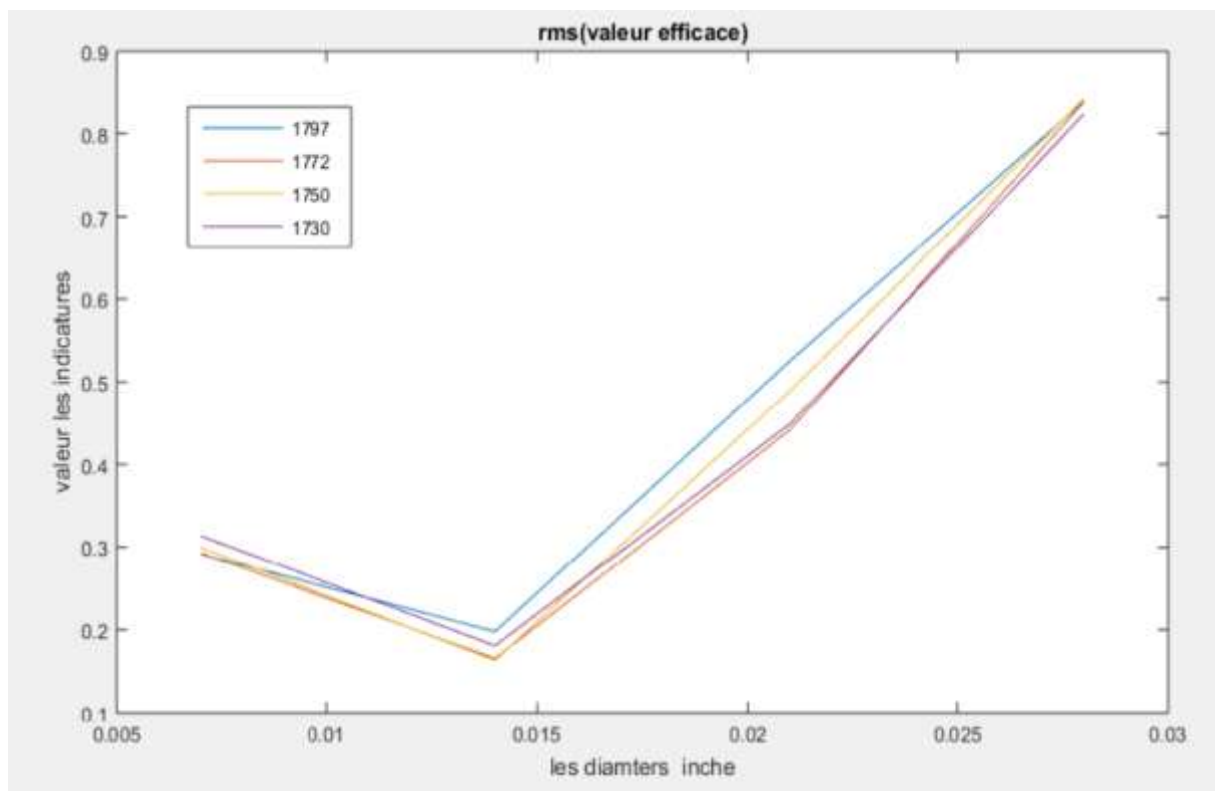
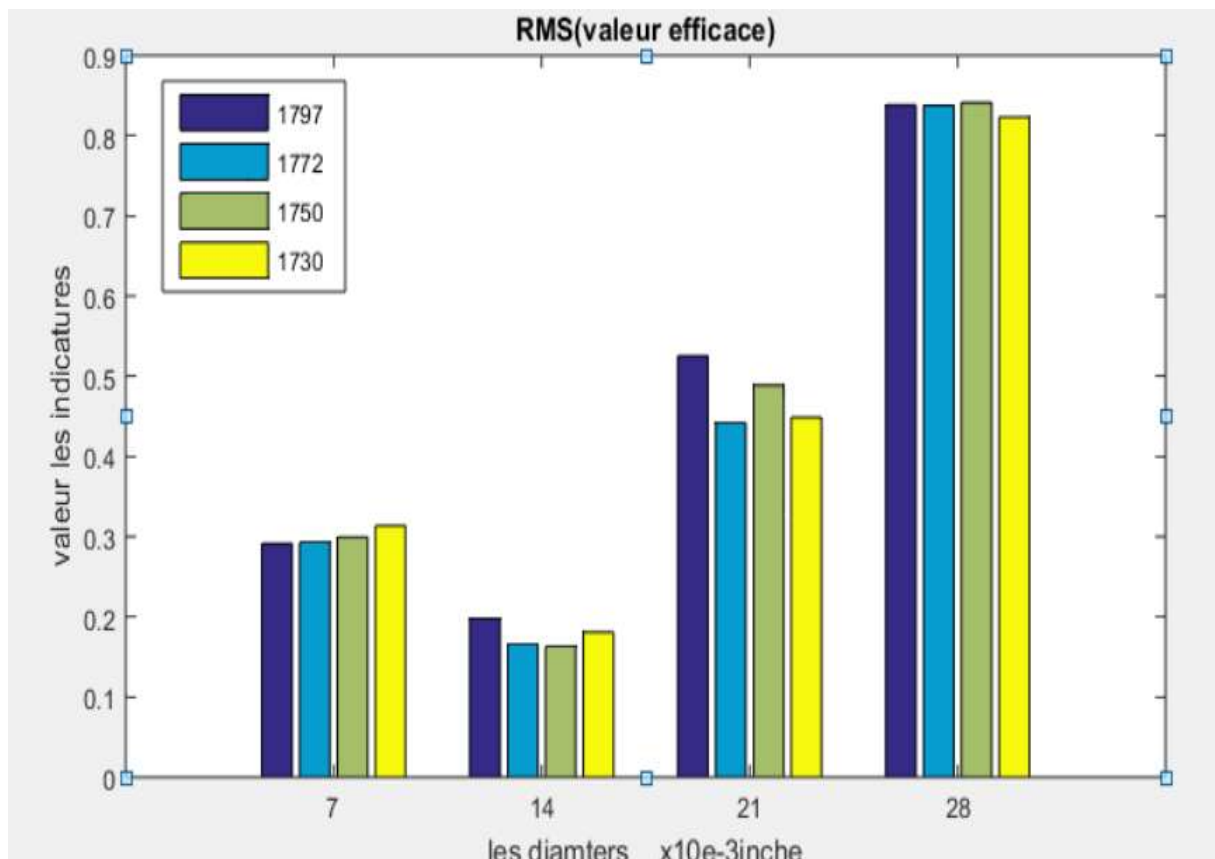


Figure IV.18: les valeurs l'indicateur RMS (valeur efficace)

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

Les valeur augment progressivement à mesure que les valeurs de charge changent de charge 0 à charge 3

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs pour charge 0 puis les valeurs le charge 1 et charge 2 presque égale mais pour charge 3 les valeur augment par rapport les valeurs de la charge 1 et charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par rapport la valeur de la charge 2

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeur le diamètre 0.028inche est valeur très grande par rapport les autres valeurs pour les autres diamètres et les trois charge 0,1,2 presque égale mais pour charge 3 la valeur diminue un peu par rapport les autres valeurs de trois charges.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

On peut voir que les valeurs sont décroissantes et croissantes d'un diamètre a l'autre, ce que signifie qu'il y a une sensibilité a cet indicateur

Pour valeur les diamètre 0.014inche diminuer par rapport le diamètre 0.007inche puis la valeur les diamètre 0.021inche augment par rapport les diamètre 0.014inche et le même pour la valeur les diamètre 0.028inche

Et le diamètre 0.028inche le grand diamètre en trames la valeur de l'indicateur RMS.

2) Peak :

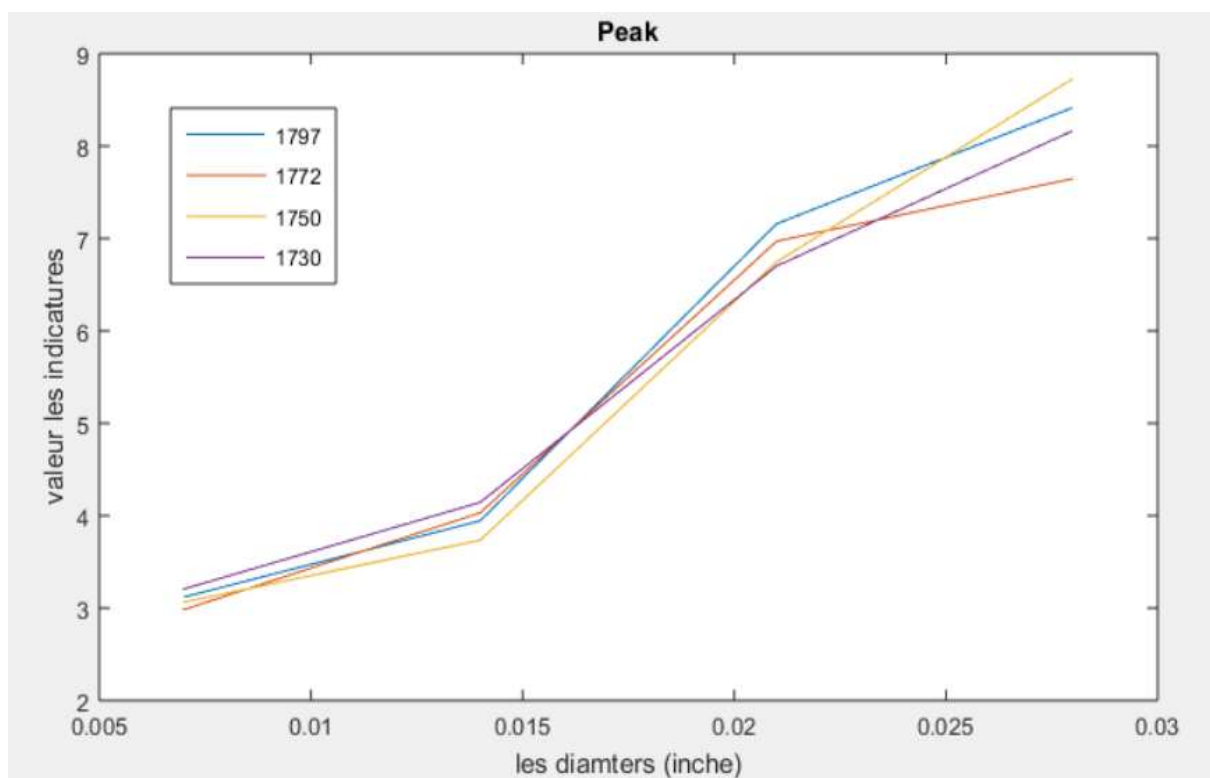
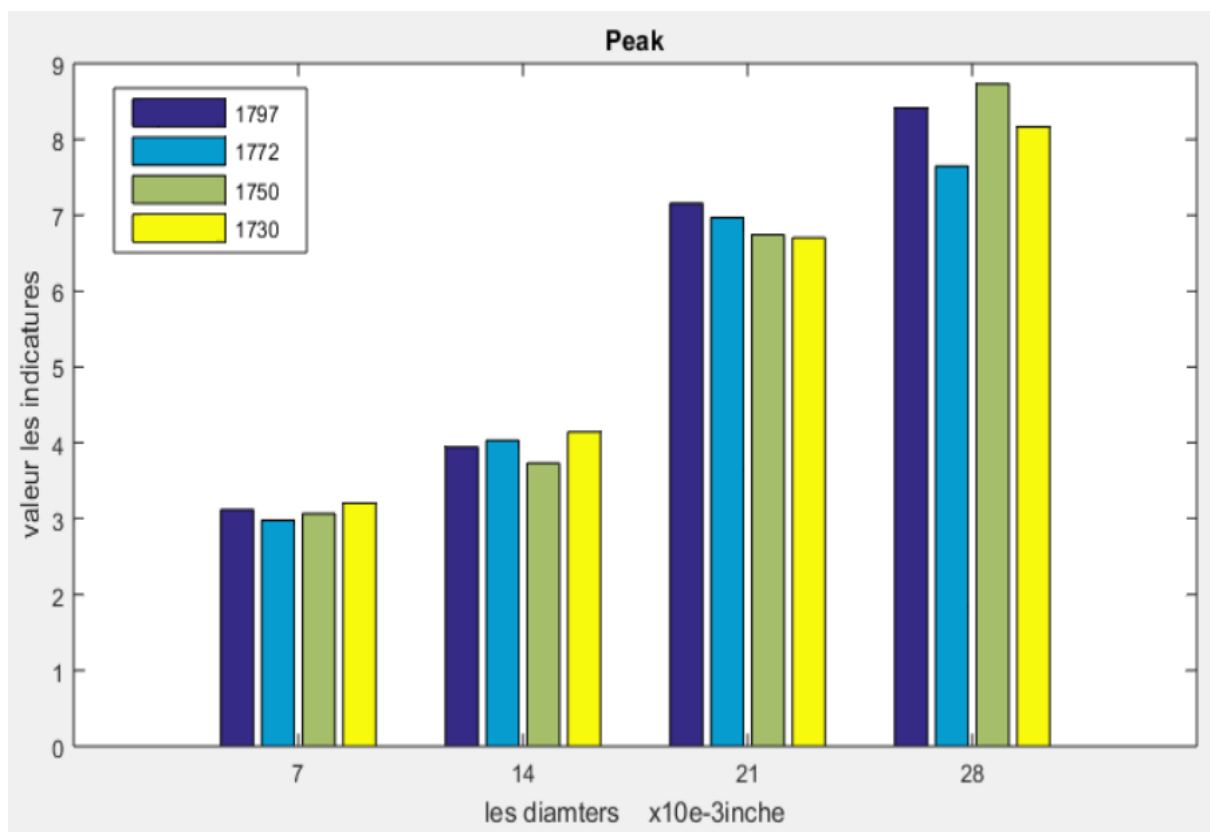


Figure IV.19: les valeurs l'indicateur Peak

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur de la charge 0 puis augment la valeur de la charge 2 par rapport le charge 1 et la même pour charge 3

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 augment par rapport la charge 0 puis diminuer la valeur de charge 2 par rapport le charge 1 puis augment la valeur de charge 3 par rapport le charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs pour chaque charge (charge 0 charge 1,2,3) diminuent progressivement de charge et la valeur de la charge 0 le très grandes par rapport les autres charges

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par rapport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs les quatre diamètres progressivement d'un diamètre a l'autres pour la valeur le diamètre 0.014inche plus grand par rapport le diamètre 0.007inche et le même pour la valeur le diamètre 0.021inche par rapport le diamètre 0.014inche et le même pour 0.0028inche par rapport le diamètre 0.021inche.

3) Skewness :

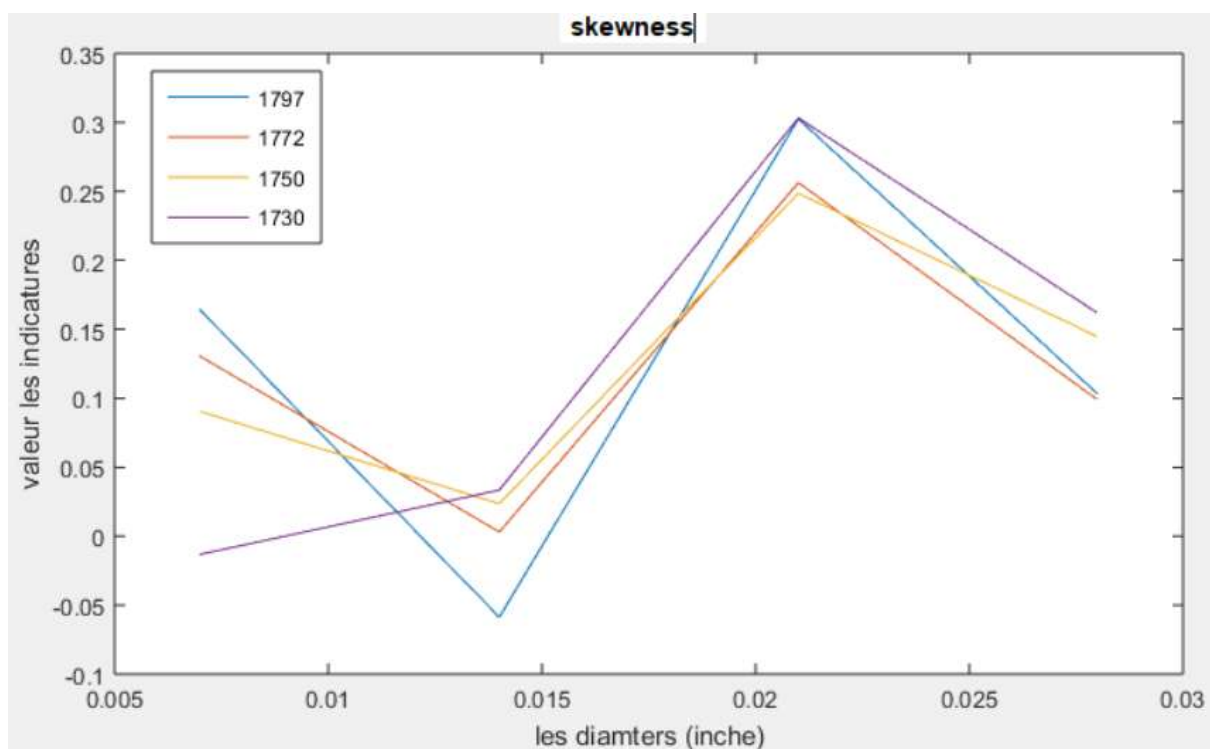
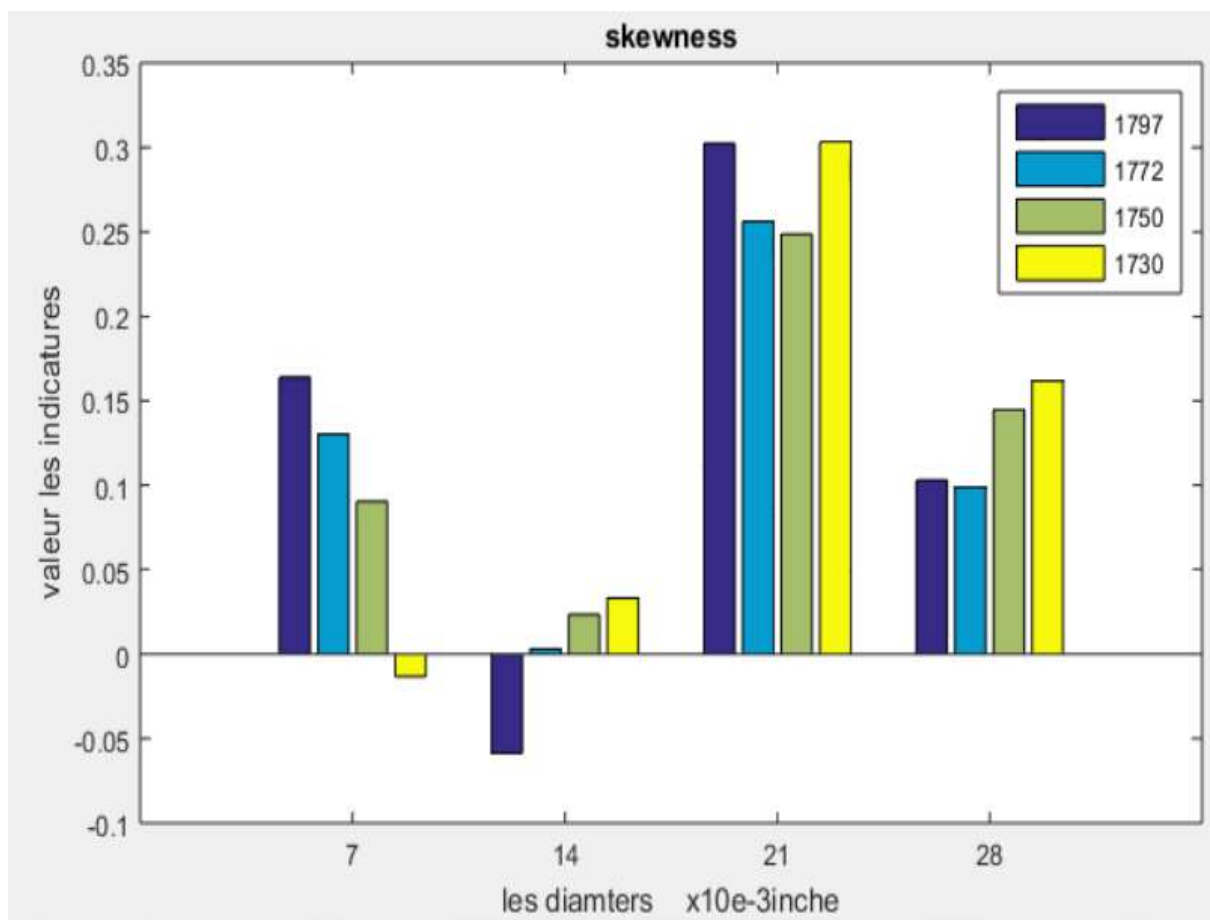


Figure IV.20: les valeurs l'indicateur skewness

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

On note les valeurs dans diamètre 0.007inche terrible chute et les valeurs pour charge 0 et très grandes par rapport les autres charge (1,2,3) et les autres diminue avec changement les charge, les valeurs de charge 1 diminue par rapport charge 0 puis charge 2 diminue par rapport charge 1 et ensuit.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

On note les valeurs dans diamètre 0.014inche en augmentant progressivement sens inverse le diamètre 0.007inche, ensuit la valeur pour charge 0 sont de valeur négative puis la valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et la valeur pour charge 2 augment par rapport la valeur de charge 1 et le même pour la charge 3.

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeur diamètre 0.021inche et plus grandes par rapport les autres diamètres et la valeur de charge 1 diminue par rapport charge 0 paracerque la valeur charge 0 et très grande par rapport les autres charges, ensuit le charge 2 diminue par rapport charge 1 puis la valeur charge 3 augment par rapport les charge 1 et 2 mais par rapport charge 0 presque égale

4) Pour le diamètre 0.028inche :

La valeur pour charge 1 presque égale la valeur charge 1 puis les valeurs charges 2 et 3 augments par rapport les autres charges, ensuit la valeur charge 3 augment par rapport charge 2

III) Pour différente diamètre et fixe la charge :

On peut voir que les valeurs sont décroissantes et croissantes d'un diamètre a l'autre, ce que signifie qu'il y a une sensibilité a cet indicateur

Pour valeur les diamètre 0.014inche diminuer par rapport le diamètre 0.007inche puis la valeur les diamètre 0.021inche augment par rapport les diamètre 0.014inche et la valeur de diamètre 0.021inche plus grande par rapport les autres diamètres, ensuit la valeur diamètre 0.028inche diminue par rapport le diamètre 0.021inche.

5) Kurtosis :

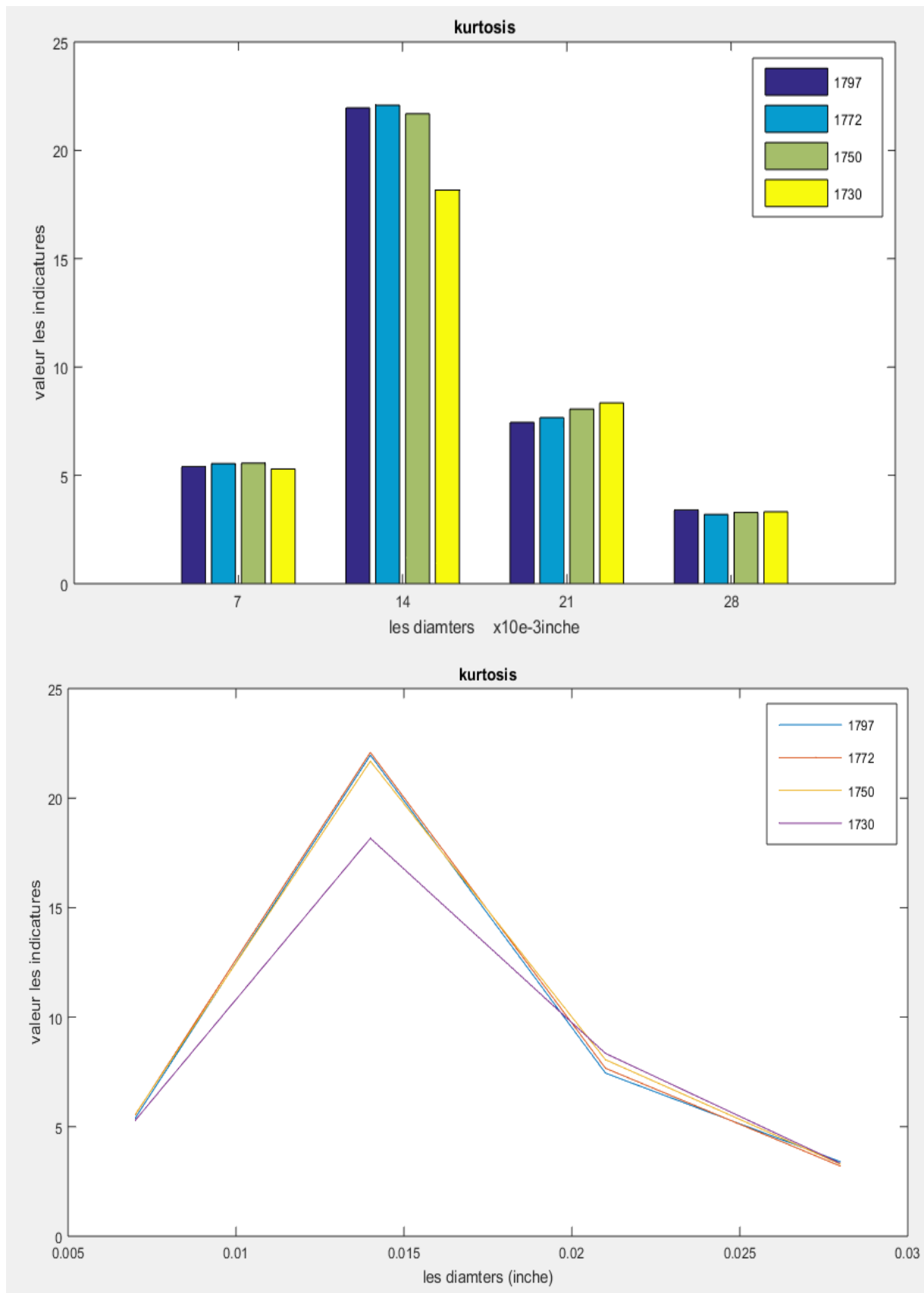


Figure IV.21: les valeurs l'indicateur kurtosis

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

On note la valeur le charge 1 augment par apport charge 0 et le charge 1 et 2 presque égale puis la valeur charge 3 diminue par apport le charge 2

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeurs de diamètre 0.014inche et très grandes par apport les autres diamètres le la valeur de charge 1 augment par apport charge 0 puis la valeur de charge 2 diminue par apport le charge 1 puis la valeur le charge 3 diminue par apport le charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs les quatre charges progressivement d'une charge à l'autres, ensuit la valeur de charge 1 augment par apport la valeur de charge 0 et le même pour las autres charges

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeurs des charges (0,1,2,3) presque égale

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

On peut voir que les valeurs sont décroissantes et croissantes d'un diamètre a l'autre, ce que signifie qu'il y a une sensibilité a cet indicateur

Le diamètre 0.014inche augment par apport le diamètre 0.007inche et pour le diamètre 0.021inche diminue par apport le diamètre 0.014inche, ensuit la valeur le diamètre de charge 3 diminue par apport la valeur le charge 2

Et la valeur le diamètre 0.014inche et très grandes par apport les autres diamètres

5) Crest factor :

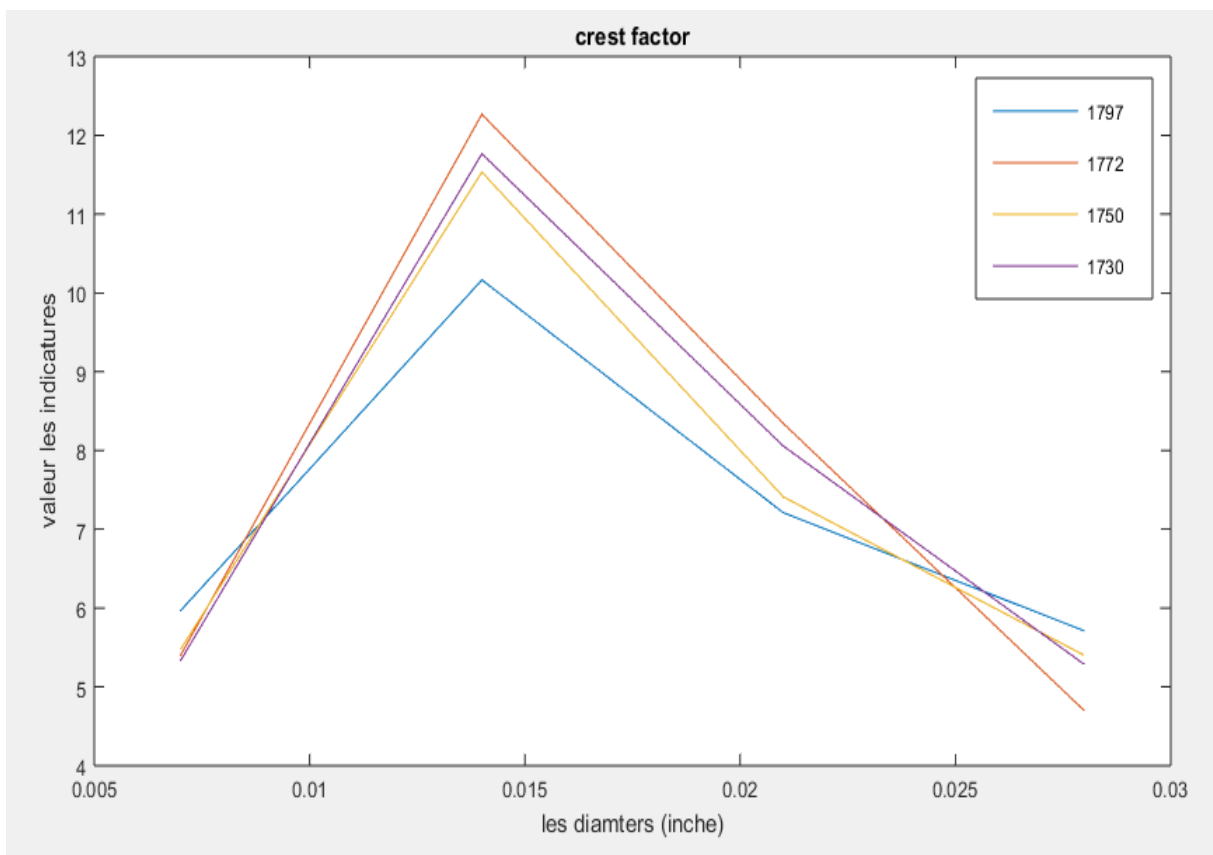
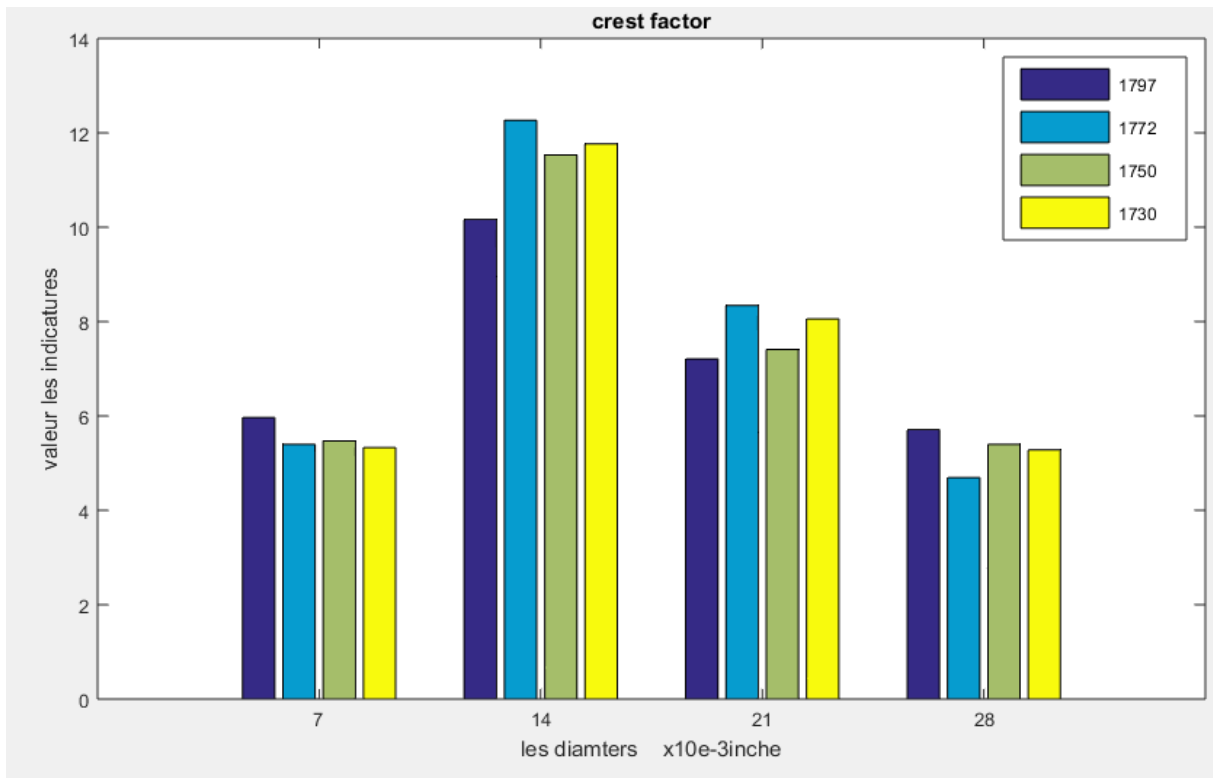


Figure IV.22: les valeurs l'indicateur Crest factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

La valeur pour charge 1 diminue par apport la valeur charge 0 puis les trois charge (1.2.3) presque égale, et la valeur de charge 0 très grande par apport les autres charges

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 augment par apport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par apport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par apport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par apport le charge 2 puis la valeur de charge 3 augment par apport le charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de charge 1 augment par apport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par apport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par apport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par apport le charge 2 puis la valeur de charge 3 augment par apport le charge 2

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par apport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par apport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par apport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.014inche très grande par apport les autres diamètres.

Les valeurs le diamètre 0.007inche plus petit que me diamètre 0.014inche et le même pour le diamètre 0.021inche par apport le diamètre 0.014inche, et le diamètre 0.028inche est plus jeune que les autres diamètres,

6) Shape factor :

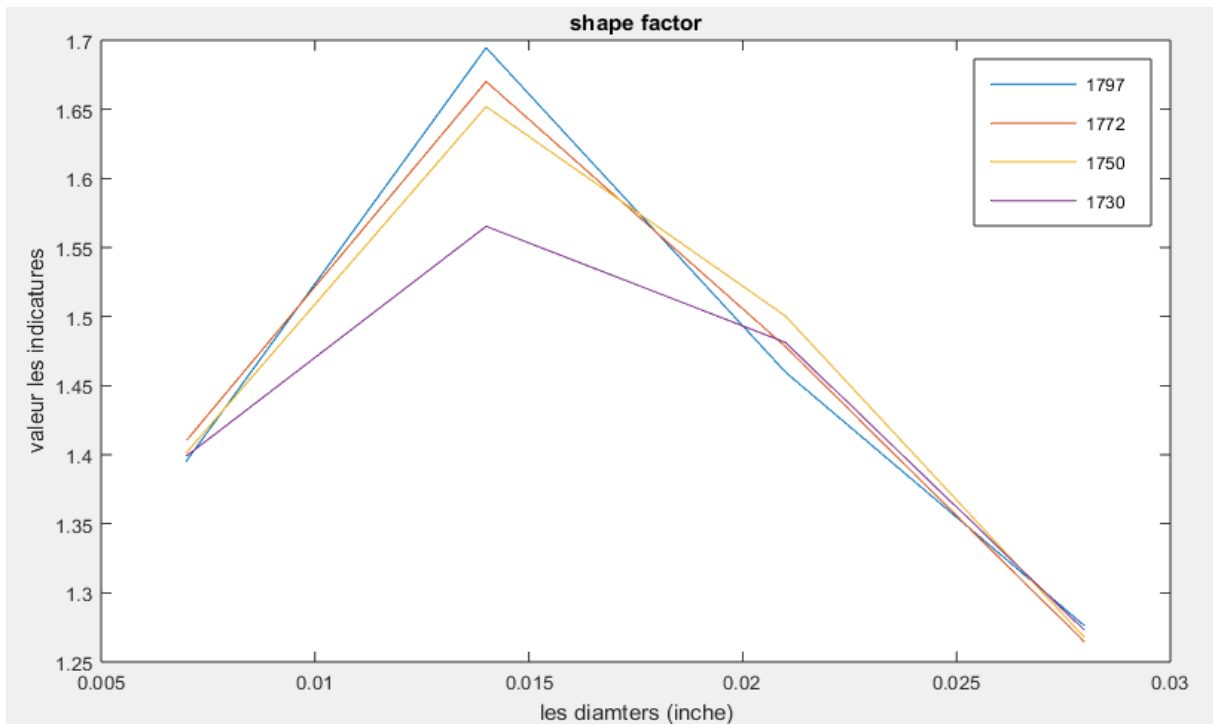
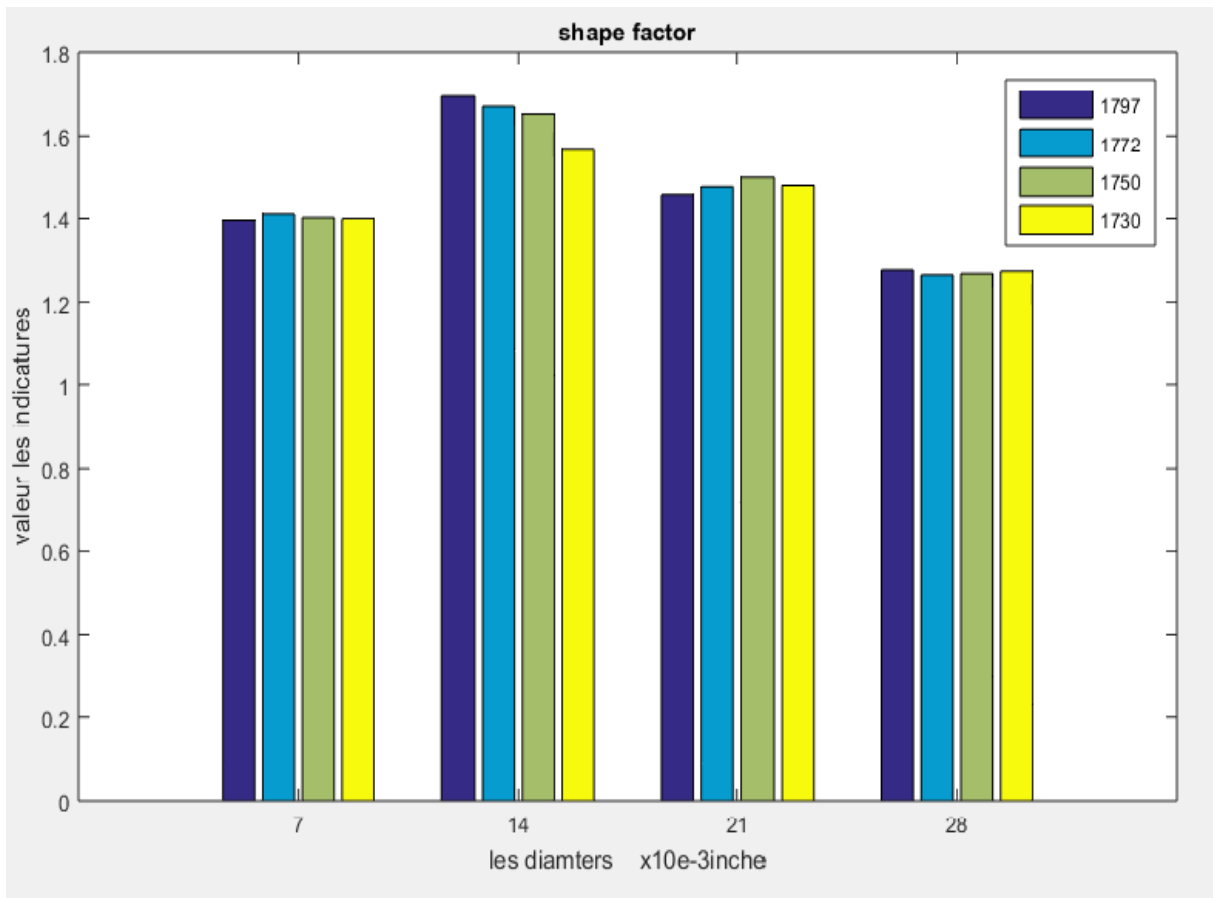


Figure IV.23: les valeurs l'indicateur Shape factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

Les quatre valeurs pour le diamètre 0.007inche presque égale

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeurs pour chaque charge (charge 0 charge 1,2,3) diminuent progressivement de charge et la valeur de la charge 0 le très grandes par apport les autres charges

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les trois valeurs pour trois charge (0,1,2) augmente progressivement puis diminue pour la charge 3

Pour la valeur de charge 1 augment par apport charge 0 et le même pour charge 2 par apport le charge 1 et la valeur charge 2 très grande par apport les autres charges, ensuit la valeur de charge 3 diminue par apport les autres charges.

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les quatre valeurs pour chaque charge presque égale

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs pour diamètre 0.014inche très grandes par apport les autres diamètres

Les valeurs pour diamètre 0.014inche augment par apport le diamètre 0.007icche, puis le diamètre 0.021inche diminue par apport le 0.014inche, ensuit la valeur le diamètre 0.028inche diminue par apport la valeur diamètre 0.021inche

Et l'indicateur Shape factor et l'indicateur stable par apport les autres indicateurs

7) Impulse factor :

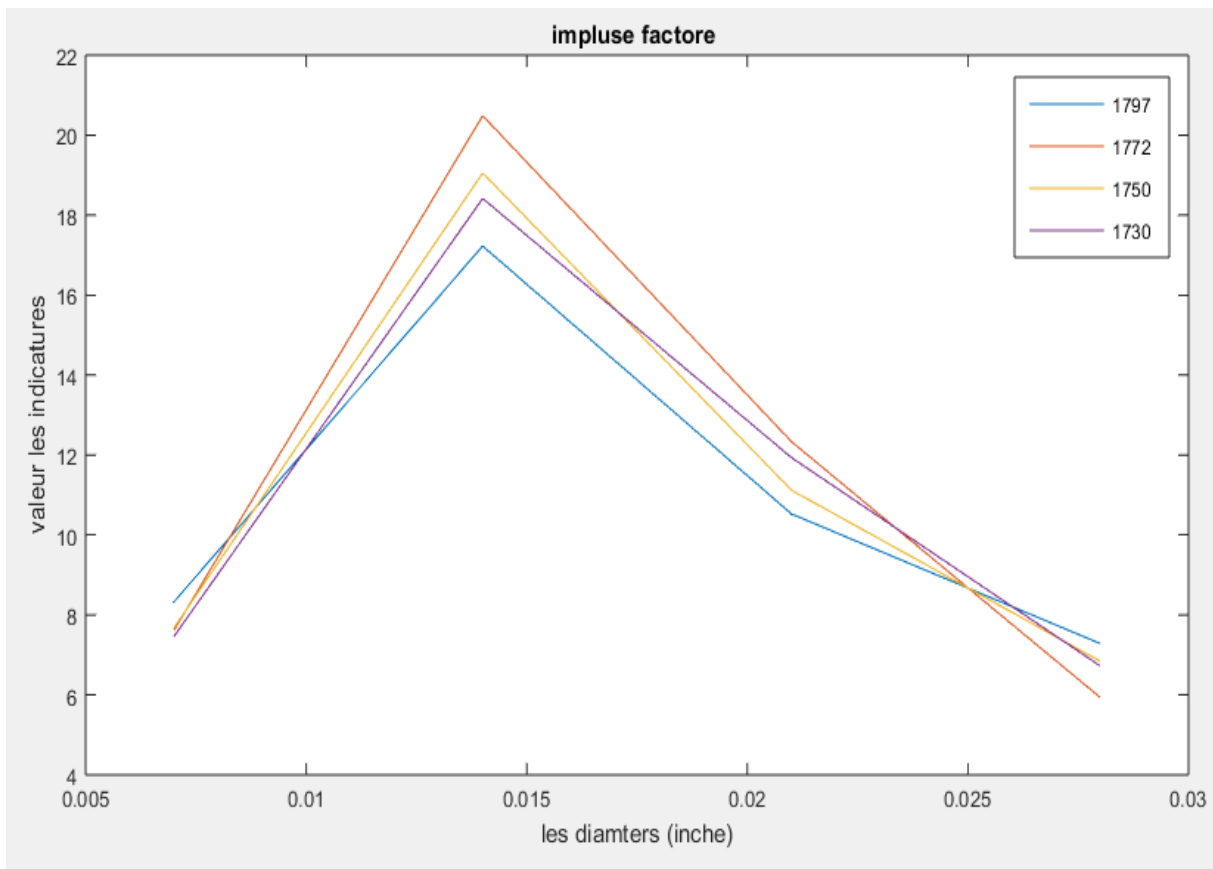
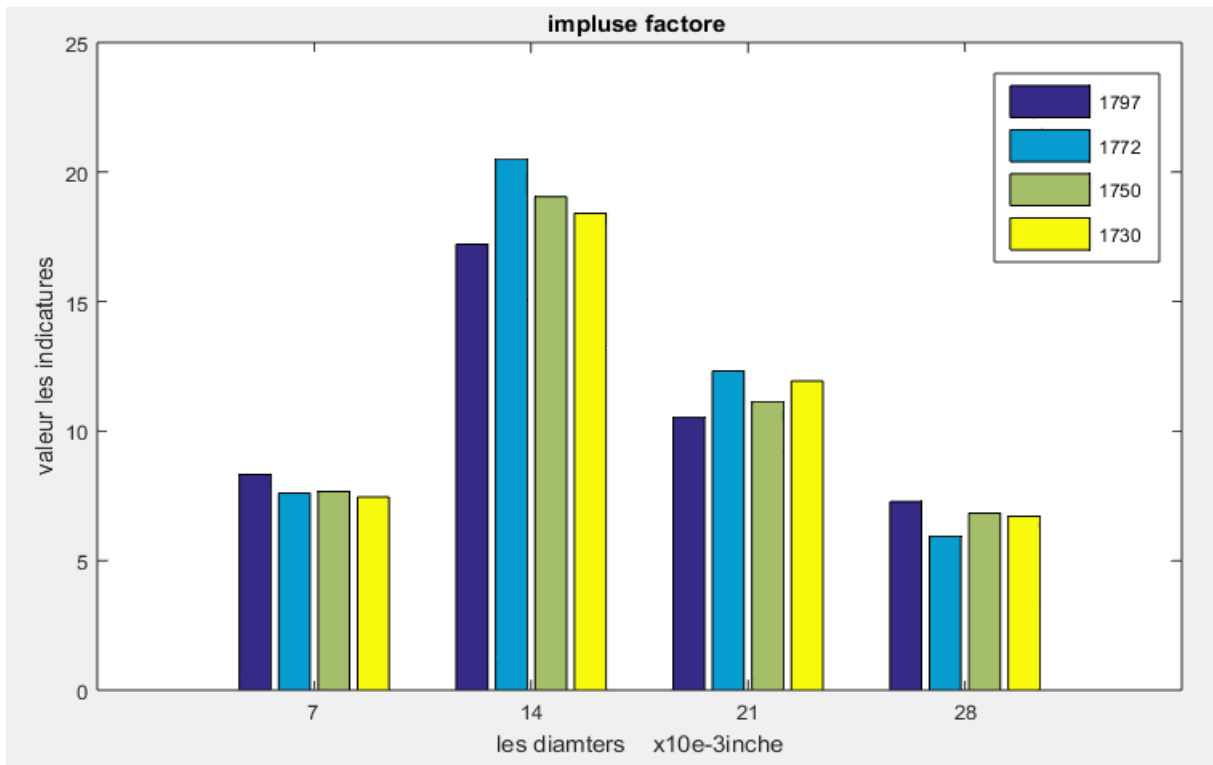


Figure IV.24: les valeurs l'indicateur impulse factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis les trois charge (1.2.3) presque égale, et la valeur de charge 0 très grande par rapport les autres charges

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par rapport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par rapport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2 puis la valeur de charge 3 diminue par rapport le charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par rapport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par rapport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par rapport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.014inche très grande par rapport les autres diamètres.

Les valeurs le diamètre 0.007inche plus petit que me diamètre 0.014inche et le même pour le diamètre 0.021inche par rapport le diamètre 0.014inche, et le diamètre 0.028inche est plus jeune que les autres diamètres,

8) **TALAF :**

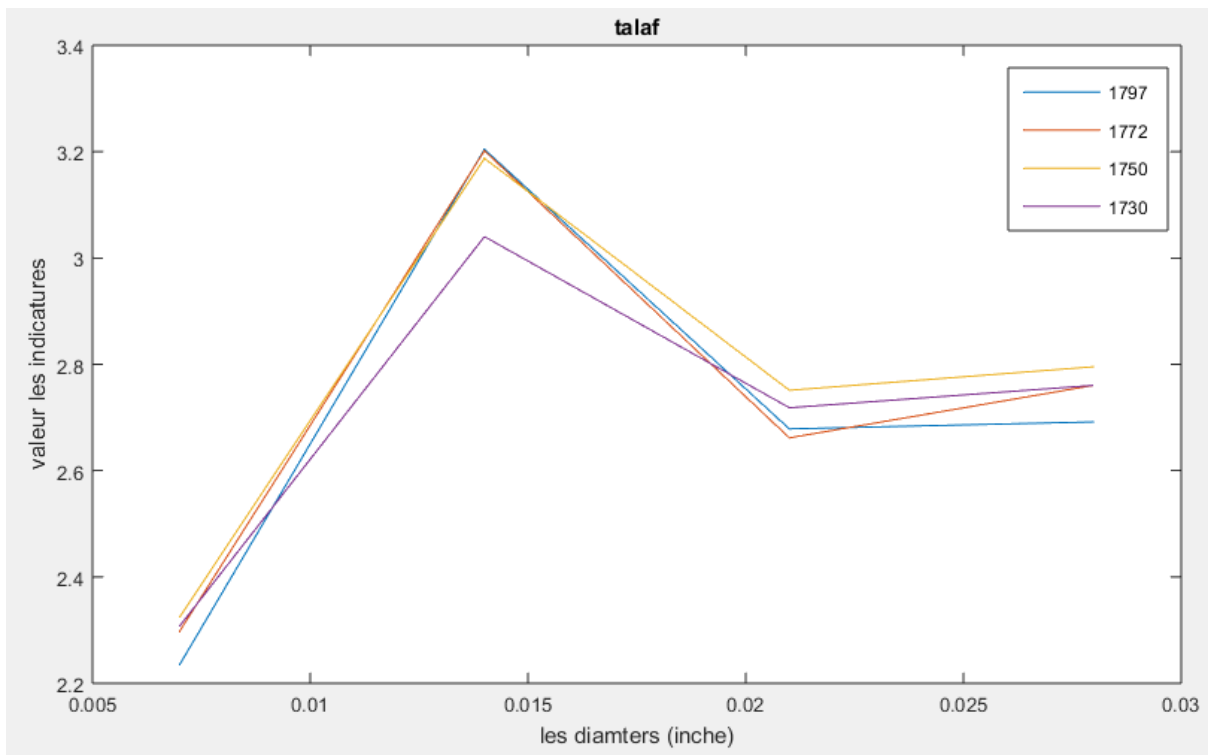
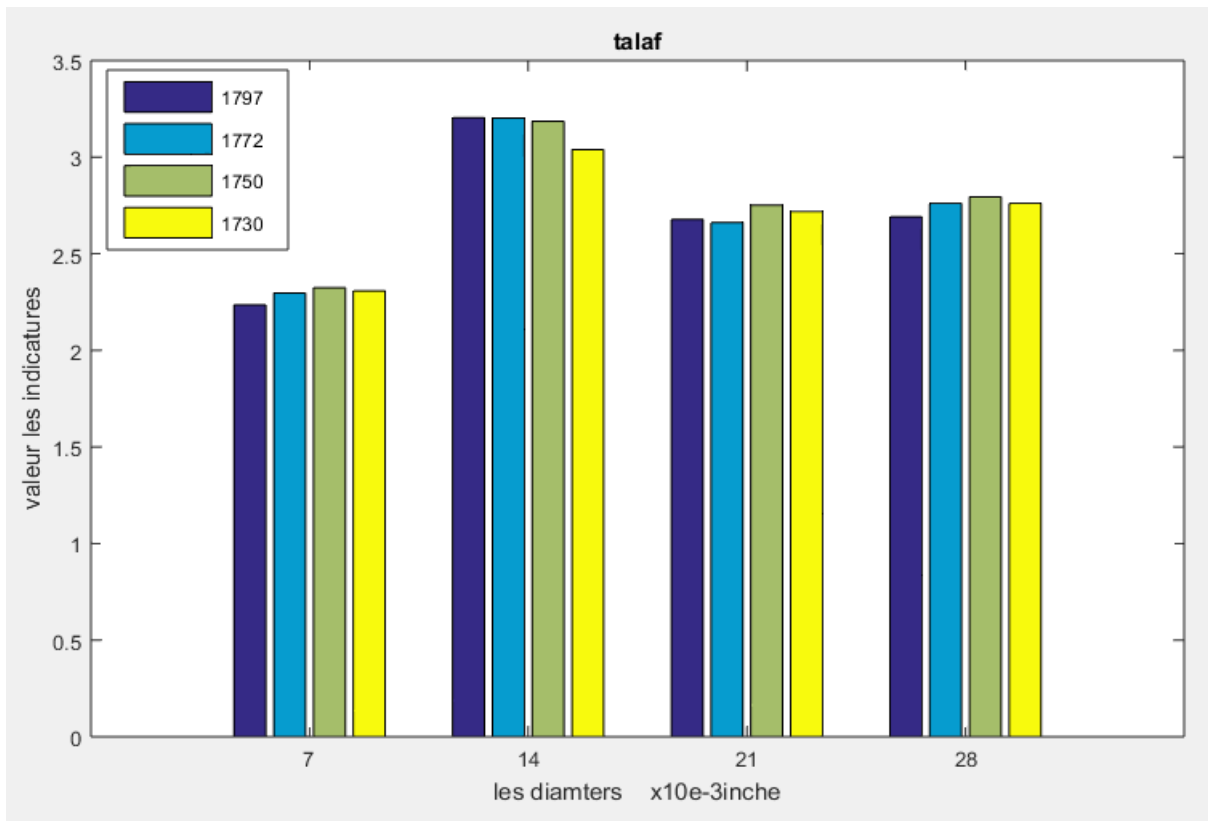


Figure IV.25: les valeurs l'indicateur Talaf

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

Notons que la valeur pour charge 1 augment par apport charge 0 et le même pour charge 2 par apport le charge 1, et le charge 2 et 3 presque les valeurs égale.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeur le diamètre 0.028inche est valeur très grande par apport les autres valeurs pour les autres diamètres et les trois charge 0,1,2 presque égale mais pour charge 3 la valeur diminue un peu par apport les autres valeurs de trois charges

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Pour les deux valeurs de charge 0 et charge 1 presque égale mais moins se la valeur de charge 2 et la charge 2 augment par apport les charges 1 et 2

Mais pour la valeur charge 3 diminue par apport le charge 2

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les trois valeurs pour trois charge (0,1,2) augmente progressivement puis diminue pour la charge 3

Pour la valeur de charge 1 augment par apport charge 0 et le même pour charge 2 par apport le charge 1 et la valeur charge 2 très grande par apport les autres charges, ensuite la valeur de charge 3 diminue par apport les autres charges.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs pour diamètre 0.014inche très grandes par apport les autres diamètres

Les valeurs pour diamètre 0.014inche augment par apport le diamètre 0.007icche, puis le diamètre 0.021inche diminue par apport le 0.014inche, ensuite la valeur le diamètre 0.028inche augment par apport la valeur diamètre 0.021inche

Et l'indicateur TALAF et l'indicateur Shape factor le même est stable par apport les autres indicateurs

9) **THIKAT** :

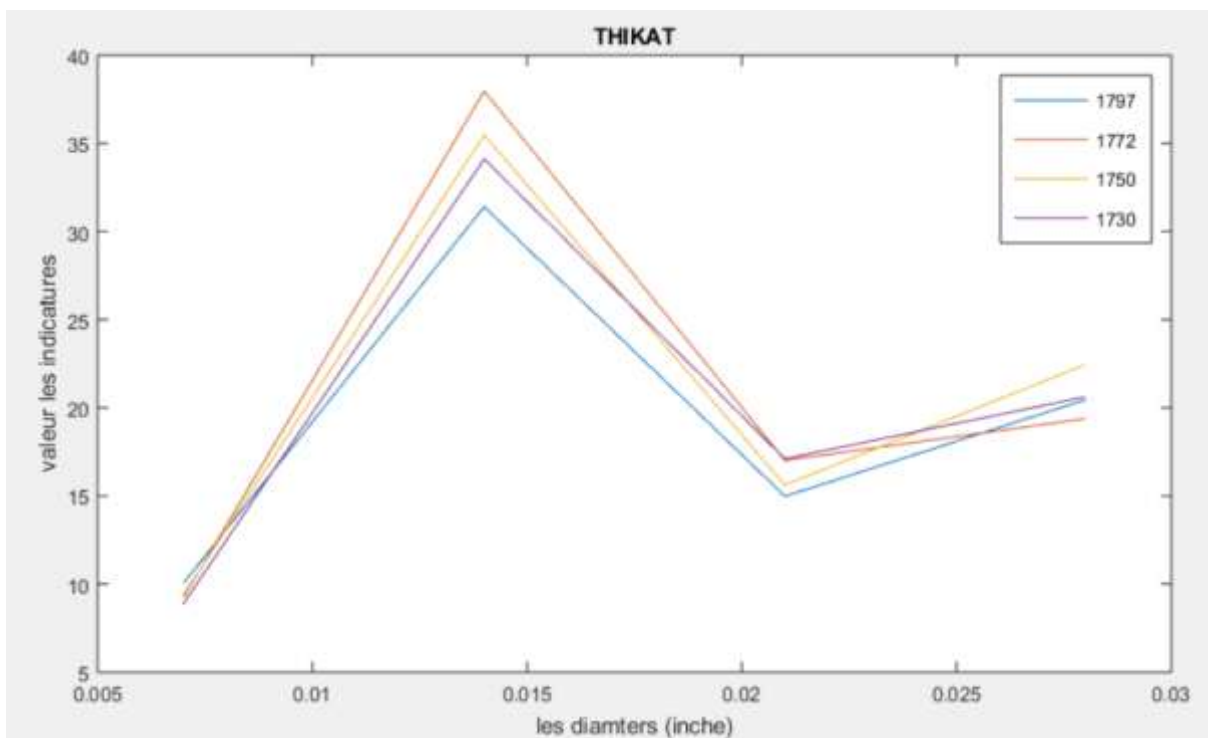
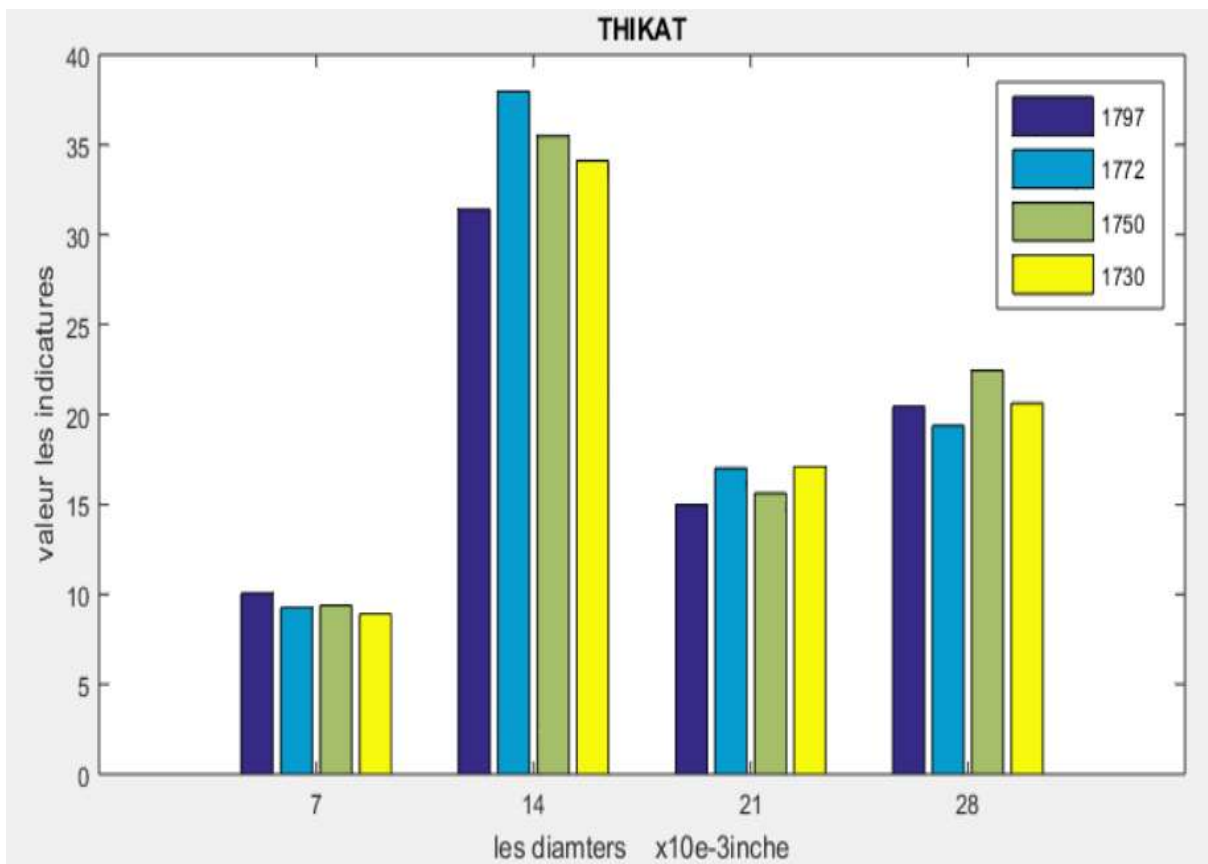


Figure IV.26: les valeurs l'indicateur THIKAT

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente la charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis les trois charge (1.2.3) presque égale, et la valeur de charge 0 très grande par rapport les autres charges

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par rapport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par rapport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2 puis la valeur de charge 3 diminue par rapport le charge 2

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de charge 1 augment par rapport le charge 0 et valeur le charge 1 très grande par rapport les autres charges, puis diminue valeur de la charge 2 par rapport charge 1 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2 puis la valeur de charge 3 augment par rapport le charge 2

4) Pour le diamètre 0.028inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par rapport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.014inche très grande par rapport les autres diamètres.

Les valeurs le diamètre 0.007inche plus petit que me diamètre 0.014inche et le même pour le diamètre 0.021inche par rapport le diamètre 0.014inche, ensuite le diamètre 0.028inche augment par rapport le diamètre 0.021inche.

10) Commenter General :

Les valeurs pour chaque indicateur pour le défaut baguette intérieure et pour chaque charge et diamètre il ne pas la même valeur au contraire il est variable pour certains

Tous indicateurs variables pour certains par rapport les charges ou le diamètre il y a aussi une sensibilité entre la charge et autre charge et le même pour le diamètre et la raison à vibration de machine

Tout ce qui s'est passé a changé dans l'indicateurs pour charge à l'autre et le même pour le diamètre cela nous avertit des futurs défauts du moteur

Quant à les indicateurs presque tous sont instable mais l'indicateur ce qui nous aide à comprendre ce qui ne va pas :

- 1) Shape factor
- 2) TALAF

Le travail de ces indicateurs est d'avertir de l'existence de l'erreur ou de son apparition dans le futur et Lorsque ces valeurs dépassent le seuil d'alarme, pour détecter la présence d'anomalie.

5.3) Pour Défaut de la bague extérieure :

5.3.1) Pour la charge 0 : 1797tr/min

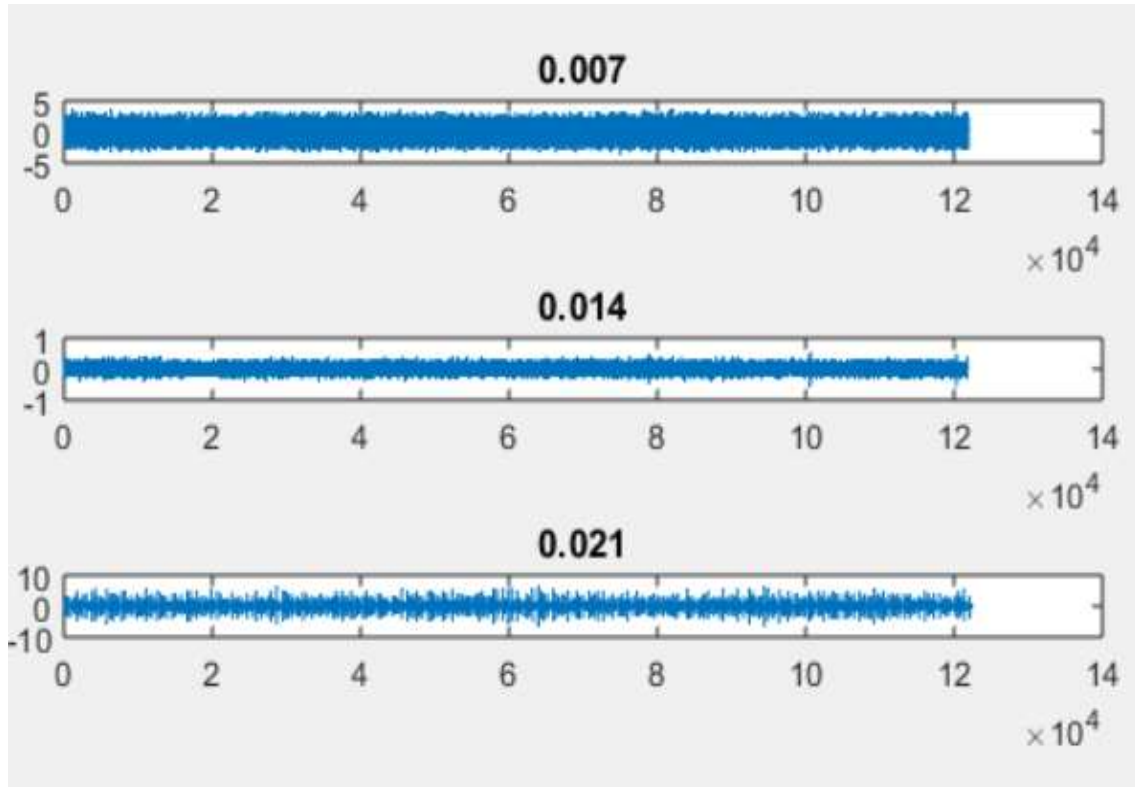


Figure IV.27: les charges pour défaut baguette extérieure pour la charge 0

Les résultats pour 3 diamètres pour le défaut les bagues extérieures pour la charge 0 :

| | <i>rms</i> | <i>Peak2peak</i> | <i>skewness</i> | <i>Kurtosis</i> | <i>Crest factor</i> | <i>Shape factor</i> | <i>Impulse factor</i> | <i>talaf</i> | <i>THIKAT</i> |
|-------|------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| 0,007 | 0.6695 | 7.0391 | 0.0569 | 7.6494 | 5.4225 | 1.6501 | 8.9477 | 2.8167 | 15.5337 |
| 0,014 | 0.1007 | 1.1010 | 5.6179e-04 | 3.0560 | 5.4685 | 1.2543 | 6.8591 | 1.4862 | 6.1120 |
| 0,021 | 0.5832 | 13.0647 | 0.1049 | 21.0062 | 11.4082 | 1.9794 | 22.5815 | 3.3641 | 34.7363 |

Tableau IV.8: les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement Pour la charge 0 bague extérieure

5.3.2) Pour la charge 1 : 1772tr/min

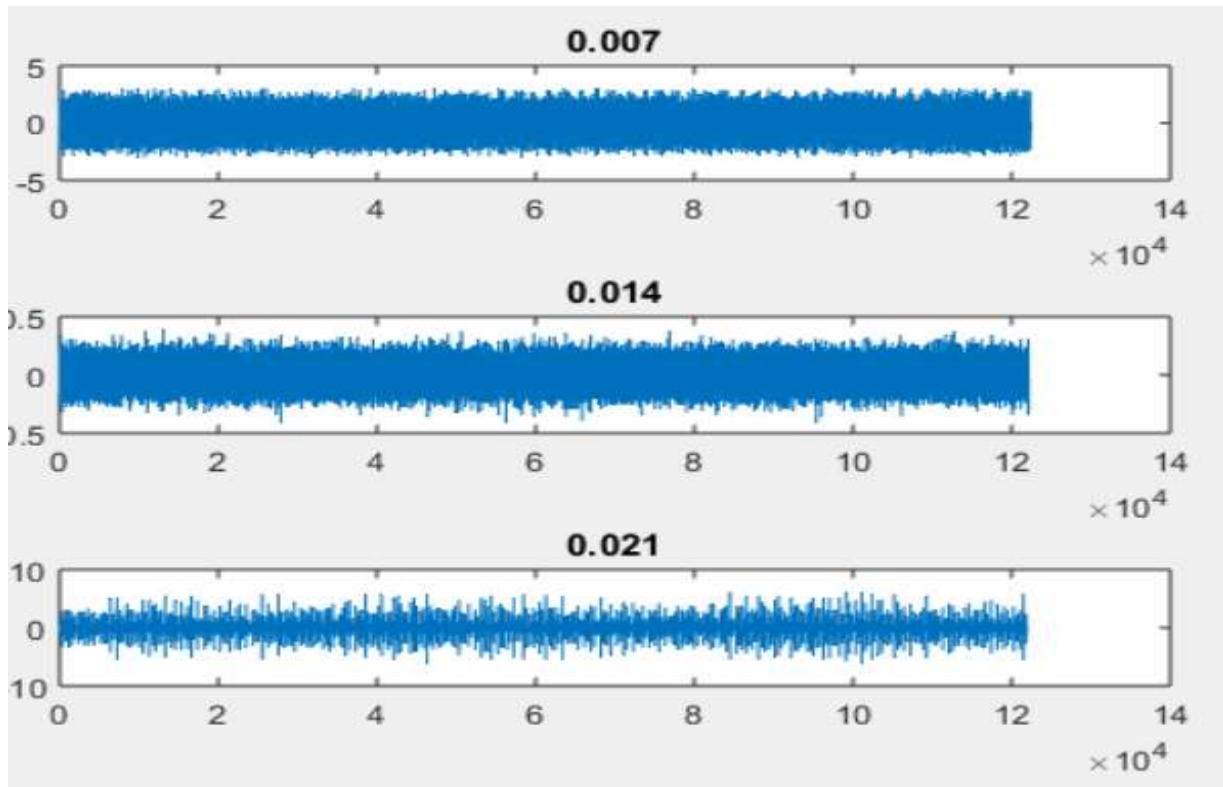


Figure IV.28: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 1

Les résultats pour 3 diamètres pour le défaut les bagues extérieures pour la charge 1 :

| | Rms | Peak2peak | skewness | Kurtosis | Crest factor | Shape factor | Impulse factor | talaf | THIKAT |
|-------|--------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|----------------|--------|---------|
| 0,007 | 0.5919 | 6.1242 | 0.0334 | 7.5950 | 5.2577 | 1.6153 | 8.4927 | 2.8040 | 13.4607 |
| 0,014 | 0.0936 | 0.7975 | 0.0089 | 2.9403 | 4.2920 | 1.2493 | 5.3619 | 1.4701 | 4.6418 |
| 0,021 | 0.5614 | 12.3199 | 0.1280 | 21.9707 | 11.0568 | 2.0070 | 22.1908 | 3.4153 | 34.1628 |

Tableau IV.9: les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement Pour la charge 1 bague extérieure

5.3.3) Pour la charge 2 :1750tr/min

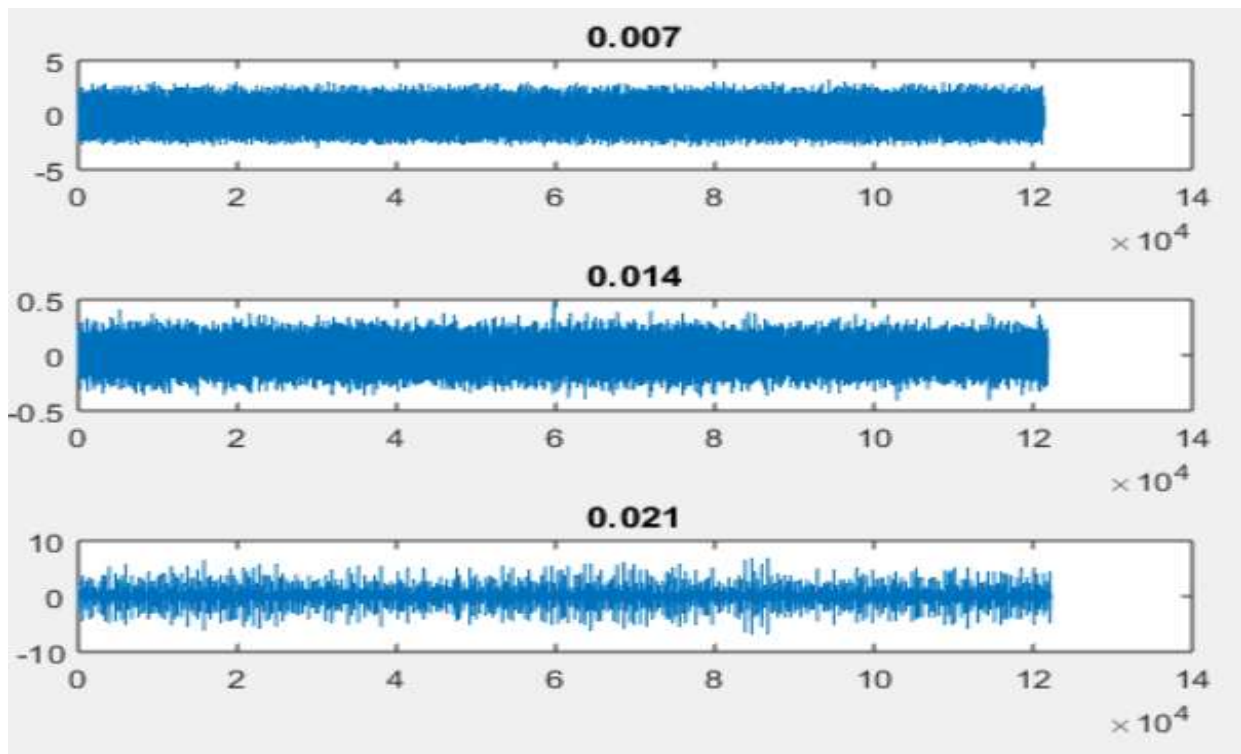


Figure IV.29: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 2

Les résultats pour 3 diamètres pour le défaut les bagues intérieures pour la charge 2 :

| | <i>Rms</i> | <i>Peak2peak</i> | <i>skewness</i> | <i>Kurtosis</i> | <i>Crest factor</i> | <i>Shape factor</i> | <i>Impulse factor</i> | <i>talaf</i> | <i>THIKAT</i> |
|-------|------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| 0,007 | 0.5702 | 6.1835 | 0.0195 | 7.8522 | 5.4392 | 1.6293 | 8.8624 | 2.8166 | 13.5916 |
| 0,014 | 0.0968 | 0.8873 | 2.0557e-04 | 3.0241 | 4.9313 | 1.2549 | 6.1884 | 1.5107 | 5.4632 |
| 0,021 | 0.5700 | 13.3063 | 0.1321 | 23.1639 | 11.6727 | 2.0361 | 23.7663 | 3.4666 | 36.6831 |

Tableau IV.10: les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement Pour la charge 2 bague extérieure

5.3.4) Pour la charge 3 :1730tr/min

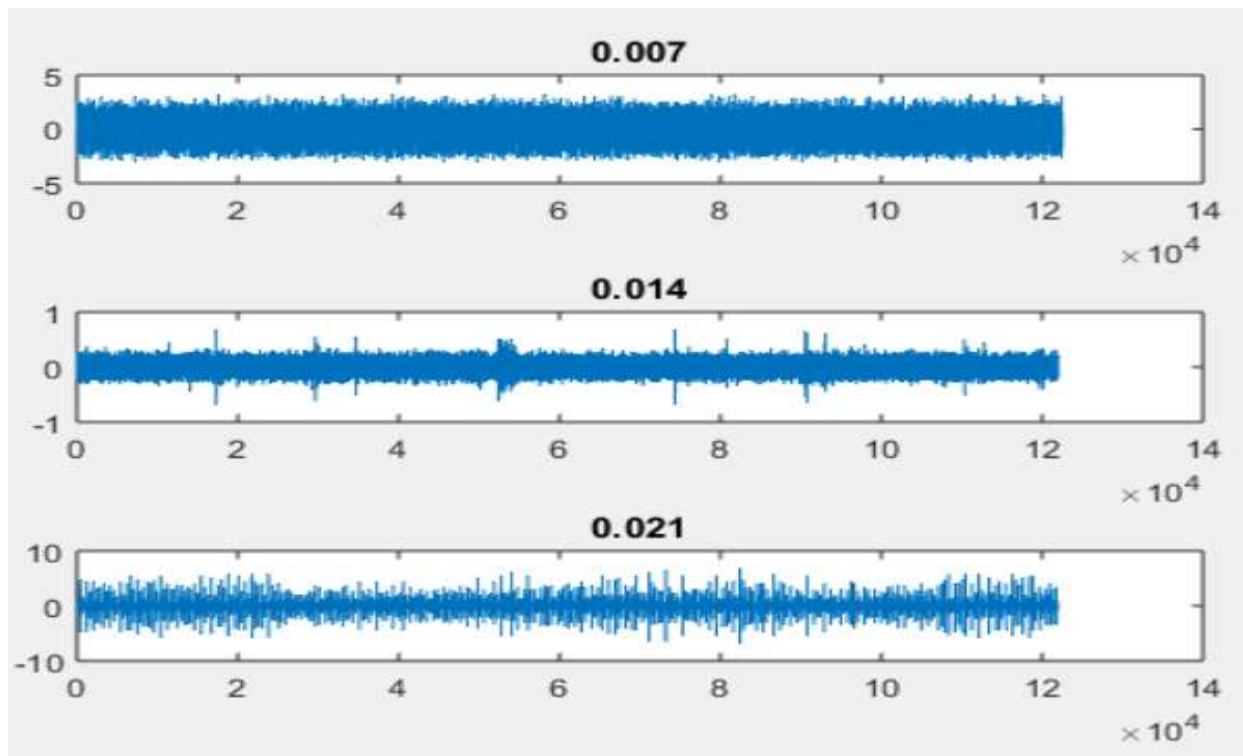


Figure IV.30: les charges pour défaut la bague extérieure pour la charge 3

Les résultats pour 3 diamètres pour le défaut les bagues extérieures pour la charge 3 :

| | rms | Peak2peak | skewness | Kurtosis | Crest factor | Shape factor | Impulse factor | talaf | THIKAT |
|-------|--------|-----------|----------|----------|--------------|--------------|----------------|--------|---------|
| 0,007 | 0.5804 | 6.2391 | -0.0021 | 7.9637 | 5.5757 | 1.6337 | 9.1092 | 2.8196 | 13.7001 |
| 0,014 | 0.0947 | 1.3303 | 0.0042 | 3.7970 | 7.0228 | 1.2703 | 8.9213 | 1.6552 | 9.3702 |
| 0,021 | 0.5590 | 13.3063 | 0.1301 | 23.5420 | 11.9019 | 2.0535 | 24.4404 | 3.4665 | 37.5957 |

Tableau IV.11: les résultats des indicateurs scalaires des défauts de roulement Pour la charge 3 bague extérieure

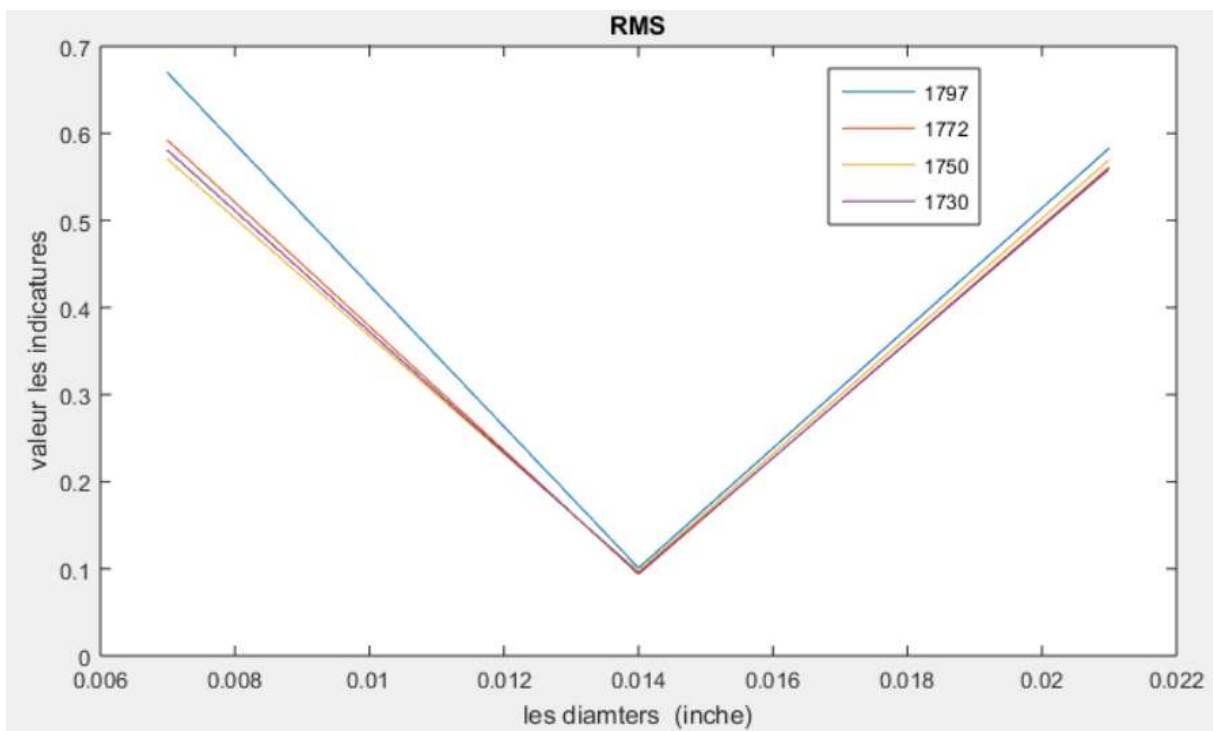
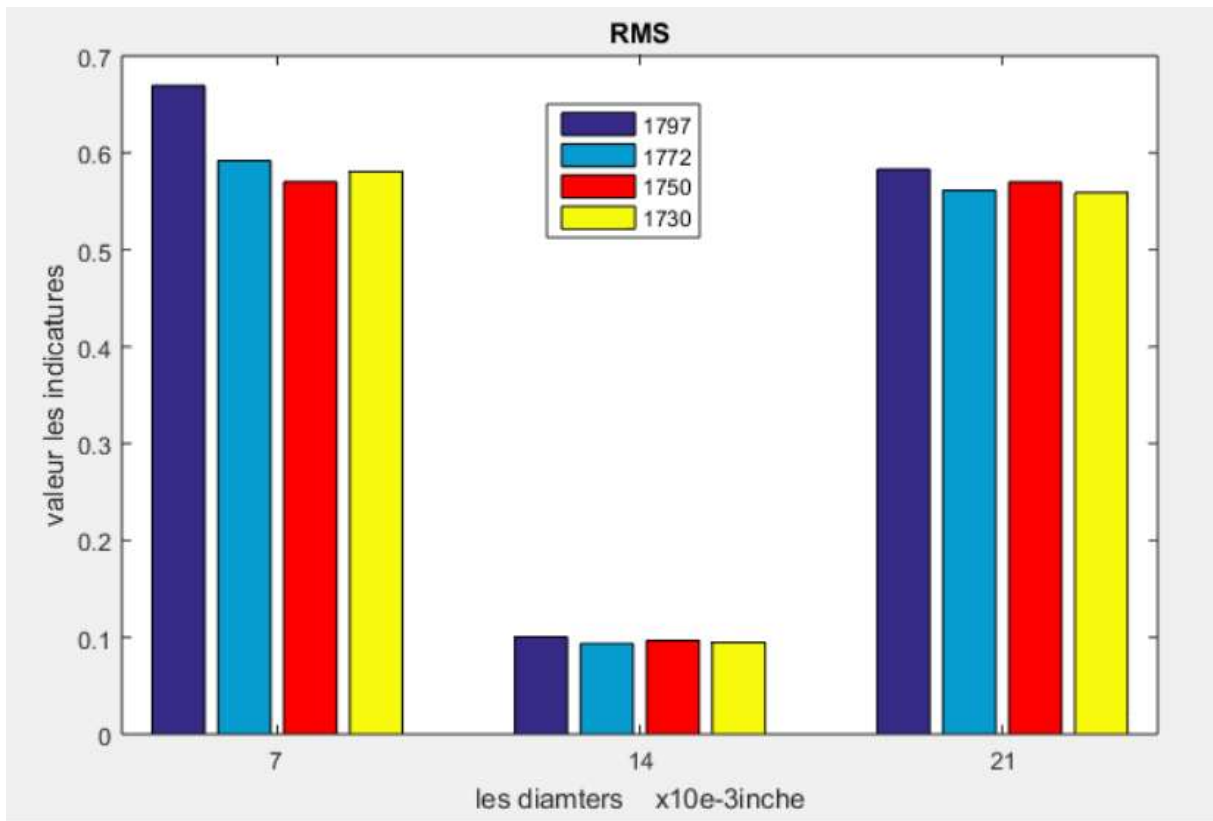


Figure IV.31: les valeurs l'indicateur RMS (valeur moyen)

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis la charge 2 diminue par rapport le charge 1, et la valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2.

Et la valeur de charge 0 très grande par rapport les autres charges

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis les trois charge (1.2.3) presque égale, et la valeur de charge 0 très grande par rapport les autres charges

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 diminue par rapport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.007inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration n'a pas affecté l'indicateur RMS pour diamètre 0.014inche

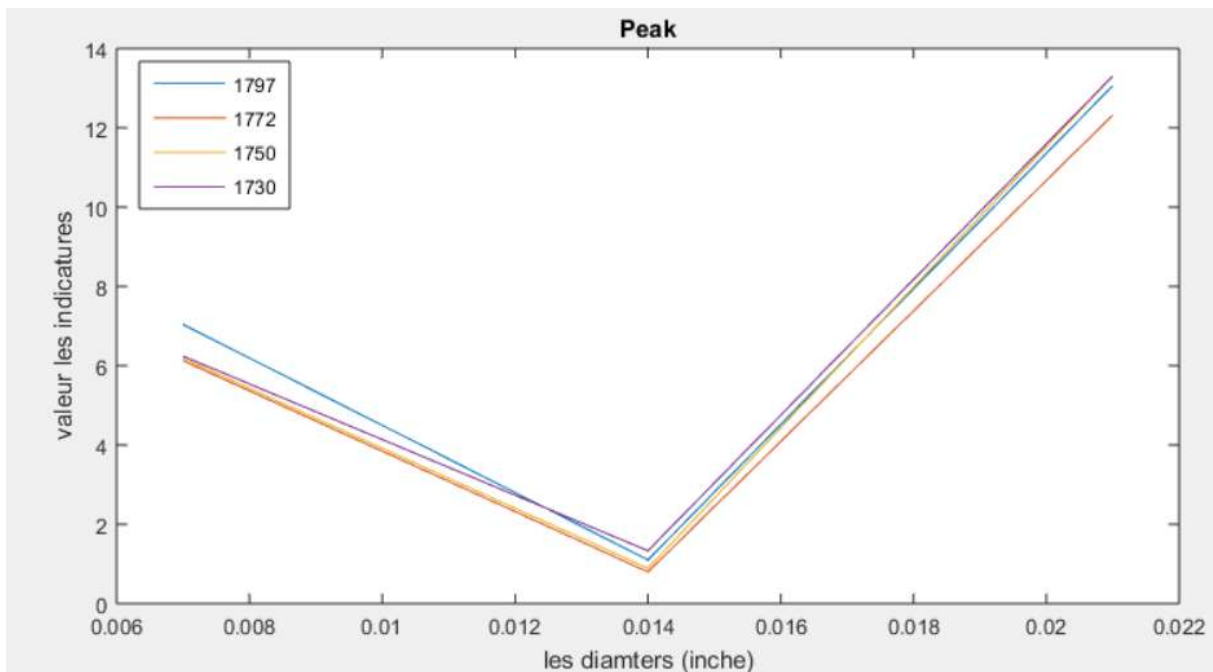
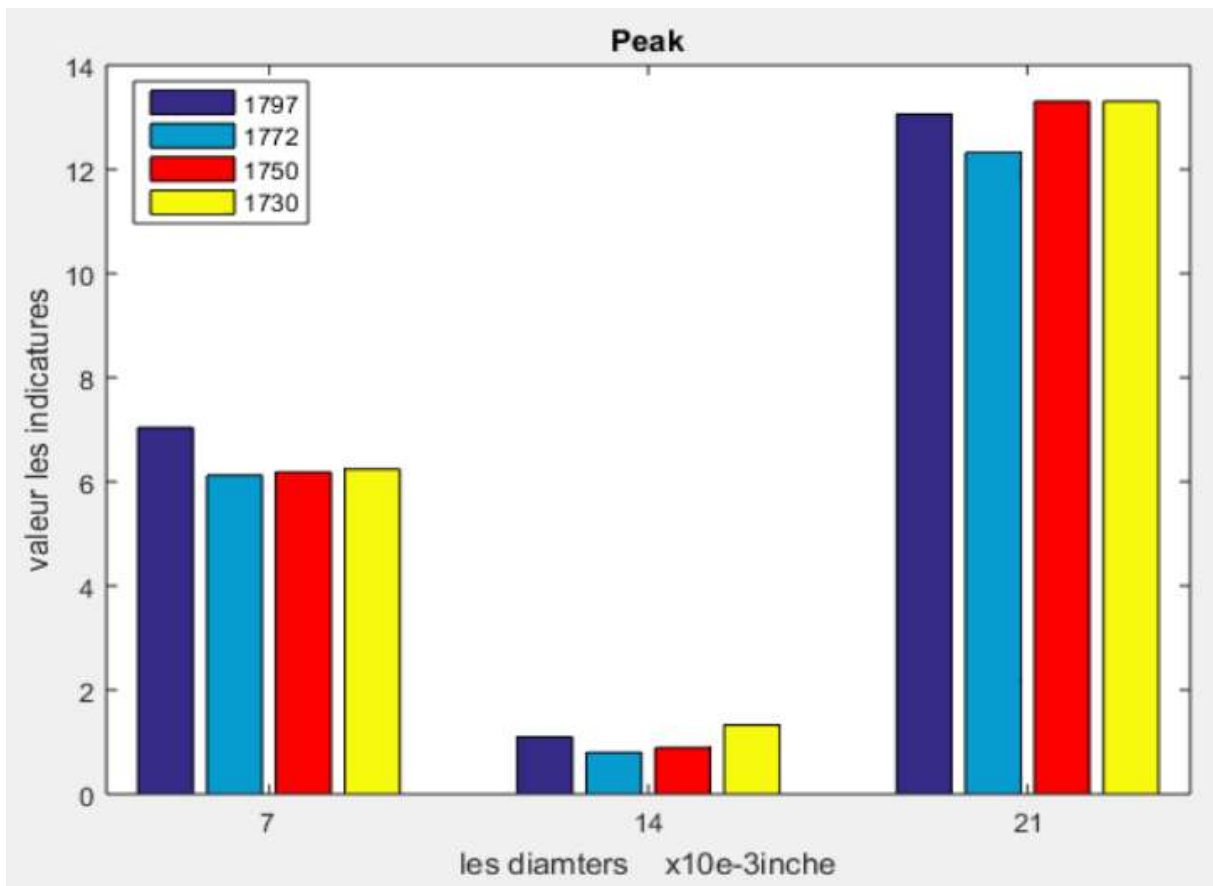


Figure IV.32: les valeurs l'indicateur Peak

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis les trois charge (1.2.3) presque égale, et la valeur de charge 0 très grande par rapport les autres charges

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur charge 0 puis la charge 2 augment par rapport le charge 1, et la valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2. Et la valeur de charge 3 grande valeur par rapport les autres charges

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs pour charge 1 diminue par rapport les valeurs de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 et la valeur de charge 2 presque égale.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration n'a pas affecté l'indicateur RMS pour diamètre 0.014inche

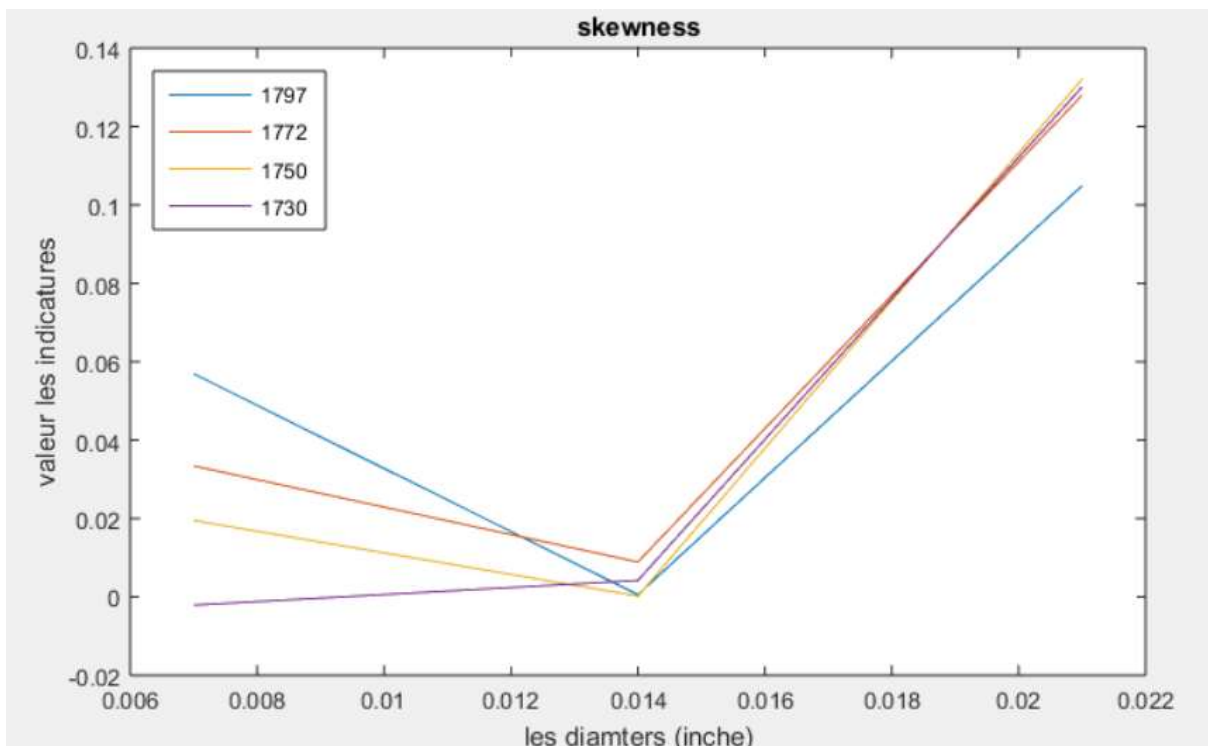
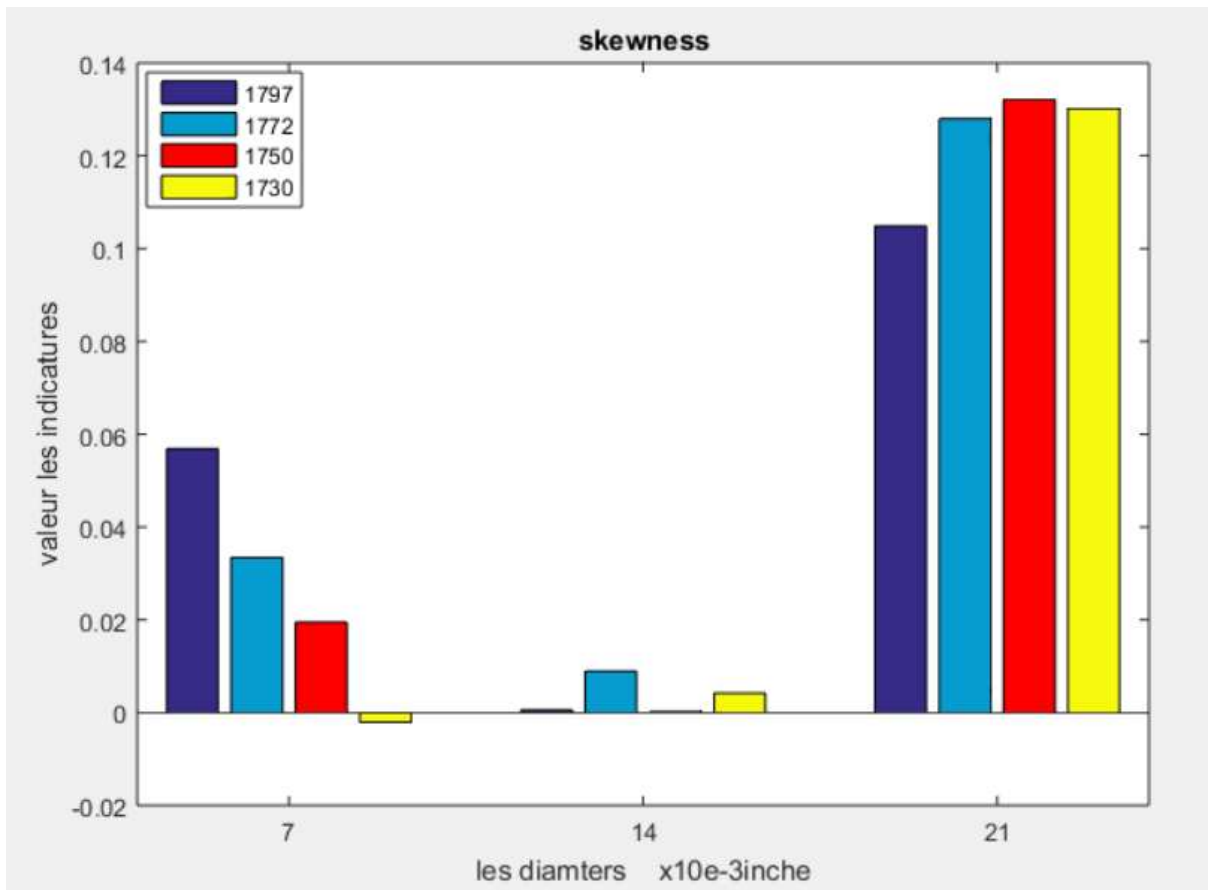


Figure IV.33: les valeurs l'indicateur Skwnesse

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge de diamètre 0.007inche diminue pour moins de zéro a chaque fois nous changeons le type de charge et la valeur de charge 0 la grande valeur par rapport les autres et la valeur de charge 3 moins de zéro

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur pour charge 1 augment par apporte la valeur charge 0 puis la charge 2 diminue par rapport le charge 1, et la valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2. Et la valeur de charge 1 grande valeur par rapport les autres charges

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les trois valeurs pour trois charge (0,1,2) augmente progressivement puis diminue pour la charge 3

Pour la valeur de charge 1 augment par apport charge 0 et le même pour charge 2 par apport le charge 1 et la valeur charge 2 très grande par rapport les autres charges, ensuit la valeur de charge 3 diminue par apport les autres charges

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

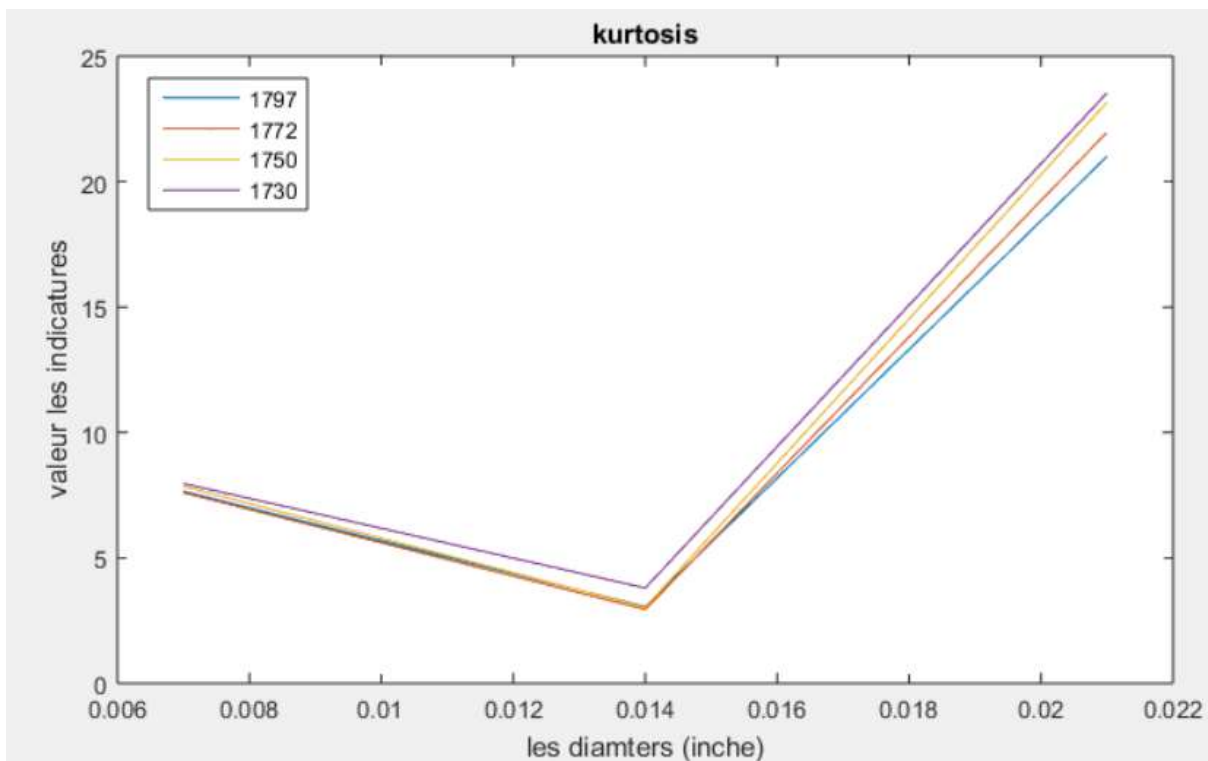
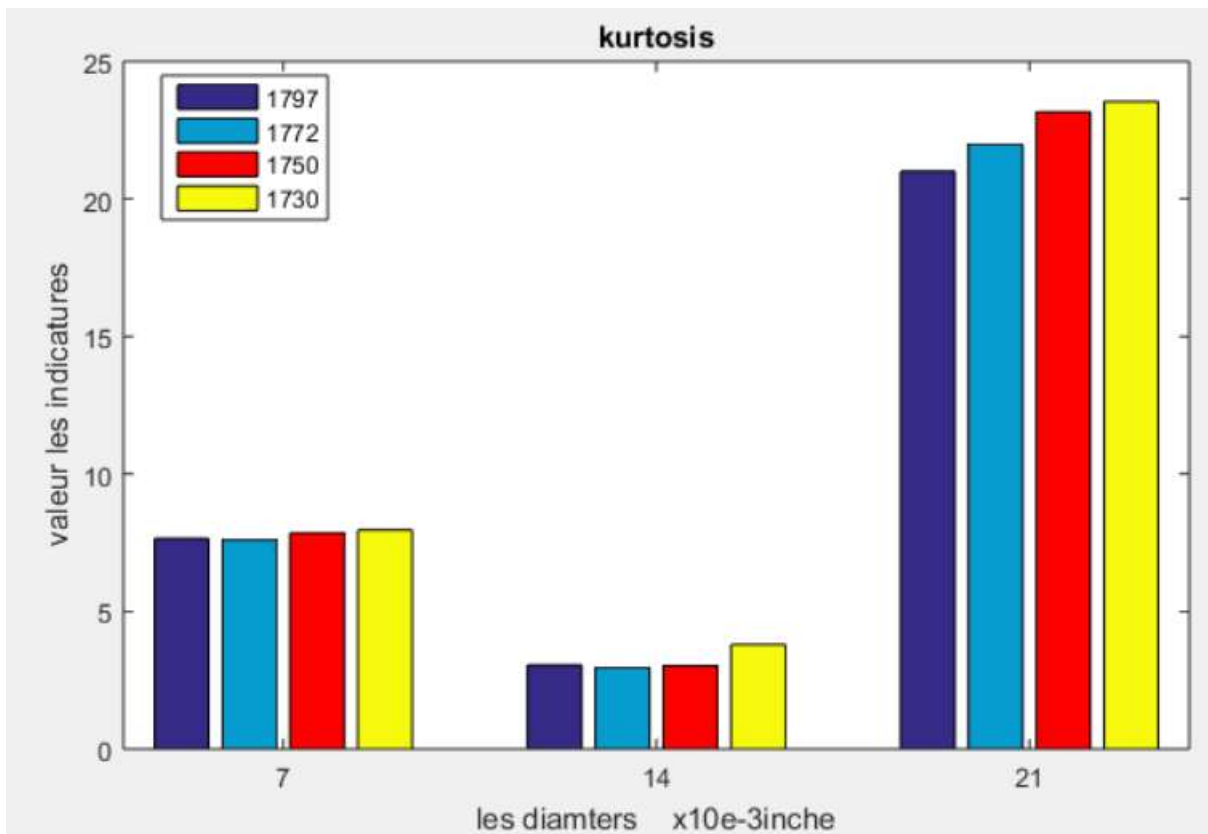


Figure IV.34: les valeurs l'indicateur kurtosis

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 0 et charge 1 presque égale, puis les deux charge (2.3) augment par rapport les autres et presque égale.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeurs pour trois charges (0.1.2) presque égale, et la valeur de charge 3 augment par rapport les autres valeurs

3) Pour le diamètre 0.021inche :

Les valeurs de diamètre 0.021inche augmente progressivement pour chaque charge et la valeur de charge 3 la grande valeur par rapport les autres et la valeur de charge 0 a petite valeur par rapport les autres.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

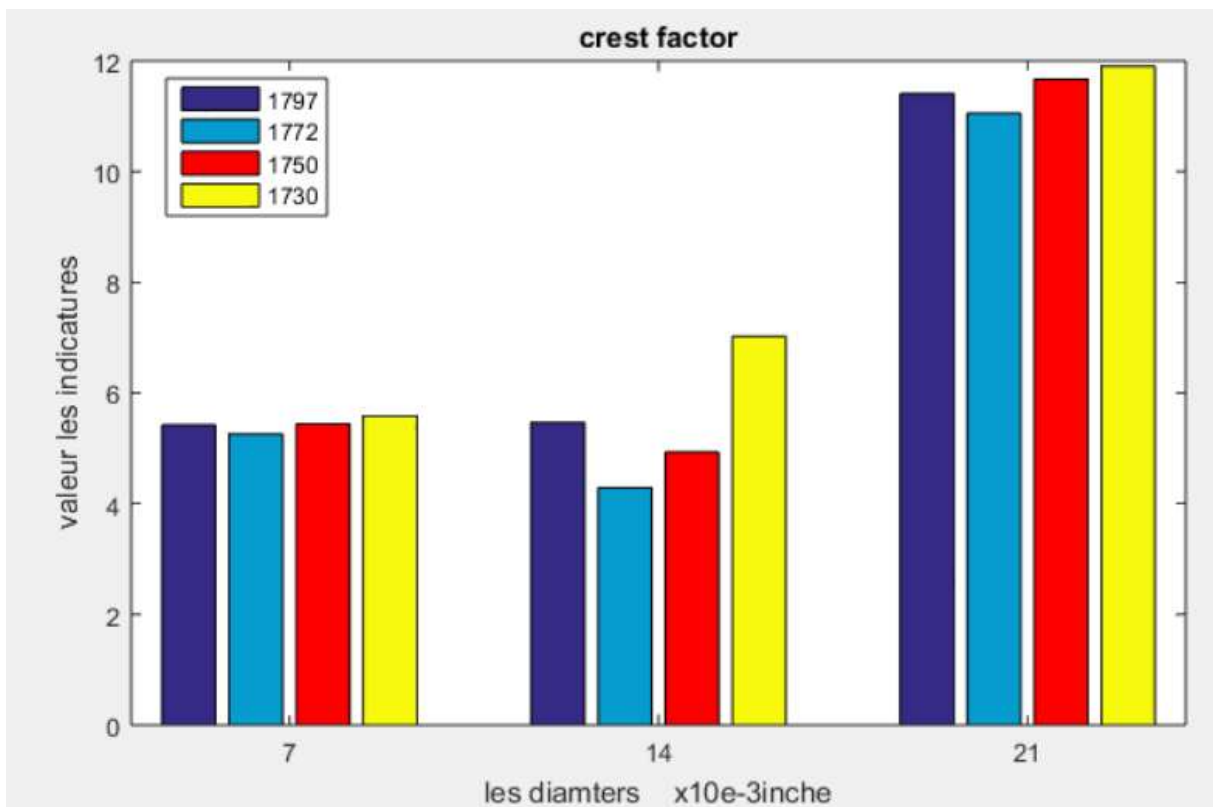
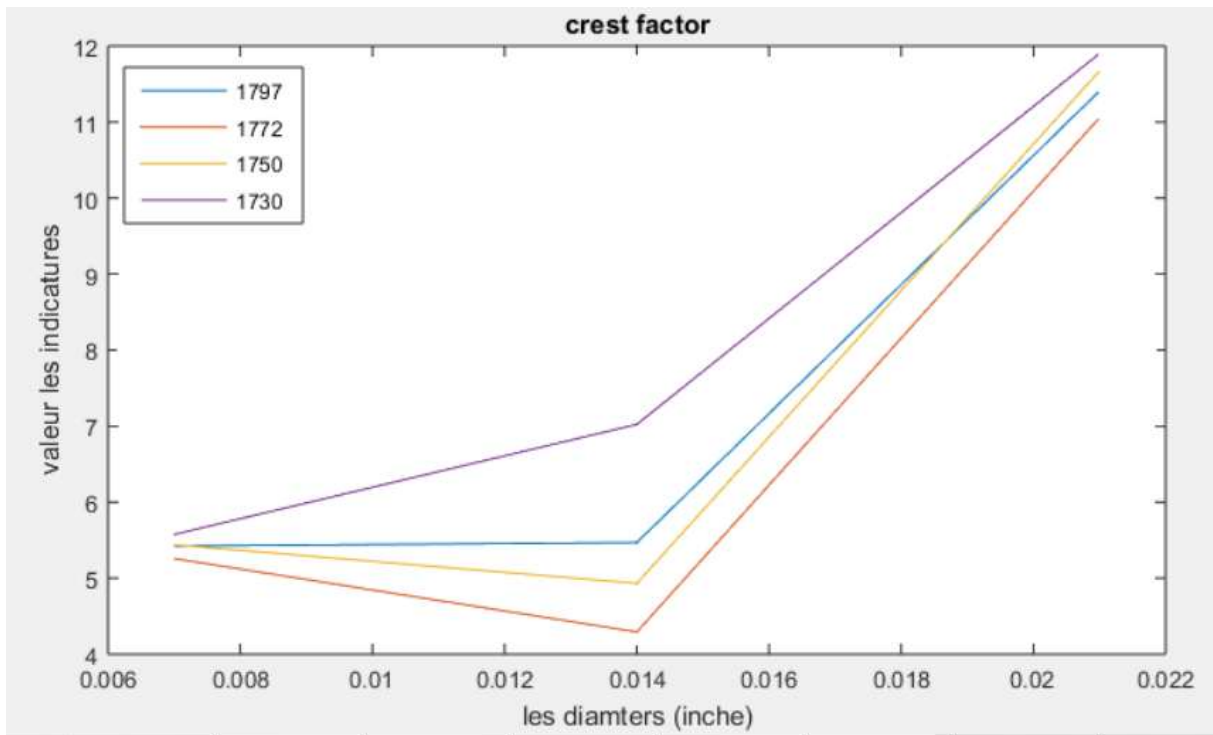


Figure IV.35: les valeurs l'indicateur Crest factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et charge 2 et charge 3 augment par rapport les autres et valeur de charge 3 augment par rapport la valeur de charge 2.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et puis les valeurs de charge 2 et 3 augmente progressivement pour chaque charge.

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et puis les valeurs de charge 2 et 3 augmente progressivement pour chaque charge et valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a la diamètre 0.007inche presque égale

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche valeur sensible

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

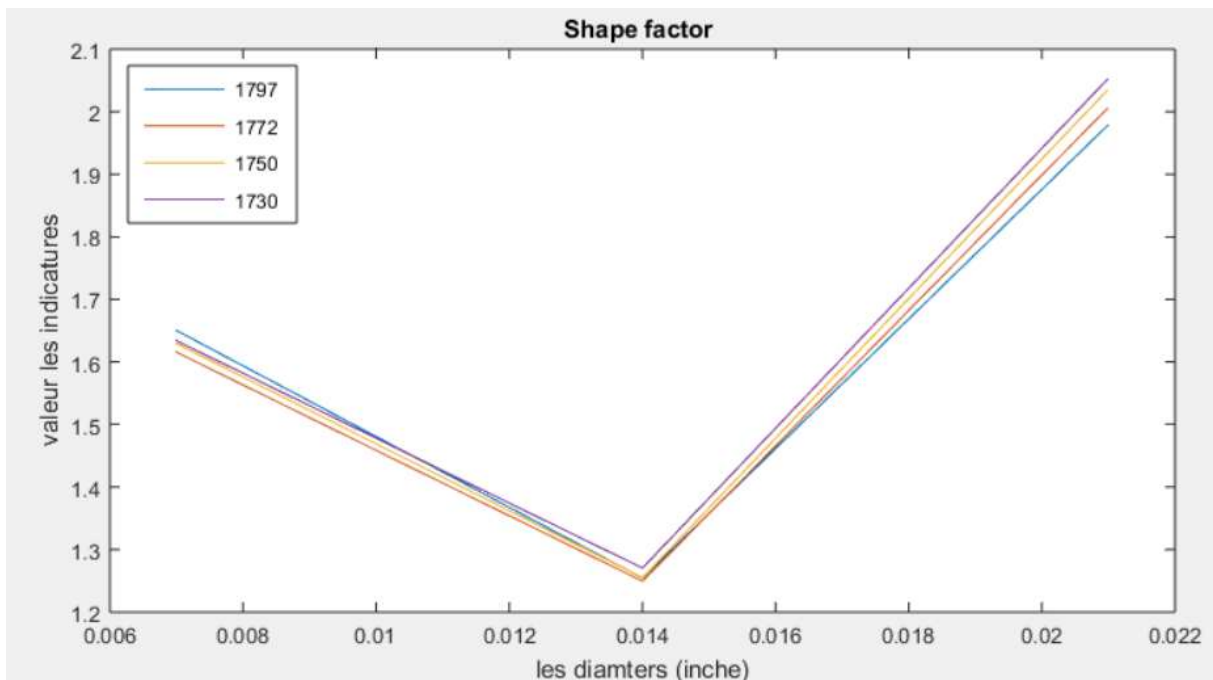
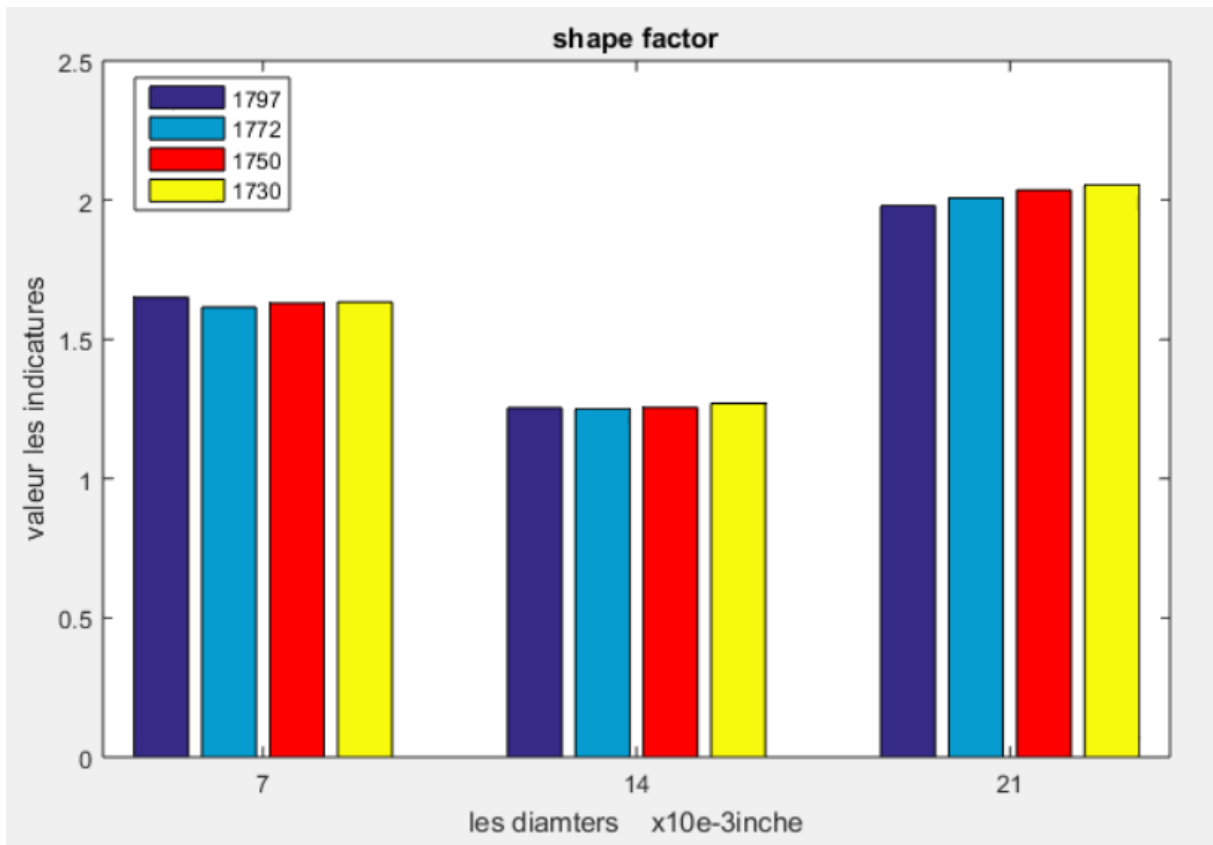


Figure IV.36: les valeurs l'indicateur Shape factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue petite valeur par rapport la valeur de charge 0 et charge 1 et charge 2 et charge 3 presque égale.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

Les valeurs de quatre charges (0,1,2,3) presque égale

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de quatre charge (0,1,2,3) augmente progressivement pour chaque change charge

La valeur de charge 0 a petite valeur par rapport les autres et la valeur de charge 3 a grande valeur par rapport les autres.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

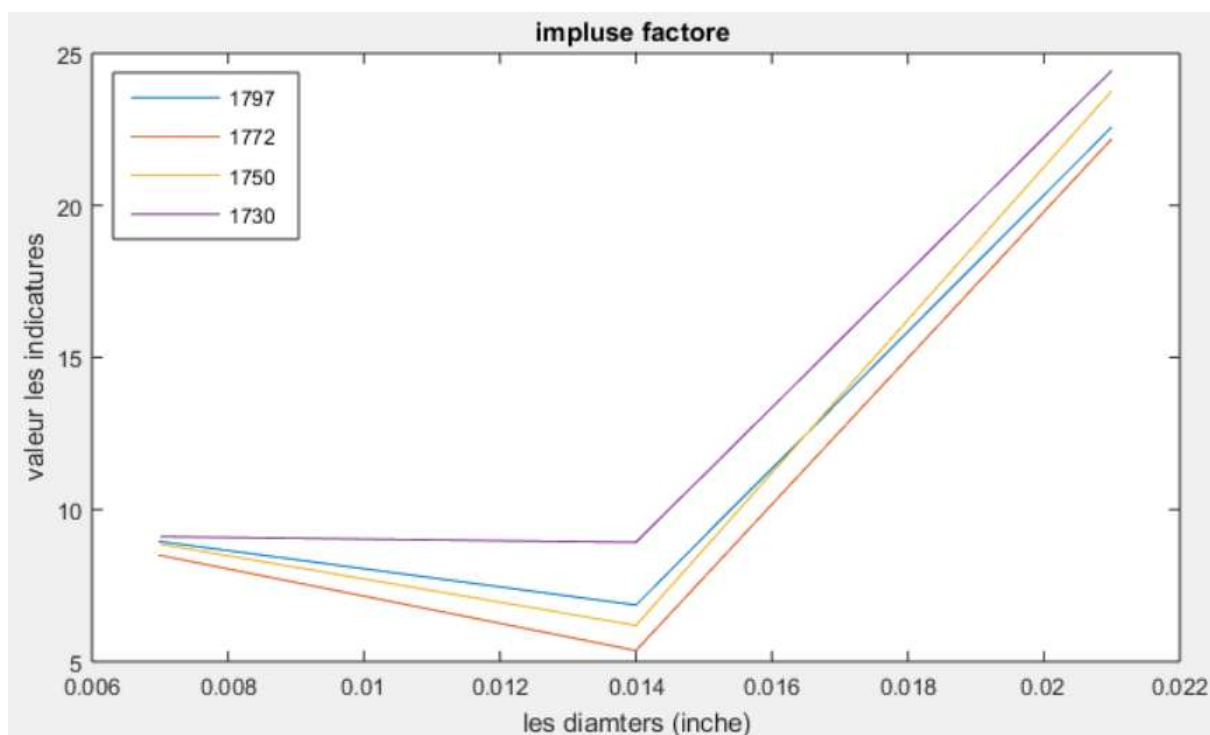
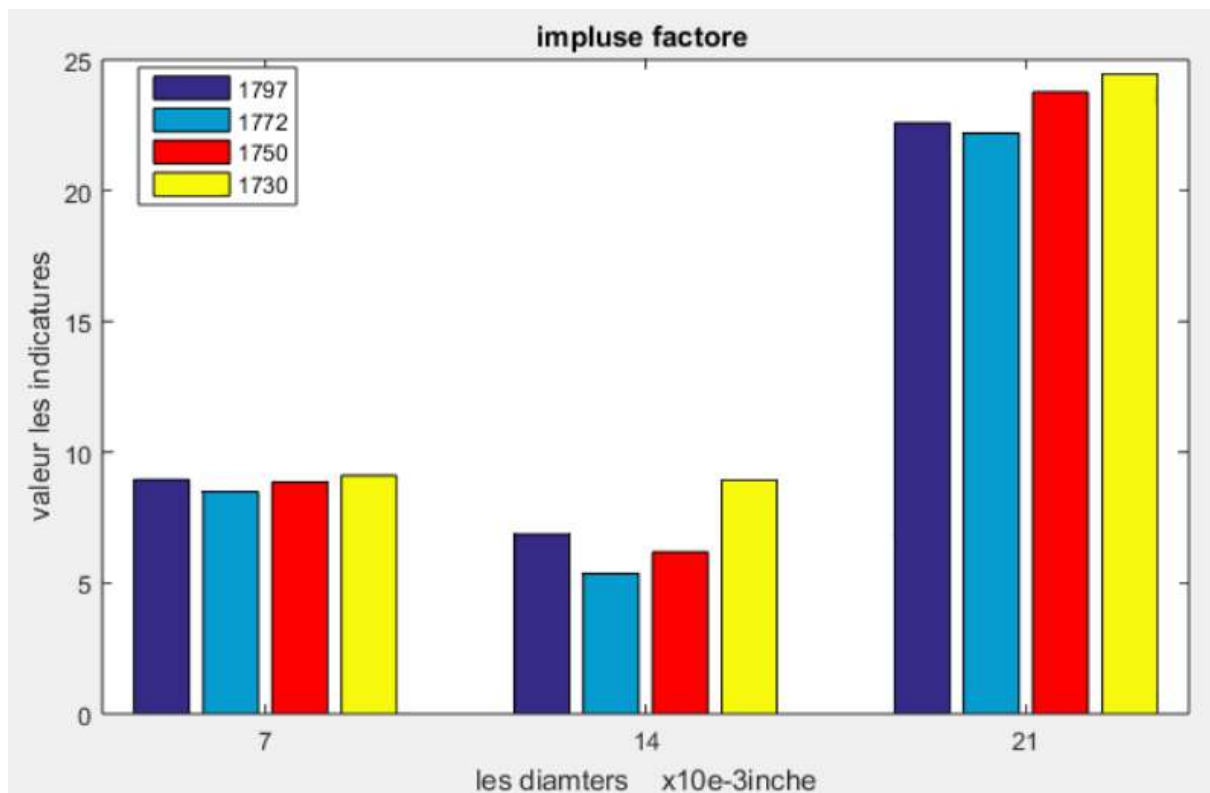


Figure IV.37: les valeurs l'indicateur impulse factor

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et charge 2 et charge 3 augment par rapport les autres et valeur de charge 3 augment par rapport la valeur de charge 2.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et puis les valeurs de charge 2 et 3 augmente progressivement pour chaque charge

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et puis les valeurs de charge 2 et 3 augmente progressivement pour chaque charge et valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

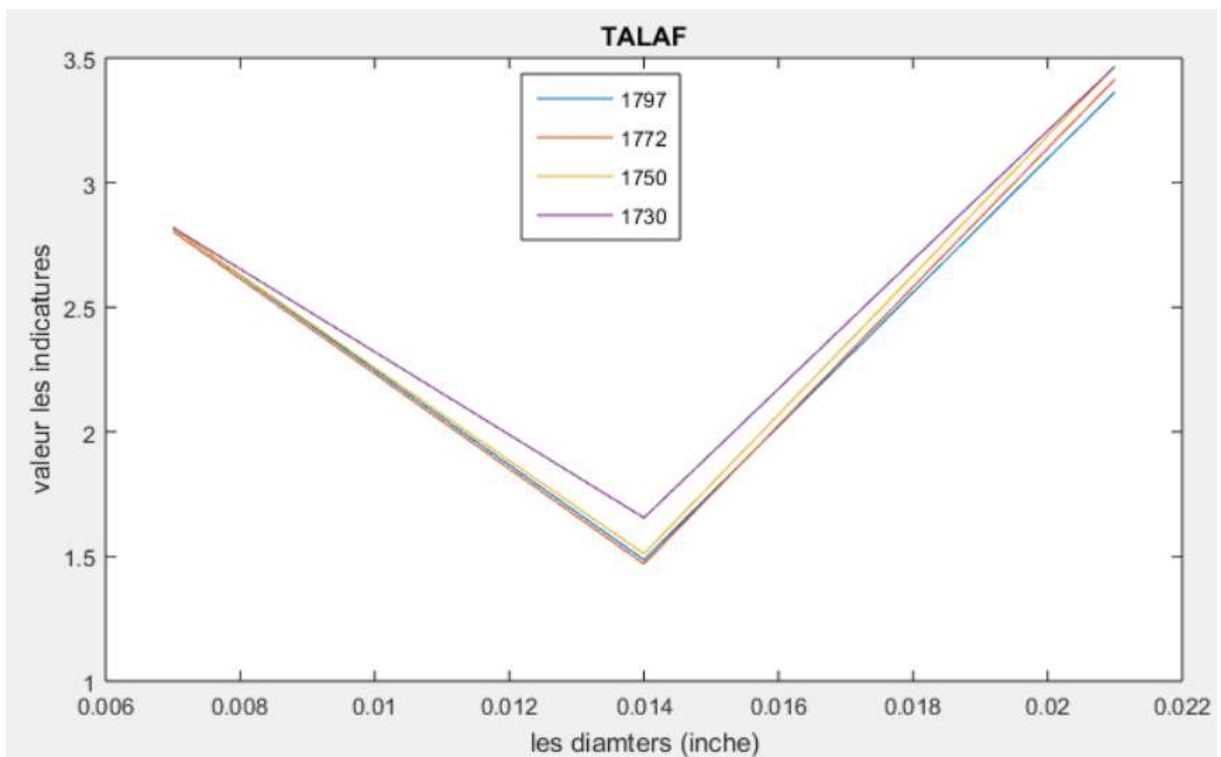
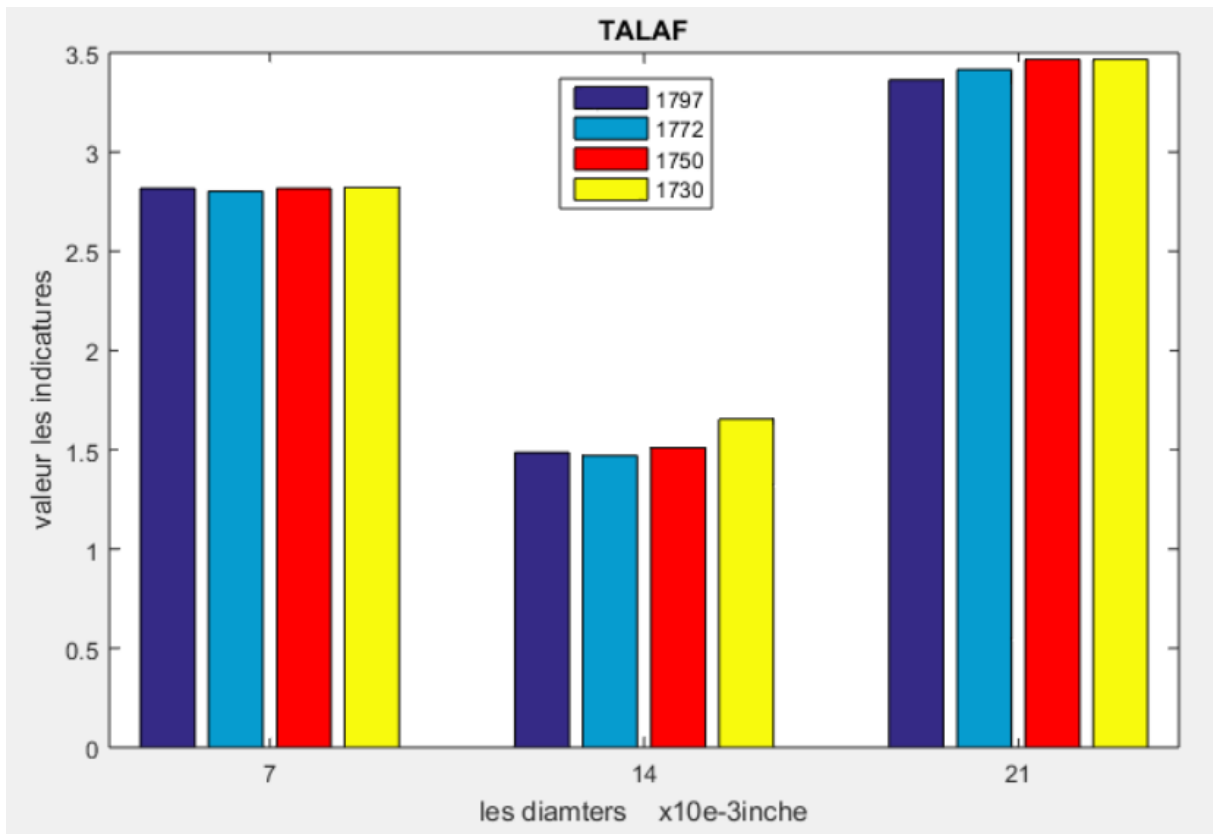


Figure IV.38: les valeurs l'indicateur TALAF

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

Les valeurs de quatre charges pour diamètre 0.007inche presque égale cela signifie la vibration ne l'a pas affecté pour l'indicateur TALAF

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur pour charge 0 et charge 1 presque égale, ensuite la valeur de charge 2 augment par rapport la valeur de charge 1 à cause de vibration et brouillage et le même pour la valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2.

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur de quatre charge (0,1,2,3) augmente progressivement pour chaque charge

La valeur de charge 0 a petite valeur par rapport les autres et la valeur de charge 3 a grande valeur par rapport les autres. Et la valeur de charge 2 et 3 presque égale.

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres

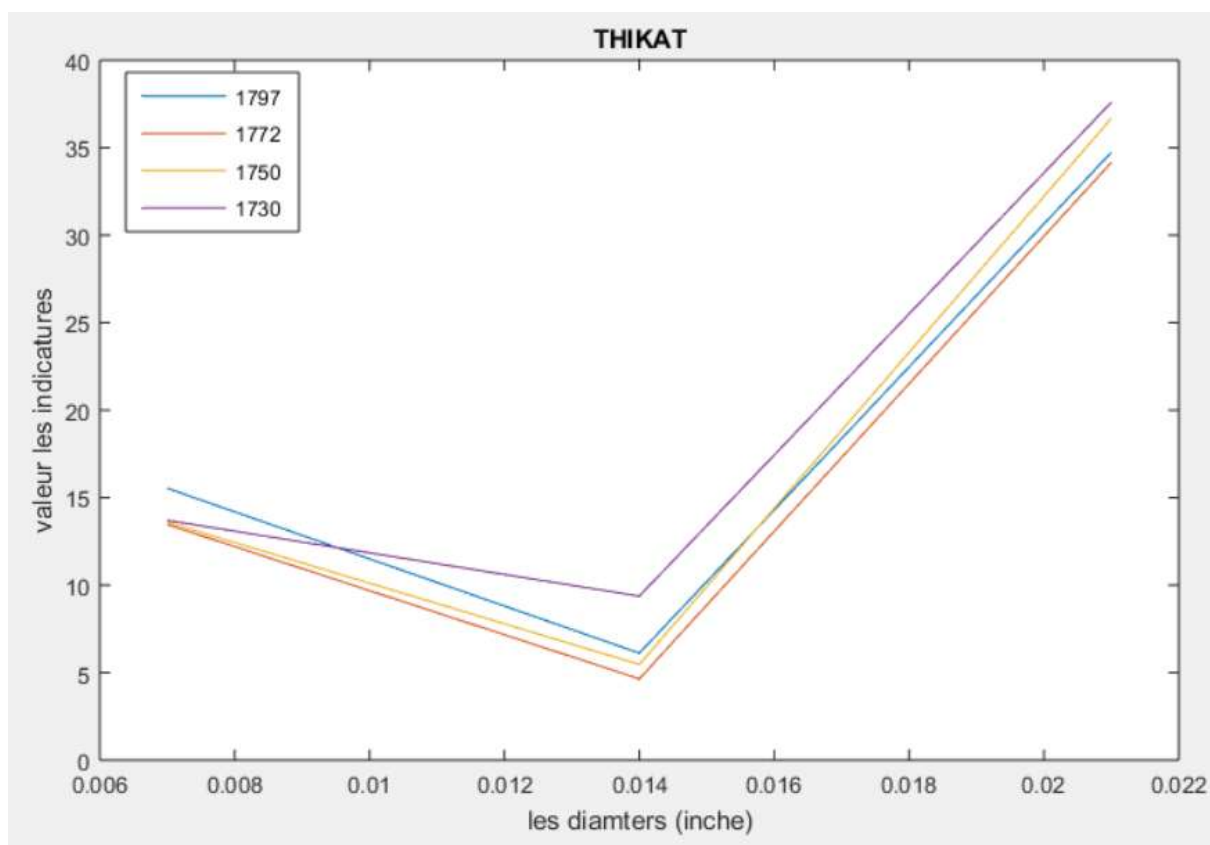
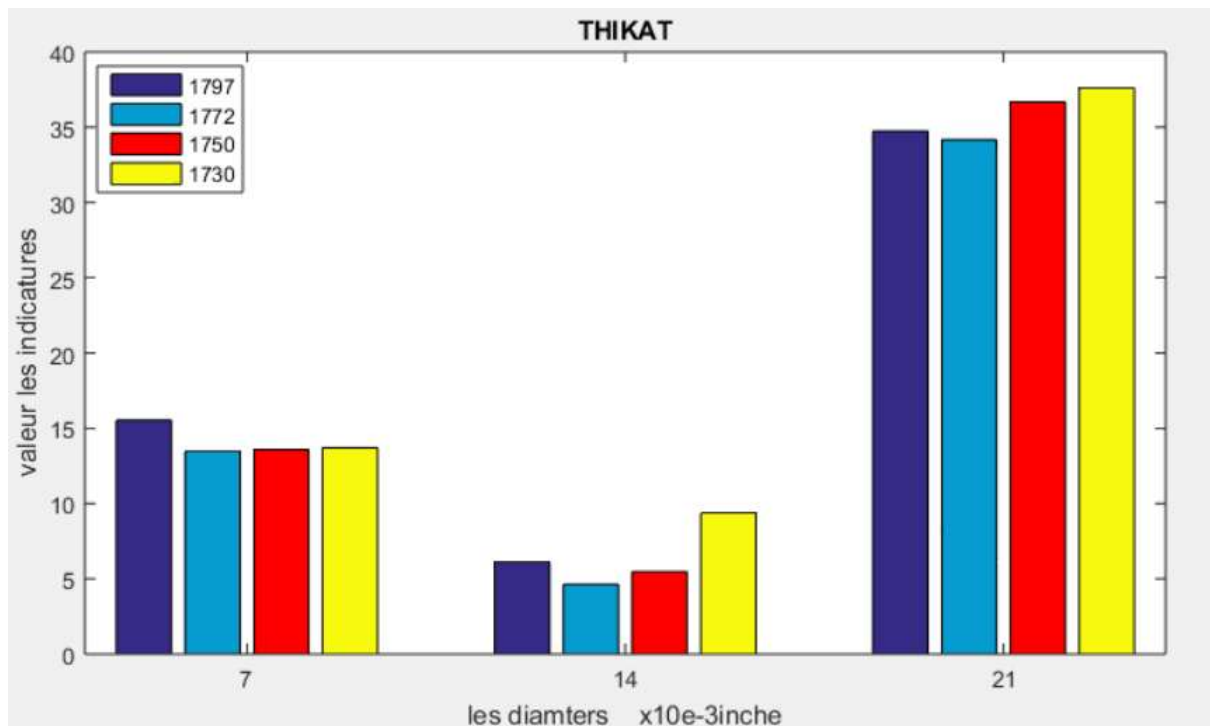


Figure IV.39: les valeurs l'indicateur THIKAT

Commenter :

I) Pour le même diamètre mais pour différente le charge :

1) Pour le diamètre 0.007inche :

La valeur pour charge 1 diminue petite valeur par rapport la valeur de charge 0 et charge 1 et charge 2 et charge 3 presque égale.

2) Pour le diamètre 0.014inche :

La valeur de charge 1 diminue par rapport la valeur de charge 0 et puis les valeurs de charge 2 et 3 augmente progressivement pour chaque charge et valeur de charge 3 augment par rapport la charge 2.

3) Pour le diamètre 0.021inche :

La valeur pour charge 1 diminue par rapport la valeur de la charge 0 puis les valeurs de charge 2 augment par rapport le charge 1 puis la valeur de la charge 3 augment par rapport la valeur de la charge 2

II) Pour différente diamètre et fixe la charge :

Les valeurs de diamètre 0.021inche et très grande par rapport les autres et les valeurs de diamètre 0.014inche a plus petite valeur par rapport les autres

Et nous notons qu'il y a un changement important par rapport à diamètre 0.007inche et 0.021inche a diamètre 0.014inche et c'est que les valeurs diminuent d'une grande valeur

Cela signifie que la vibration affecté l'indicateur RMS pour trois diamètres.

Commentaire générale :

Pour le défaut de bague extérieure les valeurs augmentent et diminuent pour chaque condition et nous avons parlé du changement dans chaque indicateur pour changer les charges une fois et changer à nouveau le diamètre

Mais pour le défaut de bague extérieure nous avons étudié trois diamètres (0.007inche et 0.014inche, 0.021inche) et pour chaque diamètre il y a de la sensibilité et la cause de vibration de machine.

Quant à les indicateurs presque tous sont instables mais l'indicateur qui nous aide à comprendre ce qui ne va pas :

- 1) Kurtosis
- 2) Shape factor
- 3) TALAF

Et l'indicateur RMS indicateur semi-fixe mais aide à nous alerter d'un dysfonctionnement ou d'une erreur

6 Comparaison :

1) RMS :

Les valeurs pour bague externe grande par rapport le bague interne pour diamètre 0.007inche et 0.021inche mais il ne pas même pour le diamètre 0.014inche

Pour bague externe les défauts apparaissent avant le bague interne par rapport le diamètre 0.007inche et 0.014inche mais ne pas le même par rapport diamètre 0.021inche.

2) Peak :

Les valeurs pour la bague externe grande par rapport le bague interne et cela indique que l'indicateur Peak montrez les résultats pour le défaut avant le bague interne

3) Skewness :

Les valeurs pour la bague interne est très grande par rapport la bague externe d'où les charges et les diamètres

Cela signifie que l'indicateur 'skewness' montrez les résultats pour le défaut avant la bague externe.

4) Kurtosis :

Les valeurs pour le diamètre 0.007inche et 0.021inche pour la bague externe grande par rapport le bague interne mais ne pas même pour le diamètre 0.014inche

Cela le deux même pour montrer les résultats pour le défaut machine

5) Crest factor :

Les valeurs pour les diamètres 0.007inche et 0.014inche pour le bague interne grande par rapport la bague externe mais il ne pas même pour le diamètre 0.021inche

Mais pour l'indicateurs 'Crest factor' pour la bague externe montrez les résultats pour le défaut avant la bague interne.

6) Shape factor :

Les valeurs pour bague interne grande par rapport le bague externe d'où le diamètre et les charges

Mais pour l'indicateur 'Shape factor' pour la bague externe montrez les résultats pour le défaut avant la bague interne.

7) *Impulse factor* :

Les valeurs le diamètre 0.007inche et 0.014inche pour bague interne grande par rapport la bague externe mais le diamètre 0.021inche pour la bague externe grand par rapport le bague interne

Mais l'indicateur 'Impulse factor' pour la bague externe donne le résultat rapide par rapport le bague interne.

8) *TALAF* :

Les valeurs pour le diamètre 0.007inche et 0.021inche pour la bague externe grande par rapport le bague interne mais ne pas même pour le diamètre 0.014inche

Mais le deux presque donne le même résultat pour alerte de dysfonctionnement.

9) *THIKAT* :

Les valeurs pour le diamètre 0.007inche et 0.021inche pour la bague externe grande par rapport le bague interne mais ne pas même pour le diamètre 0.014inche

Pour bonne résultat et alerte de dysfonctionnement avant que ça n'arrive pour l'indicateur 'THIKAT' être dans le bague externe et donne le résultat rapide par rapport le bague interne.

7 Conclusion :

, l'application de la décomposition en ondelettes sur les signaux DATA BEARING CENTER, au cours de ce chapitre nous avons minutieusement recherche toutes les valeurs et vous avez toutes les erreurs avec de nombreux indicateurs scalaire et nous avons trouvé beaucoup de valeurs différentes dans indicateurs a l'autres et dans charge a autre et dans diamètre a autre.

Enfin, nous constatons que tous les indicateurs non stables mais il y a quelques indicateurs presque réparés tel que le indicateurs Shape factor.

Là le indicateurs RMS il y plus couramment utilisé pour détecter les défauts et nous en avertir en plus des indicateurs TALAF et ITHIKAT le nouvel indicateur.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la maintenance des machines tournantes et plus particulièrement la détection et le diagnostic des défauts de roulements dans la machine asynchrone triphasée à cage par analyse vibratoire en utilisant les indicateurs scalaires. L'objectif de cette étude est d'apporter et contribuer à l'extraction .d'indicateurs scalaire afin d'améliorer la détection des erreurs de roulement

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principaux blocs de construction de la machine à cage asynchrone, diverses pannes de la machine et leurs causes, Différentes . méthodes de détection des défauts

Dans le deuxième chapitre, nous avons révélé le principe des travaux d'entretien et ses types en détail et nous sommes entrés dans la partie importante et en avons parlés et révélé son utilité dans le moteur asynchrones cet partie la maintenance conditionnelle

Alors pour troisième chapitre, nous avons exposé le principe de les indicateurs scalaire et nous référant aux processus ou aux lois pour les travailles, et nous avons également précises . comment en tirer parti pour connaitre les défauts moutures à l'avenir

Présenté au quatrième chapitre, l'application de la décomposition en ondelettes sur les signaux DATA BEARING CENTER, au cours de ce chapitre nous avons minutieusement recherche toutes les valeurs et vous avez toutes les erreurs avec de nombreux indicateurs scalaire et nous avons trouvé beaucoup de valeurs différentes dans indicateurs a l'autres et . dans charge a autre et dans diamètre a autre

Enfin, nous constatons que tous les indicateurs non stables mais il y a quelques indicateurs . presque réparés tel que le indicateurs Shape factor

Là le indicateurs RMS il y plus couramment utilisé pour détecter les défauts et nous en .avertir en plus des indicateurs TALAF et ITHIKAT le nouvel indicateur

Bibliographie

Bibliographie

[1] : [Wikipédia](#) sous licence [CC-BY-SA 3.0](#)

[2] : BOUDJTAT WALID ; MEMOIRE DE MASTER (ETUDE ET SIMULATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE ALIMENTE PAR UN ONDULEUR DE TENSION A COMMANDE MLI)2017

[3] : K. YAHIA, « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone triphasée par une approche modèle », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[4] : Allianz, "Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes", Cahier des préventions, CP2, 1988.

[5] : S. BLHAMIDI, « Diagnostic des défauts de la Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De commande », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[6] : B. CHERMAT, « Diagnostic des défauts de MAS par les méthodes paramétriques de traitement du signal », Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.

[7] : A. MEDOUED, « Surveillance et Diagnostic des défauts des Machines électriques : Applications aux Moteur Asynchrone », Thèse de Doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda 2012

[8] : Mr. kouchih Djilil et Mr. Hachelaf Redouane, « Modélisation de l'ouverture d'une phase statorique d'une machine asynchrone a doublé alimentation (Mada) » Thèse de master Université SAAD DAHLAB DE BLIDA 2019 /2020

[9] : M. RAMDANI, « Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes » Thèse de master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2019

[10] : cours de prof Zouzou ; « Identification et diagnostic de machines électrique » master 2 Université Mohamed Khider Biskra, 2022

[11] : MERADI Samir ;« Estimation des paramètres et des états de la machine asynchrone en vue de diagnostic des défauts rotoriques » Mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de Magister nouveau régime en Electrotechnique UNIVERSITE MOHAMED KHIDER DE BISKRA 2007

[12] : CHAPITRE I Généralités sur la maintenance - e-learning ... <http://elearning.centre-univ-mila.dz>

[13] : Le service Maintenance au sein de l'entreprise, <http://colbertserv.lyceecolbert-tg.org>

[14] : BOITEL Daniel et HAZARD Claude. Guide pratique de la maintenance, entretiens manuels d'enseignements. Edition Nathan cop Paris 1987.

[15]: Dekhane, A., Djellal, A., Boutebbakh, F., & Lakel, R. (2020, March). Cooling Fan Combined Fault Vibration Analysis Using Convolutional Neural Network Classifier. In Proceedings of the 3rd International Conference on Networking, Information Systems & Security (pp. 1-6)

[16]: Starr, A. (1997). A Structured Approach to the Selection of Condition Based Maintenance. 5th International Conference on FACTORY 2000 – The Technology Exploitation Process, Cambridge, UK.

[17]: Høyland, A. & Rausand, M. (1994). System Reliability Theory – Models and Statistical Methods. USA : John Wiley & Sons, Inc.

[18] : course Les différents types de maintenance Chapitre II master 2 électromécanique

[19] : Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.

[20] : Cours méthodes de la maintenance Dr. Karim AGREBI <https://docplayer.fr/41622455-Cours-methodes-de-la-maintenance.html>

[21] : LAFLEUR François – L'organisation d'un programme de maintenance prédictive –2003

[22] : Outils de la maintenance conditionnelle M1 MIMST
<https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/Introduction%20%C3%A0%20la%20Maintenance%20conditionnelle.pdf>

[23] : Boulenger A. and Pachaud C. *Diagnostic vibratoire en maintenance pré-ventive*. Editions Dunod, Paris, 1998

[24] : « <https://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/12k-drive-end-bearing-fault-data>, » [En ligne].

[25] : D. Saïd, « Etude et optimisation de la transformée en ondelettes pour la détection des défauts dans les roulements, » Université Mohamed Chérif Messaâdia , Souk-Ahras

[26] : M. ZAIED, « Etude des réseaux d'ondelettes Bêta : Application à la reconnaissance de visages, » l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Sfax - Tunisie, 2008.

[28] : I. MOUMENE, « IDENTIFICATION DES DÉFAUTS MIXTES D'ENGRENAGE ET DE ROULEMENT PAR ANALYSE VIBRATOIRE, » Université de 08 Mai 45, Guelma, 2010.