



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRY OF HIGH EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة العربي التبسي - تبسة
LARBI TEBESSI UNIVERSITY – TEBESSA
معهد المناجم
INSTITUTE OF MINES
قسم الإلكتروميكانيك
ELECTROMECHANICAL DEPARTEMENT



MEMOIRE

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

Filière : Electromécanique

Option : Maintenance Industrielle

ETUDE DES DEFAUTS DES ROULEMENTS ET LEUR GRAISSAGE

Par

CHETTOUH AYMEN et YAHIAOUI IMANE

Devant le jury :

LOUAFI MESSAOUD	professeur	Président	Université Larbi TebessiTébessa
TALEB MOUNIA	MCB	Encadreur	Université Larbi TebessiTébessa
MOGHRANI REDHOUANE	MAA	Examineur	Université Larbi TebessiTébessa

Promotion 2020 /2021

REMERCIEMENT

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail.

*Ce présent mémoire de fin d'étude, n'aurait pu avoir le jour sans contribution de nombreuses personnes, dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier. Avant tout, nous tenons à remercier messieurs les membres du jury pour leurs collaborations durant l'examen de ce travail et leurs participations à la soutenance. Nous adressons tout particulièrement notre reconnaissance à notre promoteur **Dr. TALEB Mounia** : pour la direction de cette thèse, pour ses conseils et son aide. Sans oublier les enseignants de l'institut des mines en particulier le département : électromécanique*

*Et nous sommes très reconnaissants à **Mr. KAMEL BAGHNAOUI** pour son aide.*

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude et respect.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire :

*A ma mère, qui m'a encouragé d'aller en avant et qui m'a donnée
tout son amour pour reprendre mes études ;*

*A mon père qui m'a donné son soutien permanent durant toutes
mes années d'études ;*

A mon frère ADEL ;

A mon collègue IMANE

A ma sœur AYA ;

A ma chérie CHAIMA ;

*A tous mes amis sans exception en particulier : sami, sofiane,
ossama, tayeb, nour eddine, hicham, mahdi, mounir, salim, said,
tifa, mohamadou, saif,....et*

*A mes enseignants : AMEL CHABBI, Med SALAH
SOUDANI, LEYLA YOUNES*

AYMEN

Dédicace

Je dédie ce travail à mon cher père et ma chère mère qui grâce à eux je suis arrivée à ce niveau.

*A ma famille, ma chère sœur SAMIRA et mes chers frères
LOTFI, SEIF et AYOUBE.*

A mon collègue ; mon frère AYMEN.

*A toutes mes amies surtout : AYA, MERYEM, HADJER,
HANIN ET BASSMA.*

*A tous les profs surtout : AMEL CHABBI, MED SALAH
SOUDANI et YOUNIS LAYLA*

Enfin a toute la promotion 2016.

IMANE

Sommaire

Remercîment

Dédicace

Résumé

Liste des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I. Généralité sur la maintenance

I.1.Introduction.....	1
I.2.Historique.....	1
I.3 Définition et rôle de la maintenance.....	2
I.3.1 Définition normalisée de la maintenance.....	2
I.3.2 Rôle de la maintenance.....	2
I.4. L'Entretien et la maintenance.....	3
I.5. Différents types de maintenance.....	3
a) Concepts de maintenance.....	4
b) Les méthodes de maintenance.....	3
I.5.1 La maintenance corrective.....	5
a. La maintenance curative ou réparation.....	5
a.1 Définition de la réparation.....	5
b. La maintenance palliative ou dépannage.....	6
b.1. Définition du dépannage.....	6
I.5.2. La maintenance préventive.....	6
a) La maintenance préventive systématique.....	6
b) La maintenance préventive conditionnelle.....	7

c) La maintenance préventive prévisionnelle.....	7
I.5.3. Les opérations de maintenance préventive.....	8
I.5.4 Les objectifs visés par la maintenance préventive.....	8
I.6. Les niveaux de maintenance.....	10
I.7. Les échelons de maintenance.....	10
I.8. Les coûts de maintenance.....	11
I.8.1 Les coûts directs.....	11
I.8.2 Coûts indirects « coût de défaillance ».....	11
I.9. Moyens de la maintenance.....	12
I.9.1 Moyens humains.....	12
I.9.2 Moyens matériels.....	12
I.9.2.1 Outillages.....	12
I.9.2.2 Equipements supports.....	12
I.9.2.3 Pièces de rechange.....	12
I.9.3 La documentation.....	13
I.9.3.1 La documentation générale.....	13
I.9.3.2 La nomenclature des équipements.....	13
I.9.3.3 La documentation du matériel.....	14
I.10. Conclusion.....	14

Chapitre II. Généralités sur les roulements

II.1. Introduction.....	15
II.2. Définition du roulement.....	15
II.3. Constitution des roulements.....	15
II.3.1. Eléments roulants.....	16
II.3.2. Cages.....	16
II.3.3. Bagues.....	16
II.4. Caractéristiques des roulements.....	16

II.5.les type des roulements.....	17
II.5.1.Roulements radiaux et axiaux.....	17
II.5.2.Roulements standard et spéciaux.....	17
A. Roulements à billes à gorges profondes.....	17
B. Roulements à billes à contact oblique.....	17
C. Roulements à rouleaux cylindriques.....	18
D. Roulements à rouleaux coniques.....	18
E. Roulements à rouleaux sphériques.....	19
F. Roulements à aiguilles.....	19
G. Paliers.....	20
II.7.Charges supportées par les roulements.....	21
II.8.Choix d'un roulement.....	21
II.9.Avaries de roulement et remèdes.....	22
II.9.1.Ecaillage.....	22
II.9.2.Blocage.....	23
II.9.3.Fissures et cassures.....	24
I.9.4. Détérioration de cage.....	25
II.9.5Déformation du chemin de roulement.....	26
II.9.6.Usure et grippage.....	26
II.9.7.Corrosion.....	27
II.9.8.Corrosion de contact.....	28
II.9.9.Usure.....	29
II.9.10.Passage de courants électriques à travers le roulement.....	29
II.9.11.Rayures et empreintes.....	30

II.9.12.Rotation de bagues.....	31
II.9.13.Taches et décoloration.....	31
II.9.14.Ecaillage en peau d'organe (peeling).....	32
II.10.Conclusion.....	33

Chapitre III. Lubrification des roulements

III.1.Introduction.....	34
III.2.Lubrification.....	35
III.3.Rôle des lubrifiants.....	35
III.4.Les lubrifiantes.....	36
III.5.Choix du type de lubrification.....	36
III.6.Lubrification à la graisse.....	37
III.6.1.Caractéristiques des graisses.....	37
III.6.2.Consistance.....	37
III.6.3.Caractéristiques fonctionnelles.....	38
III.6.4.Mise en œuvre.....	38
III.6.5.Dispositifs de graissage.....	39
III.6.6.Choix de la graisse.....	40
III.6.7.Quantité de graisse.....	42
III.6.7.1.Graissage initial.....	42
III.6.7.2.Regraissage.....	43
III.6.7.3.Poids de graisse.....	45
III.7.Lubrification à l'huile.....	46
III.7.1.Type d'huile.....	46
III.7.2.Systèmes de lubrification.....	47

III.8.Conclusion.....	49
-----------------------	----

Chapitre IV.1.Généralités sur les vibrations

IV.1.1.Définition de vibration.....	50
IV.1.2.Les différents types de vibrations.....	50
IV.1.2.1.Vibration périodique simple- harmonique.....	50
IV.1.2.2.Vibration périodique complexe.....	51
IV.2.3.Vibration aléatoire.....	51
IV.2.4.Vibration transitoire.....	51
IV.1.3.Caractéristiques des signaux.....	52
IV.1.4.La transformée de Fourier.....	53
IV.1.5.Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique.....	53
IV.1.5.1.Le déplacement vibratoire.....	53
IV.1.5.2.La vitesse vibratoire.....	53
IV.1.5.3.L'accélération vibratoire.....	54
IV.2.Diagnostic et surveillance des machines tournantes.....	54
IV.2.1.L'analyse vibratoire.....	54
IV.2.2. Objectifs de l'analyse vibratoire.....	54
IV.2.3.Chaine de mesure.....	55
IV.2.3.1.Les capteurs de vibration.....	55
IV.2.3.2.Les points de mesure.....	57
IV.2.4.Techniques de surveillance de l'état des roulements.....	57
IV.3.Partie expérimentale.....	58
IV.3.1.Méthodes statistiques.....	58
IV.4.Méthodologie de travail.....	59
IV.4.1.Matériel utilisé.....	59
a- Entraînement.....	60
b- Mesure de la fréquence de rotation.....	60

c- Accéléromètre piézoélectrique.....	60
d- Analyseur de vibration.....	62
IV.5.Préparation des essais.....	63
IV.5.1.Planification des essais.....	65
IV.5.2.Plan d'expérience.....	66
IV.5.3. Pertinence des courbes.....	71
IV.6. Interprétation des graphiques des composantes radiales.....	77
IV.7.Conclusion.....	77

Conclusion général.

Bibliographie.

Annexe.

Liste des figures

Figure 1 : Méthodes de maintenance.....	4
Figure 2 : Répartition de la maintenance systématique.....	6
Figure.3 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement a billes à une rangée.....	16
Figure 4 : Différents types de roulement à billes.....	18
Figure 5: Différents types de roulement à rouleaux.....	19
Figure 6 : Roulement à aiguille.....	20
Figure 7 : Le palier.....	21
Figure 8 : Les charges supportées par roulement.....	22
Figure 9 : L'écaillage des pistes.....	23
Figure 10 : Blocage.....	24
Figure 11 : fissure et cassure des bagues.....	25
Figure 12 : Détérioration de cage.....	26
Figure 13 : Déformation du chemin de roulement.....	26
Figure 14 : usure et grippage.....	27
Figure 15 : corrosion des pistes.....	28
Figure 16 : corrosion de contact.....	29
Figure 17 : usure (modification de la précision géométrique.....	30
Figure 18 : effet de passage du courant sur les roulements.....	30
Figure 19 : rayures et empreintes.....	31
Figure 20 : rotation de bagues.....	31
Figure 21 : taches et décoloration.....	32
Figure 22 : écaillage en peau d'organe (peeling).....	33
Figure 23 : film du lubrifiant.....	34
Figure 24 : Dispositifs de graissage.....	39
Figure 25 : diagramme fréquence de base.....	43

Figure 26 : diagramme de poids de graisse.....	45
Figure 27 : bain d'huile	47
Figure 28 : huile perdue.....	47
Figure 29 : Ruissellement et projection.....	47
Figure 30 : circulation d'huile.....	30
Figure 31 : Brouillard d'huile.....	31
Figure 32 : Vibration périodique simple.....	49
Figure 33 : Vibration complexe.....	50
Figure 34 : Vibration aléatoire.....	50
Figure 35 : Vibration transitoire.....	51
Figure 36 : les différentes amplitudes d'une vibration.....	51
Figure 37 : Relation accélération, vitesse, déplacement.....	53
Figure 38 : prosimètres et leur driver.....	55
Figure 39 : capteur de vélocimétrie.....	56
Figure 40 : Schéma de principe d'un accéléromètre.....	56
Figure 41 : Simulateur des défauts de machines MFS.....	59
Figure 42 : Moteur électrique de type 1 HP.....	60
Figure43 : variateur de fréquence (SMVector).....	60
Figure 44 : Accéléromètre piézoélectrique uni-axial.....	61
Figure 45 : Accéléromètre piézo-électrique triaxial.....	62
Figure 46 : Analyseur de vibration Spectral PAD/8.....	62
Figure 47 : Le logiciel VibraQuest.....	63
Figure 48 : Roulement à son état sain.....	64
Figure 49 : Roulement avec défaut sur la bague intérieur.....	64

Figure 50 : Roulement avec défaut sur la bague extérieur.....	65
Figure 51 : Roulement avec défaut de bille.....	65
Figure 52: Etat sain [E0V0].....	72
Figure 53 : Etat 01 (Roulement à défaut de bague intérieure) [E1V1].....	73
Figure 54 : Etat 02 (Roulement à défaut de bague extérieure) [E2V2].....	73
Figure 55: Etat 03 (Roulement à défaut de bille) [E3V2].....	74
Figure 56: Etat sain [E0V0].....	75
Figure 57 : Etat de défaut sur la bague intérieure.....	76
Figure 58 : Etat de défaut sur la bague extérieure.....	77
Figure 59 : Etat de défaut sur la bille.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1 : les niveaux de maintenance.....	9
Tableau 2 : Choix du type de lubrification.....	36
Tableau 3 : Consistance des graisses.....	37
Tableur 4 : choix de graisses.....	41
Tableau 5 : coefficient de fréquence de correction de graissage.....	44
Tableau 6 : type d'huile.....	46
Tableau 7 : Techniques de surveillance des roulements.....	57
Tableau 9 : récapitule les caractéristiques correspondantes à chaque type.....	61
Tableau 10 : Niveaux des facteurs.....	66
Tableau 11 : Codification des états.....	66
Tableau 12 : Codification des vitesses.....	66
Tableau 13 : Codification des charges.....	66
Tableau 14 : les Indicateurs scalaires.....	66
Tableau 15 : valeurs des indicateurs scalaires (état sain).....	68
Tableau 16 : état défaut sur la bague intérieure.....	69
Tableau 17 : état de défaut sur la bague extérieur.....	70
Tableau 18 : état des défauts sur l'élément roulant.....	71

ملخص

- الاهتزازات هي ظواهر فيزيائية تستخدم كمؤشر لتحديد الاختلال الوظيفي للألات الدوارة و مراقبة الأجزاء الدوارة باستخدام تحليل الاهتزازات , و هي التقنية الأكثر استعمالا في السياق الموضوعي لعملنا .

يقدم هذا العمل دراسة عن تشحيم المدحرجات واكتشاف أعطالها انطلاقا من تحليل الاهتزازات

- استخدمنا المؤشرات العددية للكشف المبكر عن تدهور المدحرجات.

- يستند هذا العمل على مرحلتين أساسيتين :

أولا : كشف العيوب من خلال المتابعة بالطريقة الإحصائية الزمنية .

ثانيا : نقوم بتحليل النتائج و مقارنتها مع الحالة المرجعية للمدحرجة (الحالة السليمة) .

الكلمات المفتاحية : الاهتزازات؛ المدحرجات؛ الآلات الدوارة؛ المؤشرات العددية

Résumé

Les vibrations sont des phénomènes physiques utilisés comme indicateur pour la détection des dysfonctionnements des machines tournantes et la surveillance des parties tournantes par l'analyse vibratoire, est la technique la plus utilisée dans ce contexte objectif de notre travail.

Ce travail présente une étude sur la lubrification des roulements, et la détection des leurs défauts, a partir de l'analyse vibratoire.

Nous avons utilisé les indicateurs scalaires pour la détection précoce de la dégradation des roulements

Ce travail est basé sur deux parties principales :

D'abord, détecter les défauts en procédant par la méthode statistique temporelle.

Puis, analyser et comparer les résultats obtenues avec un état de référence (état sain).

Mots clés : vibrations, roulements , machines tournantes, indicateurs scalaires.

Abstract

Vibrations are a physical phenomenon used as an indicator for the detection of malfunction of rotating machines and the monitoring of rotating parts by vibration analysis , is the technique most used in this context objective of our work.

This work presents a study on the lubrication of bearings and the detection of their defects, based on vibration analysis.

We used scalar indicators for early detection of bearings damage.

This work is based on two main parts:

First, detecting defects in the process by temporal statical method.

- Then, analyses and compare the results obtained with a reference bearing perfect cas

Key words: vibrations, bearings, rotating machinery, scalar indicators.

Introduction générale

La maintenance industrielle est le principal pilier de l'industrie moderne en raison de sa grande importance dans le maintien du bon fonctionnement du système de production, en essayant de le développer en fonction des défauts antérieurs, car toute défaillance entraîne des pertes matérielles et humaines pour l'entreprise.

Les machines tournantes représentent l'élément de base des chaînes industrielles actuelles, car leurs défaillances sont susceptibles d'avoir un impact direct sur la chaîne de production, en plus d'un mauvais entretien de ces machines. Ce qui peut conduire à une situation critique sur le personnel et l'environnement.

Le fonctionnement des machines tournantes entraîne des vibrations causées par les pièces mobiles et une mauvaise lubrification, car les machines fonctionnant dans des conditions idéales produisent peu de vibrations et la détérioration résultant d'un fonctionnement et d'un entretien inadéquats entraîne souvent une augmentation du niveau de vibrations, en observant le changement de ce niveau nous pouvons obtenir des informations utiles sur l'état de la machine car cela permet une détection précoce des défauts et leur localisation sans recourir au démontage de la machine et en évitant l'arrêt complet de la production et les blessures des travailleurs et évitant ainsi les dommages matériels et humains pertes pour l'entreprise.

Le présent travail est une étude sur la surveillance des défauts des roulements par analyse vibratoire.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

- Dans le premier chapitre nous donnons des généralités sur la maintenance industrielle et leurs applications.
- Dans le deuxième chapitre nous présentons des généralités sur les roulements, et présenté quelque défauts et actions corrective pour ces défauts.
- Le troisième chapitre est dédié pour la lubrification et graissage des roulements.
- Dans le quatrième chapitre on présente les résultats obtenus de l'application d'analyse vibratoire par quatre indicateurs scalaires issus des signaux enregistrés lors de phase d'expérimentation.

Et nous terminons la présente étude par une conclusion générale.

Chapitre I

Chapitre I. Généralités sur la maintenance

I.1.Introduction

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, c'est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements. Ainsi la recherche des performances des systèmes de production devenus complexes mène la fonction maintenance à être responsable de la garantie de la disponibilité de tels systèmes.

I.2.Historique

Jusqu'à la fin des années 70, l'entretien était souvent le parent pauvre des services de l'entreprise. Les dirigeants le considéraient uniquement comme un poste de dépenses et ne pensaient qu'à réduire ses coûts.

L'entretien se contentait d'intervenir sur un système défaillant pour relancer la production et effectuait les opérations courantes préconisées par le constructeur. Il n'y avait donc pas de prise en compte des caractéristiques spécifiques et des conditions de fonctionnement (cadence, ancienneté, température ambiante, etc.) des matériels. On pouvait donc être conduit à effectuer (sans évaluation à priori ou à posteriori) trop ou pas assez d'entretien. Les choses ont évolué : la part du coût machine dans le coût de production ne cesse d'augmenter aux dépens de celui de la main-d'œuvre. Ceci est dû à l'automatisation presque systématique des procédés, et à leurs coûts croissants. Ainsi les arrêts inopinés coûtent cher.

Dans ces conditions, la fonction maintenance est devenue stratégique. Entretien, c'est subir alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper. Les coûts directs de maintenance sont devenus secondaires voire négligeables par rapport aux coûts indirects (non production, conséquences de la panne). Pour le gestionnaire, la disponibilité des machines est devenue l'indicateur clé. Parallèlement à cette évolution, la maintenance s'est dotée de méthodes de gestion, d'organisation, d'aide au diagnostic des pannes, de stratégies. Des techniques

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

d'auscultation sophistiquées se sont développées (analyse vibratoire, analyse des huiles, thermographie IR, etc.).

La qualification des techniciens s'est accrue. La gestion de la maintenance requiert aujourd'hui une spécialisation professionnelle (STS, IUT, écoles d'ingénieurs). [1]

I.3 Définition et rôle de la maintenance

I.3.1 Définition normalisée de la maintenance

L'afnor, par la norme **NFX 60-010**, définit la maintenance comme : «l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». [2]

La définition de la maintenance fait donc apparaître trois notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut
- Etat qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance

Dans une entreprise, quel que soient son type et son activité, le rôle de la fonction maintenance est d'assurer la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué.

I.3.2 Rôle de la maintenance

- La maintenance permet d'organiser, prévoir, planifier et gérer les opérations d'entretien.
- La maintenance permet donc de conserver un bien dans son état maximal 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. La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- **Prévisions à courts termes**

Elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures. Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi faire l'objet d'un minimum de réparation.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Le service maintenance doit donc maîtriser le comportement des matériels en gérant les moyens nécessaires et disponibles. C'est là que l'importance de la mutation de l'entretien traditionnel vers une logique de maintenance prend toute son importance.

▪ **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 possible, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.

▪ **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.

I.4. L'Entretien et la maintenance

Cette différence de vocabulaire n'est pas une question de mode, mais marque une évolution de concept. Le terme maintenance est apparu dans les années cinquante des derniers siècles aux Etats-Unis.

En France, on parlait encore à cette époque d'entretien. Progressivement, une attitude plus positive vis-à-vis de la défaillance voit le jour. Il faut tirer une leçon de l'apparition d'une panne pour mieux réagir face aux aléas de fonctionnement.

Le terme « **maintenance** » se substitue à celui d' « **entretien** » qui signifie alors « **maintenance corrective** ».[4]

Entretien : c'est dépanner, réparer pour assurer le fonctionnement de l'outil de production.

Maintenir : c'est intervenir dans de meilleures conditions ou appliquer les différentes méthodes afin d'optimiser le coût global de possession.

I.5. Différents types de maintenance

a) Concepts de maintenance

L'analyse des différentes formes de maintenance repose sur quatre concepts :

- Les événements qui sont à l'origine de l'action : référence à un échancier, la subordination à un type d'évènement (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.).

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- Les méthodes de maintenance qui leur seront respectivement associées : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective.
- Les opérations de maintenance proprement dites : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc.
- Les activités connexes : maintenance d'amélioration, rénovation, reconstruction, modélisation, travaux neufs, sécurité, etc. Cette réflexion terminologique et conceptuelle représente une base de référence pour :
 - L'utilisation d'un langage commun pour toutes les parties (conception, production, prestataires de services, etc.)
 - La mise en place de systèmes informatisés de gestion de la maintenance.

b) Les méthodes de maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.[2]

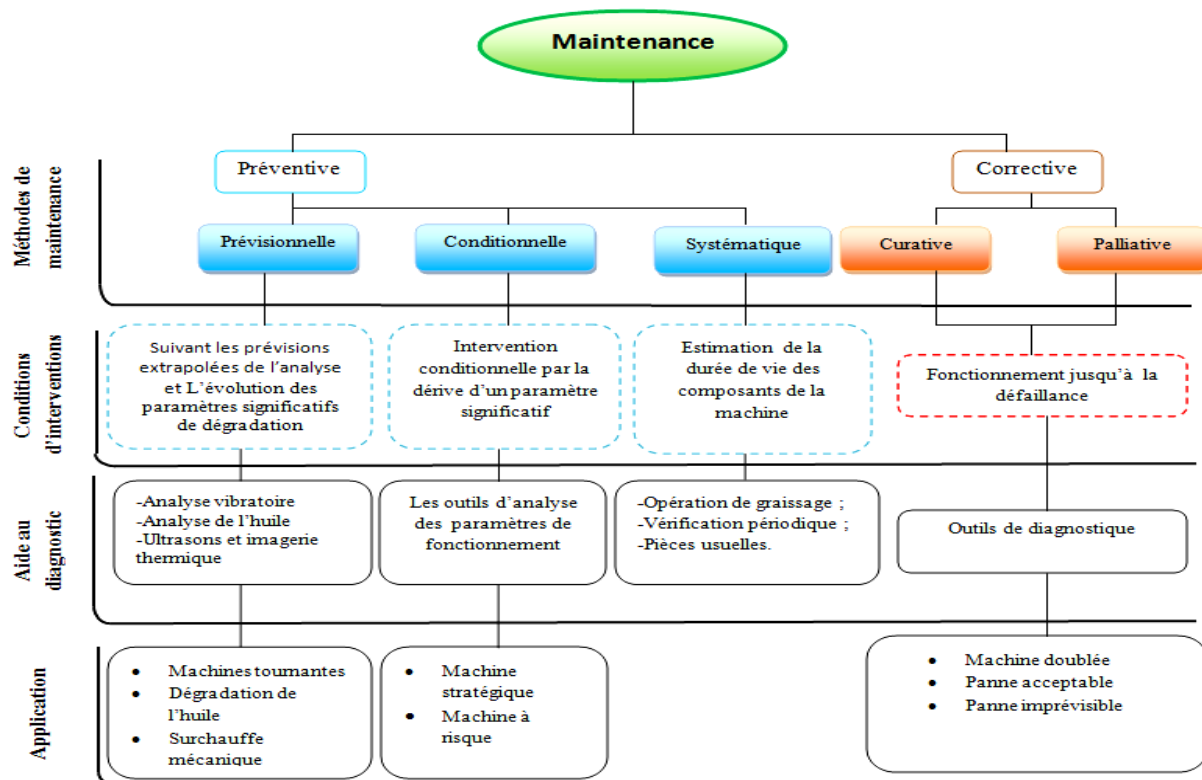


Figure 1 : Méthodes de maintenance [4].

I.5.1 La maintenance corrective

La norme **CEN 319-003** la définit comme suit : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». « ...elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données. » « ... elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables ». Elle est subie plus que gérée, elle a une forme primaire de la maintenance. [2]

Défaillance : altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

Il existe deux formes de défaillance :

- **Défaillance partielle** : altération de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.
- **Défaillance complète** : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

La maintenance corrective appelée parfois curative (**terme non normalisé**) a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation.

Selon la norme **NF EN 13306**, La maintenance corrective peut être : [5]

- **Différée** : maintenance corrective qui n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données.
- **D'urgence** : maintenance corrective exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables.

a. La maintenance curative ou réparation

a.1 Définition de la réparation

Actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne (**EN 13306 : avril 2001**). [5]

L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique. La réparation correspond à une action définitive.

L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu.

b. La maintenance palliative ou dépannage

b.1. Définition du dépannage

Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée (EN 13306 : Avril 2001). [5]

Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps.

Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

I.5.2. La maintenance préventive

Elle a pour objectif de réduire la probabilité de défaillance ou dégradation d'un matériel. Elle est aussi définie comme étant la réduction de la probabilité de défaillance d'un système ; selon la norme Afnor. Elle-même est divisée en deux catégories bien distinctes, systématiques et conditionnelles. [2]

a) La maintenance préventive systématique

Elle permet d'effectuer des opérations de maintenance, afin d'éliminer ou de diminuer les risques de dysfonctionnement des systèmes de production.

Elle s'effectue suivant un échéancier prévu et établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage du bien. Cette unité d'usage caractérise l'exploitation du bien.

La norme **AFNOR X60-010** la définit comme « ... activité déclenchée suivant un échéancier rétabli à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage », « ... les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique ». [2]

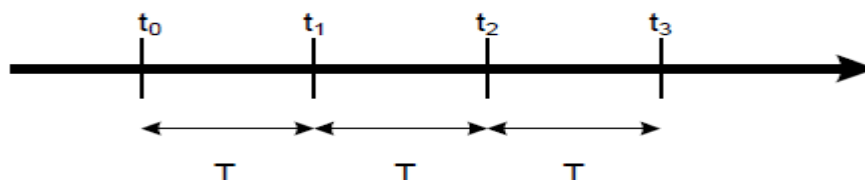


Figure .2 : Répartition de la maintenance systématique [7]

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Même si le temps est l'unité la plus répondue, d'autres unités peuvent être employées:

- Une quantité de produits fabriqués.
- Une longueur de produits fabriqués.
- Une distance parcourue.
- Une masse de produits fabriqués.
- Un nombre de cycles effectués.

b) La maintenance préventive conditionnelle

D'après la norme AFNOR il s'agit de la « maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic ; information d'un capteur, mesure...) » la maintenance conditionnelle permet d'assurer le suivi continu du matériel en service, et la décision d'intervention est prise lorsqu'il y a une évidence expérimentale de défaut imminent ou d'un seuil de dégradation prédéterminé. [2]

Cela concerne certains types de défauts, de pannes arrivant progressivement ou par dérive. L'étude des dérives dans le cadre des interventions de maintenance préventive permet de déceler le seuil d'alerte.

La maintenance préventive conditionnelle permet de :

- Optimiser les coûts de réparation ;
- Améliorer la gestion des stocks ;
- Garantir la qualité des produits ;
- Assurer la sécurité humaine ;
- Améliorer l'ordonnancement des travaux (le planning d'arrêt de machine devra être validé par la production).

Toutefois cette maintenance doit être équipée de moyens de télémaintenance, car les systèmes de supervision permettent la détection des aléas de fonctionnement.

Les informations sont reçues à travers les capteurs, ce qui nous permet de suivre l'évolution de la machine en temps réel

c) La maintenance préventive prévisionnelle

La norme AFNOR X60-010 la définit comme suit : « maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ». [2]

I.5.3. Les opérations de maintenance préventive

- Les inspections

Contrôles de conformité réalisés en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance.

- Visites

Opérations de surveiller qui, dans le cadre de la maintenance préventives systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ses interventions correspondent à une liste d'opérations définies préalablement qui peuvent entraîner une action de maintenance corrective.

- Contrôles

Vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut :

- Comporter une activité d'information.
- Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement.
- Déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (contrôles, visites, inspections) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

I.5.4 Les objectifs visés par la maintenance préventive

▪ Améliorer la fiabilité du matériel

La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement du matériel. Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimale et de supprimer complètement certaines défaillances.

▪ Garantir la qualité des produits

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de réglage et de fonctionnement soient respectés. Le contrôle des jeux et de la géométrie de la machine permet d'éviter les aléas de fonctionnement. La qualité des produits est ainsi assurée avec l'absence des rebuts.

▪ Améliorer l'ordonnement des travaux

La planification des interventions de la maintenance préventive, correspondant au planning d'arrêt machine, devra être validée par la production. Cela implique la collaboration de ce service, ce qui facilite la tâche de la maintenance.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

Les techniciens de maintenance sont souvent mécontents lorsque le responsable de fabrication ne permet pas l'arrêt de l'installation alors qu'il a reçu un bon de travail pour l'intervention. Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un planning défini à l'avance et prend en compte les impossibilités des impératifs de production.

▪ **Assurer la sécurité humaine**

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning. Elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

Par ailleurs le programme de maintenance doit aussi tenir compte des visites réglementaires.

▪ **Améliorer la gestion des stocks**

La maintenance préventive est planifiable. Elle maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tâche de gestion des stocks. On pourra aussi éviter de mettre en stock certaines pièces et ne les commander que le moment venu.

▪ **Améliorer le climat de relation humaine**

Une panne imprévue est souvent génératrice de tension. Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production. Certains problèmes, comme par exemple, le manque de pièces de rechanges, entraîne l'immobilisation de la machine pour une durée importante.

En résumé, il faudra examiner les différents services rendus pour apprécier les enjeux de la maintenance préventive :

- La sécurité : diminution des avaries en service ayant pour conséquence des catastrophes.
- La fiabilité : amélioration, connaissance des matériels.
- La production : moins de pannes en production.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

I.6. Les niveaux de maintenance

Tableau .1: les niveaux de maintenance [3]

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

I.7. Les échelons de maintenance

Il est important de ne pas confondre les niveaux de maintenance avec la notion d'échelon de maintenance qui spécifie l'endroit où les interventions sont effectuées. [2]

On définit généralement trois échelons qui sont :

- **La maintenance sur site** : l'intervention est directement réalisée sur le matériel en place.
- **La maintenance en atelier** : le matériel à réparer est transporté dans un endroit, sur site, approprié à l'intervention.

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- **La maintenance chez le constructeur ou une société spécialisée** : le matériel est alors transporté pour que soient effectuées les opérations nécessitant des moyens spécifiques.

Bien que les deux concepts de niveau et d'échelon de maintenance soient bien distincts, il existe une corrélation entre le niveau et l'échelon : les opérations de niveaux un et trois, par exemple, s'effectuant sur site, celles de niveau quatre en atelier, et celles de niveau cinq chez un spécialiste hors site (constructeur ou société spécialisée).

Si cela se vérifie fréquemment, il convient cependant de ne pas en faire une généralité. On peut rencontrer en milieu industriel des tâches de niveau cinq effectuées directement sur site.

I.8. Les coûts de maintenance

Les coûts de maintenance peuvent être divisés en deux grandes familles : les coûts directs qui conditionnent l'activité même de maintenance, ils sont quantifiables et les coûts indirects correspondant au « manques à gagner » résultat de l'indisponibilité de l'équipement de production, certains sont quantifiables d'autres non. [6]

I.8.1 Les coûts directs

- Coût de main d'œuvre
- Coût de formation du personnel
- Coût de consommables
- Coût d'équipement (équipement, instruments ou outils facilitant l'intervention)
- Coût de cotraitance

I.8.2 Coûts indirects « coût de défaillance »

- Réduction de la production (manque à gagner suite à l'arrêt de l'outil de production)
- Diminution de la quantité de production
- Charges financières d'amortissement
- Pénalités de retard

I.9.Moyens de la maintenance

I.9.1 Moyens humains

En maintenance, les tâches sont très précises, d'où la nécessité d'avoir une main d'œuvre qualifiable qui soit de qualité parce que les standards sont difficilement déterminés.
[5]

Pour avoir les moyens humains adéquats, il suffit :

- D'avoir une politique de besoins humains.
- De déterminer les structures (organigramme, hiérarchie, notion de spécialiste).
- De déterminer le niveau des effectifs.

I.9.2 Moyens matériels

Il est insensé d'investir dans des grosses installations sans penser aux très faibles outils et matériels nécessaires à la vie de ces installations. Le concepteur, lui, est très fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Généralement, il ne tient pas compte des conditions particulières d'entretien et attache une trop faible attention à la maintenabilité des équipements et à ses moyens. Pour les besoins matériels, nécessaires à un service maintenance, nous évoquerons trois points essentiels :

I.9.2.1 Outillages

Nous rencontrons deux types d'outillages :

- L'outillage ordinaire consommable qui fera l'objet d'un budget de consommation annuelle.
- L'outillage spécifique et de précision : il est généralement assez cher et donc amortissable.

I.9.2.2 Equipements supports

Ils se traduisent par l'ensemble des moyens supports tels que les équipements d'atelier (Machines, outils, banc d'essai...).

I.9.2.3 Pièces de rechange

La gestion de la pièce de rechange est un volet indissociable de la fonction maintenance. C'est, en effet, le problème des pièces de rechange qui cause les plus grands soucis aux gestionnaires d'installation industrielle. A cela, il faut ajouter l'approvisionnement qui pose généralement d'énormes problèmes, à s'avoir :

Chapitre I : Généralités sur la maintenance

- L'identification et la codification des pièces sont rendues difficiles par des problèmes de langue, les catalogues et les plans laissant à désirer.
- Le non maitrise dans l'expression des besoins ainsi que des préconisations des services utilisateurs de maintenance.
- Les procédures interminables d'achat et de dédouanement engendrent des délais très longs.

Très souvent ce sont les pièces banales qui causent l'arrêt d'une installation et la fourniture de telles pièces intéressent à peine les fournisseurs. Parfois, beaucoup de pièces arrivent aux ports et sont entreposées dans de mauvaises conditions climatiques avant de pouvoir d'être stockées dans des magasins qui, eux même sont souvent conçus de manière inadéquate.

I.9.3 La documentation

La réalisation des objectifs de la maintenance implique la mise en place de moyens plus au moins importants. Parmi ceux-ci, citons : la documentation qu'il faut distinguer comme suit :

I.9.3.1 La documentation générale

Elle même se décompose en une documentation sur les techniques professionnelles (Revue techniques, notes techniques générales, articles de conférence, livres et ouvrages, formulaires...) et une documentation sur l'outillage, les fournitures et les matériels banals.

I.9.3.2 La nomenclature des équipements

Afin de faciliter leur maintenance, les équipements et matériels de l'entreprise doivent être inventoriés, classés et codifiés en vue de constituer une nomenclature. Une telle nomenclature permet de classer et créer la documentation historique et technique des différents matériels.

La nomenclature est donc du type :

- Catégorie par famille.
- Constructeurs dans chaque catégorie
- Type chez chaque constructeur

Et sa présentation se décompose en deux parties :

- Liste du matériel par famille, catégorie, constructeur et type
- Liste du matériel par atelier ou groupe de production (centre de frais).

I.9.3.3 La documentation du matériel

La documentation du matériel comprend :

- La documentation technique constituée des dossiers techniques (ou dossiers-types), classées par type de machines : c'est l'identité du matériel.
- La documentation historique constituée par des dossiers techniques ou individuels et par des fiches historiques pour chaque machine c'est le suivi de la santé du matériel.

a) Le dossier technique

Ce dossier comprend tous les renseignements et documents qui concernent un même type de machine :

- Les éléments d'identification : désignation du type, constructeur, caractéristiques générales, liste de machines de même type, fiche technique.
- Le répertoire des documents classés dans le dossier.
- La synthèse des modifications effectuées sur ces machines.

Ce dossier est donc consulté lors des interventions de maintenance ou lors du dépouillement d'une expertise.

b) Le dossier historique (la fiche historique)

Ce dossier historique comprend tous les renseignements et documents concernant la vie de chaque machine. La fiche historique regroupe en elle-même les renseignements concernant les pannes (fréquence, importance, localisation) et les interventions de maintenance effectuées.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la maintenance est une fonction essentielle qui, selon le type de processus, peut être déterminante pour la réussite d'une entreprise. Les fonctions qui la composent et les actions qui les réalisent doivent être soigneusement dosées pour que les performances globales de l'outil de production soient optimisées.

Chapitre II

Chapitre II. Généralité sur les roulements

II.1.Introduction

Un roulement est un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation, c'est-à-dire il permet à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation défini. Sa fonction est de permettre la rotation relative de ces éléments, sous charge, avec précision et avec un frottement minimal. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Environ 40 % à 50 % des défauts rencontrés dans les machines asynchrones sont liés aux roulements [8].

Dans ce chapitre on va présenter les notions générales sur le roulement, ainsi que les avaries principales qui les affectent.

II.2.Définition du roulement

L'origine du mot roulement vient en fait des corps roulants (billes, rouleaux ou aiguilles) qui sont placés entre les deux éléments en rotation et qui permettent le roulement et non plus le frottement. La traduction de roulement en anglais est " Baring ", qui signifie supporter, ce qui est une des fonctions principales du roulement : supporter les charges.

II.3.Constitution des roulements

La majorité des roulements sont composés de deux bagues intérieure et extérieure, d'éléments roulants (billes ou rouleaux), et d'une cage. Les éléments roulants situés entre les deux bagues et sont maintenus à égale distance les uns des autres par la cage qui les guide et facilite leur rotation.

La surface sur laquelle roulent les éléments roulants est appelée « chemin de roulement ».

En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement.

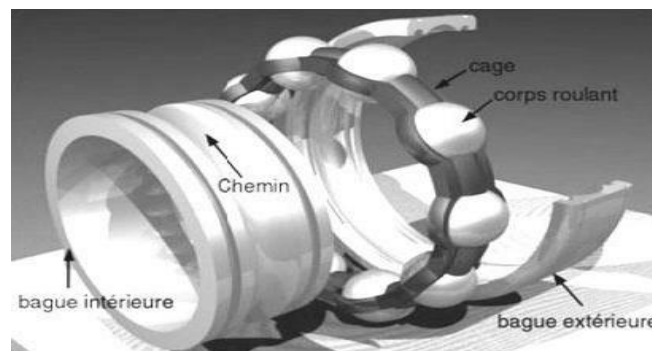


Figure.3 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée [9].

Chapitre II : Généralités sur les roulements

II.3.1.Éléments roulants

Les éléments roulants se divisent en deux catégories : les billes et les rouleaux.

Les rouleaux sont classés en fonction de leur forme, rouleaux cylindriques, rouleaux coniques, rouleaux sphériques ainsi que les aiguilles.

Le contact entre les éléments roulants et les bagues pour les roulements à billes est ponctuel alors que le contact pour les roulements à rouleaux est linéaire. Les roulements sont conçus de telle manière que les éléments roulants effectuent simultanément une rotation autour de leur propre axe et autour de l'axe des pistes.

II.3.2.Cages

La cage ne supporte pas directement les efforts appliqués au roulement. Elle permet de maintenir les éléments roulants à égale distance les uns des autres tout en les retenant à l'intérieur du roulement. Les types de cage varient en fonction de leur fabrication (en tôle emboutie, usinée, massive acier ou laiton, polyamide injecté) [10].

II.3.3.Bagues

Dans notre cas, la bague externe est en contact avec le stator, donc fixe, alors que la bague interne est en contact avec le rotor, donc tournante. Par ailleurs, les billes sont en contact, d'une part avec la piste de roulement interne et d'autre part avec la piste de roulement externe. On parlera d'ailleurs sans distinction de piste de roulement, de bande de roulement ou bien de chemin de roulement.

II.4.Caractéristiques des roulements

Les roulements sont produits sous de diverses formes et variantes ayant chacune des caractéristiques distinctes.

En comparaison avec les paliers lisses, les roulements ont les avantages suivants :

- Le couple de frottement au démarrage est plus faible et de plus n'est que légèrement supérieur au couple de frottement dynamique.
- Ils sont fabriqués suivant des normes internationales, sont interchangeables et facilement disponibles.
- Le graissage est simple et la quantité de graisse consommée très faible.
- En règle générale, ils acceptent à la fois des charges radiales et des charges axiales.
- Leur utilisation à basse comme à haute température est possible.
- La rigidité des roulements peut être augmentée par un pré charge.

II.5. Les types des roulements

II.5.1. Roulements radiaux et axiaux

La plupart des roulements peuvent supporter à la fois des charges radiales et des charges axiales. Les roulements ayant un angle de contact inférieur à 45° supportent mieux les charges radiales que les charges axiales. Ils sont appelés roulements radiaux. Les roulements ayant un angle de contact supérieur à 45° supportent mieux les charges axiales que les charges radiales. Ils sont appelés roulements axiaux ou butés.

II.5.2. Roulements standard et spéciaux

Grâce à leur normalisation et leur interchangeabilité internationale, les roulements peuvent être employés de façon très rationnelle. C'est pourquoi il est conseillé d'utiliser des roulements standards avec un équipement mécanique. Par ailleurs, il est possible ou parfois nécessaire d'utiliser des roulements non normalisés et de fabrication spéciale permettant de garantir des fonctions spécifiques au sein d'une machine. Les roulements standards présentent les caractéristiques suivantes:

A. Roulements à billes à gorges profondes

Les roulements à billes à gorges profondes sont les roulements les plus utilisés dans de nombreux domaines. Ils sont composés de roulements protégés, les étanchéités avec graisse facilitant leur utilisation. Ils sont également composés de roulements avec des segments d'arrêt pour faciliter le positionnement lors du montage de la bague extérieure, de roulements de compensation de dilatation qui absorbent les variations de dimension de la surface de serrage dues à la température du logement.

B. Roulements à billes à contact oblique

La ligne qui relie le point de contact de la bague intérieure, les billes et le point de contact de la bague extérieure tourne avec un certain angle (angle de contact) suivant la direction radiale. Il existe trois angles de contact standard.

Les roulements à contact oblique peuvent supporter une charge axiale, mais ne peuvent être montés seuls à cause de l'angle de contact. Ils doivent toujours être montés par paire ou combinés. Les roulements à billes à contact oblique à deux rangées (pistes doubles) ont un angle de contact est de 25° . Les roulements à billes à quatre points de contact peuvent supporter des charges axiales dans les deux directions.

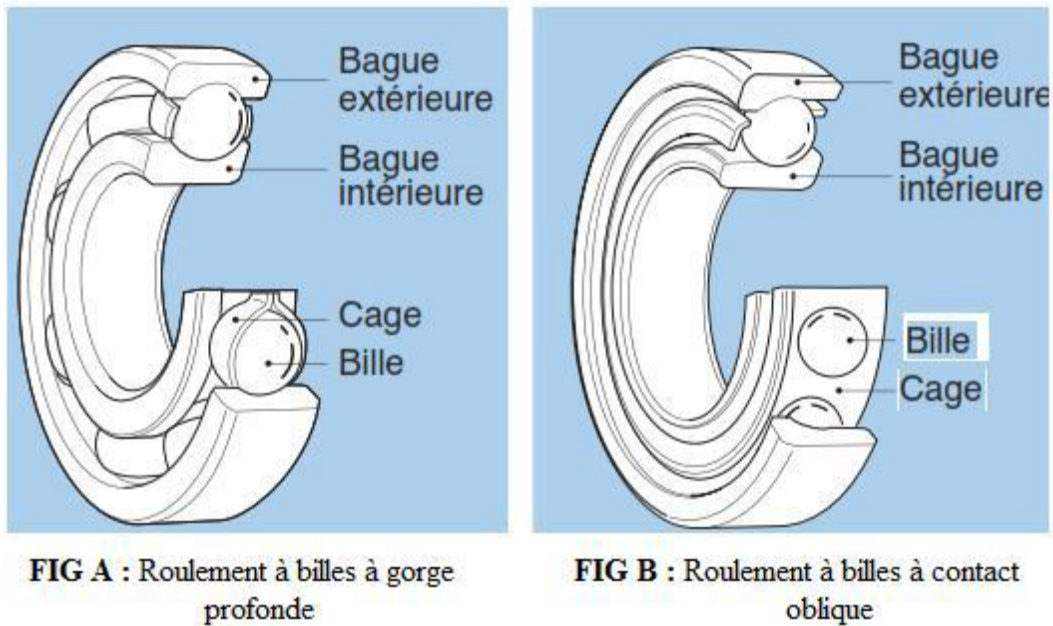


Figure 4 : différents types de roulement à billes [10]

C. Roulements à rouleaux cylindriques

Les éléments roulants sont des rouleaux, ce qui donne une capacité de charge élevée. Les rouleaux sont guidés par les épaulements de la bague intérieure et/ou extérieure. Celles-ci peuvent être séparables pour faciliter le montage, et elles peuvent être montées en ajustement serre sur l'arbre et dans le logement. S'il n'y a pas d'épaulements, la bague concernée peut se déplacer librement en direction axiale. Les roulements à rouleaux cylindriques sont idéaux pour être utilisés comme des « paliers libres » qui encaissent la dilatation de l'arbre. Lorsqu'il y a des épaulements, le roulement peut supporter une légère charge axiale entre les faces des rouleaux et les épaulements. La forme des faces de rouleaux et des épaulements a été adaptée pour augmenter la capacité de charge axiale.

La conception du roulement de type E augmente la capacité de charge radiale [10].

D. Roulements à rouleaux coniques

Les roulements à rouleaux coniques sont conçus de façon à ce que le chemin de roulement des bagues intérieures et extérieures et les génératrices des rouleaux coniques se coupent en un point qui se trouve sur l'axe du roulement. Ils reçoivent des charges combinées provenant de l'intérieure et roulent en se servant de cet appui comme guidage. Une force induite se produit axialement lorsqu'une charge radiale est appliquée.

Les roulements doivent donc être montés par paire. La bague intérieure à rouleaux et la bague extérieure sont séparables, ce qui facilite le montage avec un jeu ou pré-charge. Le réglage du

Chapitre II : Généralités sur les roulements

jeu interne (ou pré-charge) après montage est délicat et demande une attention particulière. Les roulements à rouleaux coniques sont capables de supporter de fortes charges axiales et radiales [10].

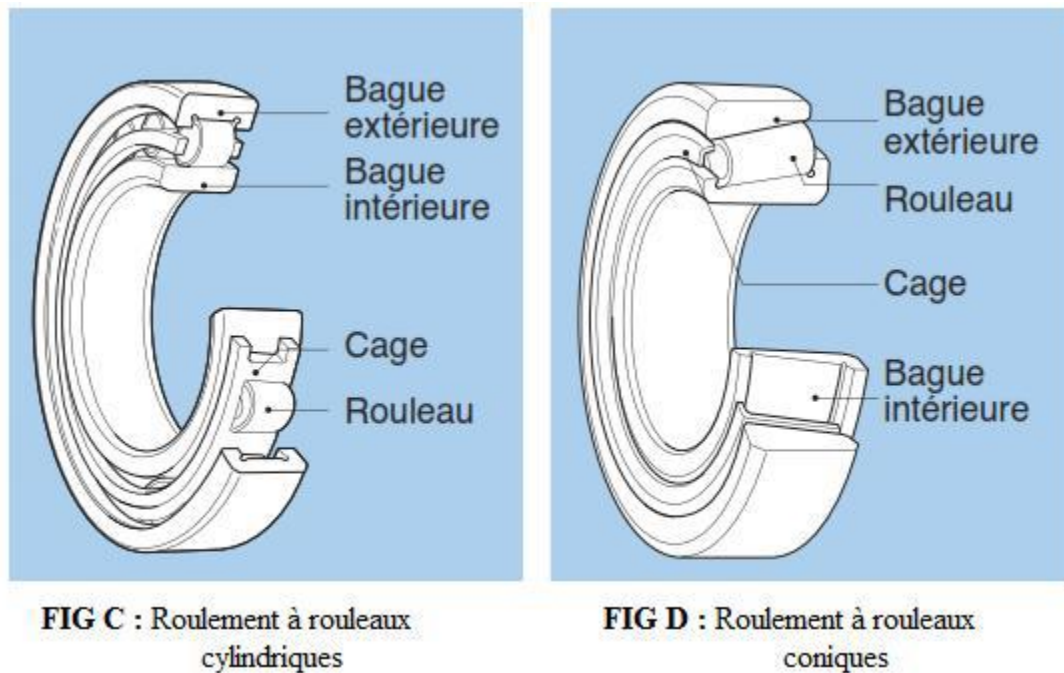


Figure 5: différents types de roulement à rouleaux [10].

E. Roulements à rouleaux sphériques

Equipes d'une bague extérieure dont le chemin de roulement est sphérique, et d'une bague intérieure avec deux rangées d'éléments roulants à rotule. Il existe plusieurs types de roulements différenciés par leur conception interne. Les roulements à rotule sur rouleaux peuvent également être proposés avec une bague intérieure dont l'alésage est conique. Le roulement peut être facilement monté sur un arbre grâce à un manchon de serrage ou de démontage. Il est capable de supporter de fortes charges et est donc souvent utilisé dans l'industrie. Lorsqu'une charge axiale extérieure trop importante est appliquée au roulement, la rangée non chargée peut subir des dommages. C'est pourquoi qu'il faut faire vérifier les conditions de fonctionnement [10].

F. Roulements à aiguilles

Les éléments roulants des roulements à aiguilles sont des aiguilles dont le diamètre maximal est de 5mm et sont 3 à 10 fois plus longues que leur diamètre. La section des roulements est mince, mais la capacité de charge est élevée malgré leur taille. Etant donné le grand nombre d'aiguilles, la rigidité de ces roulements est importante. Ils sont idéaux pour des

Chapitre II : Généralités sur les roulements

mouvements d'oscillations et de pivotement. Il existe de nombreux types de roulements à aiguilles [10].

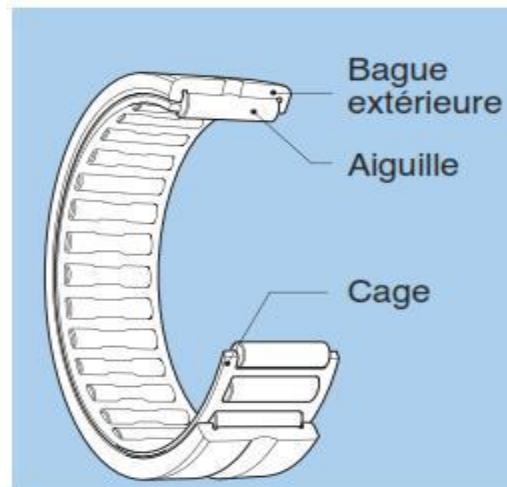


Figure 6 : roulement à aiguille [10].

G. Paliers

Un palier est composé d'un roulement à billes inséré dans différents types de logements. Le palier peut être fixé sur une machine et la bague intérieure peut être montée facilement sur un arbre avec une vis de blocage ou un collier excentrique. Le palier peut ainsi supporter un ensemble en rotation sans conception spéciale pour le montage. Une gamme variée de paliers standards est disponible, incluant les paliers à semelle et paliers appliqués. Le diamètre extérieur du roulement est sphérique, tout comme le diamètre intérieur du palier. Il permet ainsi un auto-alignement entre les deux paliers supportant l'arbre. Pour la lubrification, le roulement est pré-graissé en usine et une double étanchéité empêche l'entrée de particules ou d'eau.

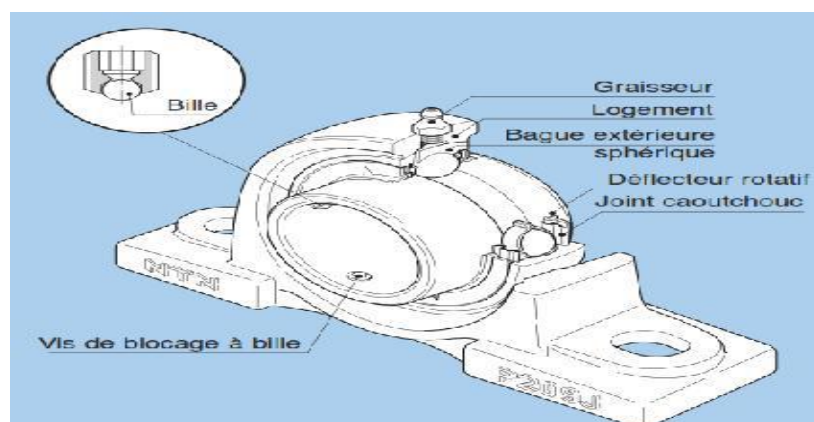


Figure 6 : Le palier [10]

II.6.Charges supportées par les roulements

Les actions mécaniques de contact exercées par les éléments roulants sur l'une ou l'autre bague sont en général schématisées par des forces ou des charges. On observe trois cas :

- Charge radiale (F_r) : sa direction, perpendiculaire à l'axe de rotation, passe par le centre géométrique du roulement. F_r est toujours portée par un rayon, d'où le nom de charge radiale.
- Charge axiale (F_a) : sa direction est celle de l'axe de rotation du roulement.
- Charge combinée (F) : c'est la combinaison des deux cas précédents. La direction de F , quelconque, passe par le centre géométrique du roulement.

- La projection de F sur l'axe de rotation donne une composante axiale F_a .

- La projection de F sur un rayon perpendiculaire à l'axe donne une composante radiale F_r

Remarque : (F_a) et (F_r) sont deux projections orthogonales possibles de F .

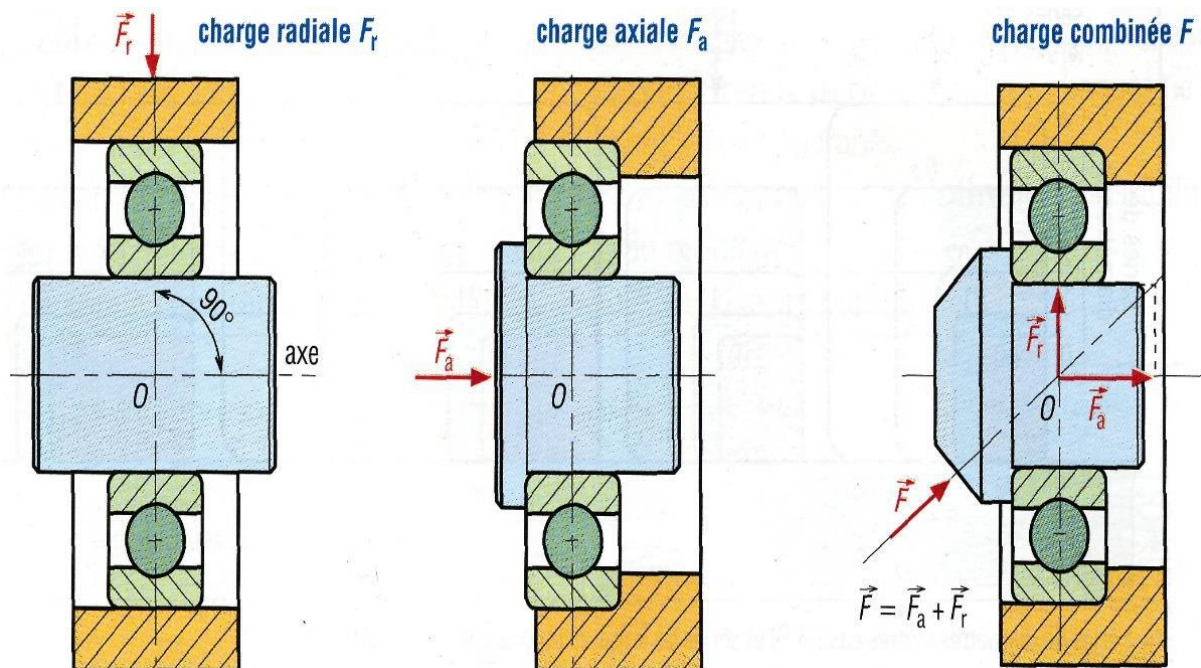


Figure 8 : les charges supportées par roulement

II.7.Choix d'un roulement

Le choix du type de roulements à utiliser dépend des exigences techniques propres à chaque cas, et ne peut se faire que dans la connaissance parfaite des caractéristiques techniques de chaque type

❖ Critères de choix

- Nature des charges : axiale, radiale ou combinée.
- Importance des charges (intensité).
- Vitesse de rotation.
- Perturbations : chocs, vibrations, niveau sonore...
- Montage et démontage : mise en place, accessibilité, réglage...
- Précision exigée : faux rond, précision de rotation...
- Rigidité exigée : déformations admissibles, désalignement des paliers...
- Encombrement, place disponible, dimensions des roulements.
- Longévité, durée de vie souhaitée.
- Conditions ambiantes : pollution, températures, lubrification, prix et disponibilité...

II.8. Avaries de roulement et remèdes

Si un roulement est manipulé correctement, la durée de vie avant fatigue de la matière peut être très longue. Si un problème apparaît prématurément, il peut provenir d'un mauvais choix de roulement, de manipulation ou de lubrification. Dans ce cas, il faut prendre en compte le type de machine sur laquelle est utilisé le roulement, sa position dans l'ensemble, les conditions de fonctionnement et l'environnement. Pour éviter que les problèmes se reproduisent, il faut avant tout bien déterminer quelles sont leurs causes potentielles. Les principales avaries d'un roulement, leurs causes et les actions correctives applicables sont [10]

II.8.1. Ecaillage

La surface des pistes présente des lésions superficielles. Par la suite, l'écaillage des pistes se généralise.



Figure 9 : l'écaillage des pistes [10]

Chapitre II : Généralités sur les roulements

- **Causes**

- Charges trop importantes, fatigue, mauvaise manipulation.
- Montage incorrect.
- Précision de fabrication du logement ou de l'arbre insuffisante.
- Jeu interne trop faible.
- Présence de particules étrangères.
- Corrosion.
- Mauvaise lubrification.
- Baisse de dureté suite à des températures trop importantes.

- **Actions correctives**

- Vérifier la sélection du roulement.
- Vérifier le jeu interne du roulement.
- Vérifier la définition de l'arbre et du logement.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.
- Revoir les méthodes de montage.
- Vérifier les pièces annexes du montage.
- Revoir le système de lubrification.

II.8.2. Blocage

Le roulement chauffe de façon continue .la matière change de couleur. Le roulement peut se bloquer.



Figure 10 : blocage [10].

- **Causes**

- Jeu interne trop faible (éventuellement par suite de l'ovalisation des portées de roulements)
- Lubrification insuffisante ou mal adaptée
- Surcharge importante
- Rouleaux inclinés ou de travers
- Baisse de dureté suite à des températures trop importantes.

- **Action correctives**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrifiant
- Vérifier le jeu interne du roulement (à augmenter si nécessaire)
- Vérifier la valeur de désalignement
- Vérifier les différentes conditions d'utilisation
- Vérifier la méthode de montage des roulements.

II.8.3.Fissures et cassures

Ecaillages ponctuels Présence de fissures et de cassures.

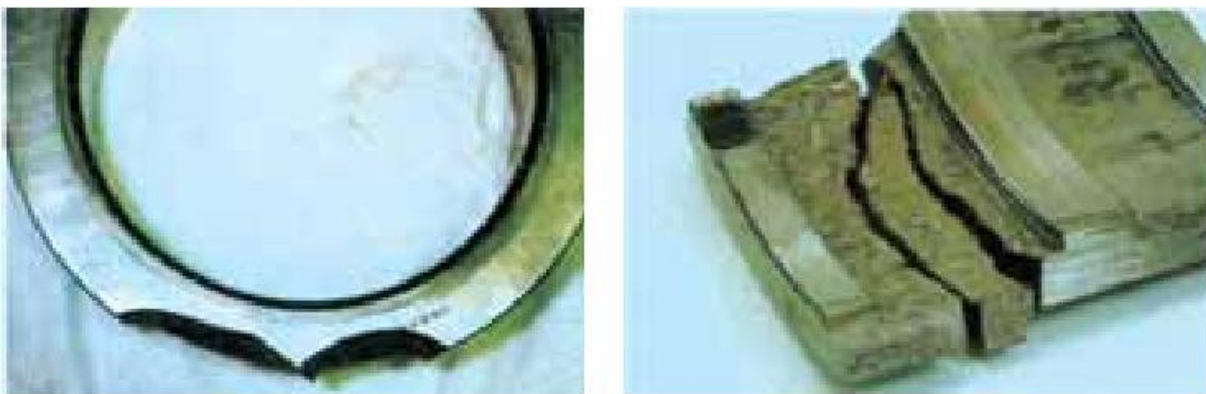


Figure 11 : fissure et cassure des bagues [10].

- **Causes**

- Chocs excessifs.
- Mauvaise manipulation (coups trop violents portés sur le roulement, présence de particules métalliques de taille importante).
- Ecaillage important au niveau des pistes.
- Ajustements trop serrés.
- Chanfreins d'entrée trop faibles.

- *Actions correctives*

- Vérifier le type de lubrifiant.
- Revoir l'ajustement et les matières.
- Vérifier conditions d'utilisation.
- Vérifier les conditions de manipulation lors du montage.

II.8.4. Détérioration de cage

Cage déformée, rupture de la cage, rupture de rivets.



Figure 12 : Détérioration de cage [10].

- *Causes*

- Moment excessif.
- Vitesse de rotation trop élevée ou survitesses ponctuelles.
- Lubrification insuffisante.
- Chocs avec corps étrangers.
- Vibrations excessives.
- Mauvaise manipulation lors du montage (désalignement).

- *Actions correctives*

- Vérifier le type de lubrification.
- Vérifier si le type de cage est adapté.
- Vérifier la rigidité de l'arbre et du logement.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.
- Vérifier les conditions de manipulation lors du Montage.

II.8.5 Déformation du chemin de roulement

Usure ou déformation irrégulière le long des surfaces du chemin de roulement.



Figure 13 : Déformation du chemin de roulement [10].

- *Causes*

- Précision incorrecte de l'arbre ou du logement.
- Mauvais montage.
- Rigidité de l'arbre ou du logement insuffisante.
- Vibration de l'arbre causée par un jeu interne trop grand.

- *Actions correctives*

- Vérifier le jeu interne du roulement.
- Vérifier la tolérance de l'arbre et du logement.
- Vérifier la rigidité de l'arbre et du logement.

II.8.6. Usure et grippage

Les pistes sont rugueuses et présentent des empreintes superficielles. Les épaulements de guidage ainsi que les extrémités des rouleaux deviennent rugueux.

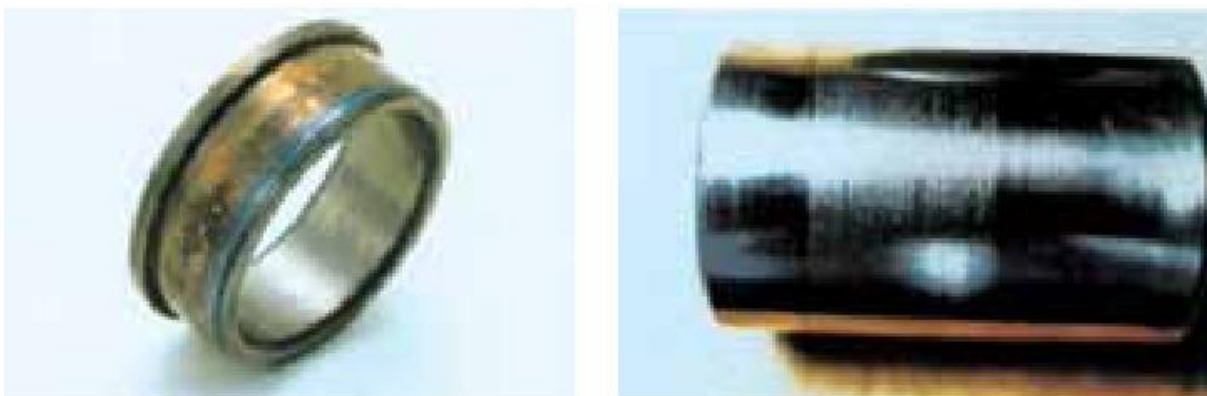


Figure 14 : usure et grippage [10].

- **Causes**

- Lubrification insuffisante.
- Présence de fines particules étrangères.
- Désalignement du logement par rapport à l'arbre.
- Rugosité de surface.
- Glissement des éléments roulants.

- **Actions correctives**

- Vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le principe de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la valeur de la pré-charge.
- Vérifier les conditions d'utilisation.
- Vérifier les méthodes et manipulations et de montage du roulement.

II.8.7. Corrosion

Trace de corrosion sur le roulement, coloration rougeâtre, corrosion éventuelle au pas des éléments roulants.



Figure 15 : corrosion des pistes [10].

- **Causes**

- Stockage du roulement inadapté.
- Emballage endommagé ou inefficace.
- Produit anticorrosion en quantité insuffisante.
- Pénétration d'eau, d'acide, etc.
- Manipulation à main nue.

- *Actions correctives*

- Vérifier les conditions de stockage.
- vérifier l'absence d'eau dans le lubrifiant.
- Améliorer l'étanchéité.
- Manipuler le roulement avec soin.

II.8.8. Corrosion de contact

Les surfaces de contact sont recouvertes de fines particules colorées provenant de micro-vibrations en fonctionnement. Traces de brinelling sur les pistes provenant de vibrations lorsque le roulement est à l'arrêt.



Figure 16 : corrosion de contact [10].

- *Causes*

- Ajustements inadéquats.
- Micromouvements oscillants.
- Lubrifiant inadapté.
- Charges non constantes.
- Vibrations et oscillations avec roulement à l'arrêt.

- *Actions correctives*

- Sélectionner un roulement mieux adapté.
- Vérifier le type de lubrification.
- Choisir des ajustements adaptés.
- Transporter séparément la bague intérieure et extérieure.

II.8.9.Usure

Usure des pistes, modification de la précision géométrique, présence dérayures, rodages des différents éléments roulants.



Figure 17 : usure (modification de la précision géométrique) [10].

- *Causes*

- Présence de particules étrangères dans le lubrifiant.
- Quantité de lubrifiant insuffisante.
- Rouleaux déformés.

- *Actions correctives*

- vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le principe de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la valeur de désalignement.

II.8.10.Passage de courants électriques à travers le roulement

Présence de cratères ainsi que de cannelures sur les pistes du roulement.



Figure 18 : effet de passage du courant sur les roulements [10].

- *Causes*

-Fuite de courant électrique passant au travers du roulement.

- *Actions correctives*

-Vérifier ou établir une mise à la terre de l'ensemble de la machine.

-Prévoir une isolation électrique du roulement.

II.8.11.Rayures et empreintes

Eraflures provoquées lors du montage, rayures provoquées par des corps étrangers très durs, enfoncement de la matière dû à une manipulation inadaptée.



Figure 19 : rayures et empreintes [10].

- *Causes*

-Présence de corps étrangers dans le roulement.

-Efforts de montage trop violent suite à un désalignement important.

- *Actions correctives*

-Montage minutieux à effectuer.

-Améliorer l'étanchéité (pour éviter l'entrée de corps étrangers).

-Améliorer la propreté du poste de travail et des pièces annexes.

II.8.12. Rotation de bagues

Etat de surface du logement d'aspect poli ou coloration Traces de frottement visible.



Figure 20 : rotation de bagues [10].

- *Causes*

- Ajustements insuffisants.
- Manchon de serrage pas assez serré.
- Variations de température importantes provoquant des dilatations inégales.
- Charges très importantes.

- *Actions correctives*

- Vérifier les ajustements.
- Vérifier les conditions de fonctionnement.
- Vérifier les précisions des portées de roulement.

II.8.13. Taches et décoloration

Disparition du lustre des surfaces de chemin de roulement. Surfaces mates, rugueuses, et/ou trouées, couvertes de petits bossés.



Figure 21 : taches et décoloration [10].

- *causes*

- Entrée de particules étrangères.
- Lubrification insuffisante.

- *Actions correctives*

- vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Vérifier la pureté de l'huile lubrifiante (propreté du filtre, etc.).

II.8.14.Écaillage en peau d'organe (peeling)

Petites traces d'écaillage (environ 10 μ m), présence de nombreuses rayures très fines.



Figure 22 : écaillage en peau d'organe (peeling) [10].

- *Causes*

- Entrée de particules étrangères.
- Lubrification insuffisante.

- *Actions correctives*

- vérifier l'efficacité du lubrifiant ainsi que le type de lubrification.
- Améliorer l'étanchéité.
- Améliorer les conditions de manipulation.

II.9.Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur le roulement, sa conception, Ses caractéristiques et ses défauts, les roulements sont des éléments essentiels dans l'équipement. Mais ils sont sensibles et responsables de plusieurs problèmes touchant les machines tournantes vue la place importante qu'occupent ces éléments.

Une des opérations qui a le plus d'impact provoquant des problèmes des roulements est la lubrification ce que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Chapitre III. Lubrification des roulements

III.1.Introduction

La lubrification est une opération essentielle pour le bon fonctionnement du roulement. 70% des avaries de ces éléments sont dues à des problèmes de lubrification.

Elle a pour objectif d'interposer un film de lubrifiant (dit film d'huile) entre les corps roulants et le chemin de roulement, afin d'éviter l'usure et le grippage des surfaces en contact.

De plus, le lubrifiant assure une protection contre l'oxydation et la pollution extérieure et, dans le cas de l'huile, un refroidissement.

La durée de vie du roulement est directement liée à l'efficacité du film d'huile qui dépend :

- de la nature du lubrifiant et donc de ses capacités à tenir en température, vitesse...
- de la charge et de la vitesse du roulement [13]

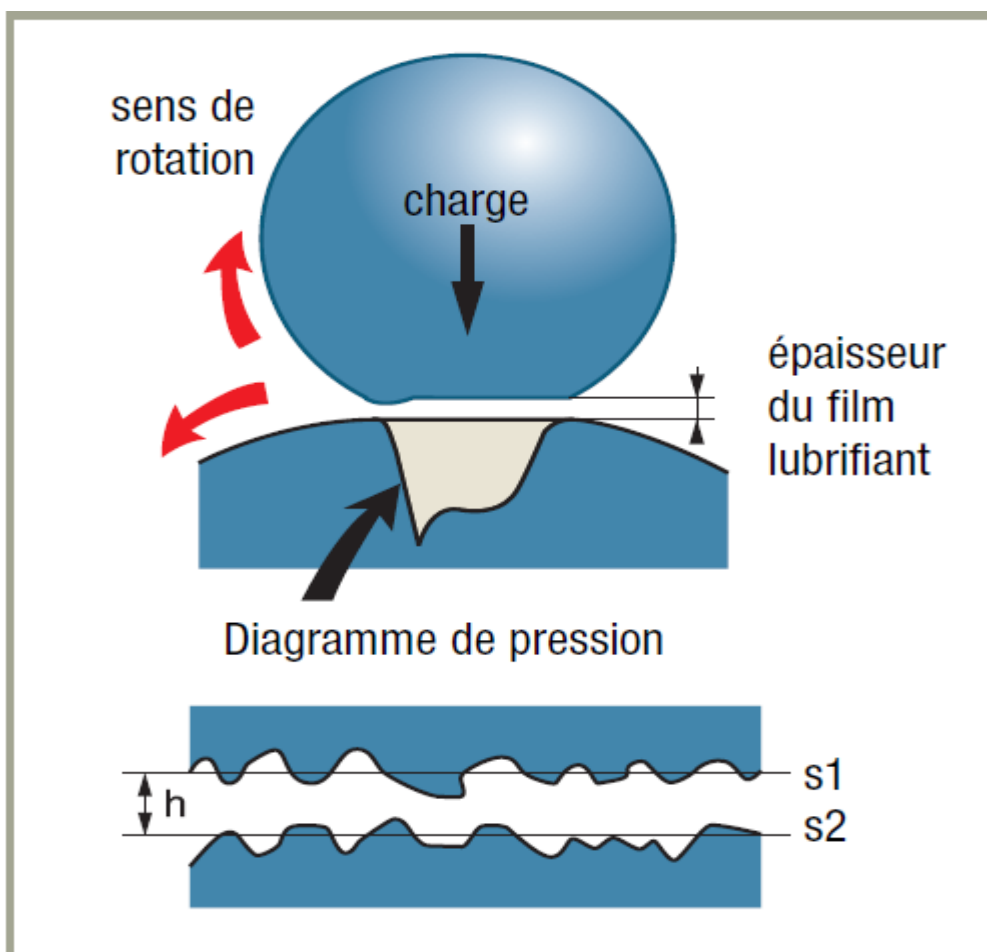


Figure 23 : film du lubrifiant

III.2.Lubrification

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion... Dans ces situations, les écoulements fluides sont parallèles aux surfaces, ce qui simplifie leur description et leur calcul (théorie de la lubrification). On parle de lubrification dans le cas où le lubrifiant (mécanique) est liquide et de graissage dans le cas où il est compact.

- En mécanique, on lubrifie les pièces de métal ou de céramique avec un corps gras, comme de l'huile ou de la graisse. Les lubrifiants sont des produits liquides, pâteux ou solides d'origine minérale (hydrocarbures pour l'essentiel), animale, végétale ou synthétique.
- En biologie, la lubrification intervient sous la forme de production, par les muqueuses concernées, d'un mucus à base d'eau. Elle intervient également dans le fonctionnement des articulations qui comptent parmi les meilleurs mécanismes « glissants » que l'on connaisse (Lubrifiant anatomique). [11]

III.3.Rôle des lubrifiants

Les lubrifiants ont plusieurs fonctions le plus importantes sont :

- Réduire les frottements dans les machines et par conséquent économise l'énergie, l'énergie de frottement étant intégralement dissipée en chaleur. La réduction du coefficient du frottement entraîne la diminution des températures de fonctionnement des mécanismes.
- Combattre l'usure des surfaces frottantes sous toutes ses formes et les protéger contre la corrosion et la rouille.
- Refroidir les machines en évacuant la chaleur produite dans le contact.
- Contribuer à l'étanchéité aux gaz, aux liquides et aux contaminants solides.
- Garder propre les surfaces et les circuits en évacuant les produits indésirables (poussières, débris d'usure, ...).
- Transmettre l'énergie dans les systèmes hydrauliques.
- Absorber les chocs et réduire le bruit.

Chapitre III : lubrification des roulements

- Contrôler l'oxydation pour prévenir des changements de viscosité. [12]

III.4. Les lubrifiantes

Des lubrifiants appropriés et des intervalles d'entretien réguliers sont des facteurs déterminants pour une longue durée d'utilisation des roulements.

III.5. Choix du type de lubrification

Tableau 2 : Choix du type de lubrification. [13]

	Lubrification à l'huile	Lubrification à la graisse
Avantages	<ul style="list-style-type: none">- Bonne pénétration dans le roulement- Bonne stabilité physico-chimique- Refroidissement- Contrôle aisé du lubrifiant : état et niveaux	<ul style="list-style-type: none">- Propreté du mécanisme- Etanchéité plus facile à réaliser- Barrière de protection- Simplicité des montages- Facilité de manipulation- Réduction ou suppression du graissage d'appoint- Possibilités d'utiliser des roulements pré-graissés
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">- Etanchéité nécessaire du montage- En cas d'arrêt prolongé, mauvaise protection contre l'oxydation et l'humidité- Retard au démarrage lorsqu'une mise en circulation autonome préalable à la rotation est nécessaire	<ul style="list-style-type: none">- Coefficient de frottement plus élevé que l'huile- Evacuation thermique plus faible- Le remplacement (si nécessaire) requiert le démontage du roulement et son lavage- Pas de possibilité de vérifier un niveau de graisse donc nécessité d'une retenue de graisse fiable ou bien d'un apport périodique pour compenser les fuites, la pollution ou le vieillissement

III.6.Lubrification à la graisse

III.6.1.Caractéristiques des graisses

Une graisse est un produit de consistance semi-fluide à solide, obtenu par dispersion d'un agent épaississant (savon) dans un liquide lubrifiant (huile minérale ou synthétique).

Pour apporter certaines propriétés particulières, des produits d'addition peuvent être inclus.

L'utilisation croissante de roulements lubrifiés à la graisse, associée au développement du concept de graissage à vie, fait de la graisse un composant à part entière du roulement. La durée de vie du roulement, son comportement dans des environnements divers, sont largement conditionnés par les propriétés de la graisse utilisée.

III.6.2.Consistance

Grades NLGI (National Lubrication Gréasse Institute) correspondant à une valeur de pénétration dans la graisse travaillée (selon spécification d'essai ASTM/D217).

- Pour les roulements, la consistance retenue en général est le grade 2.
- Viscosité de l'huile de base : généralement définie en cSt (mm²/s) à 40°C.

Densité : de l'ordre de 0,9.

- Point de goutte : température à laquelle tombe la 1ère goutte d'une graisse liquéfiée par chauffage d'un échantillon.
- Ordre de grandeur : 180°C/260°C selon les constituants de la graisse. La température maximale d'utilisation de la graisse est toujours très inférieure au point de goutte.

Tableau 3 : Consistance des graisses

Grades NLGI	Pénétration travaillée	Consistance
0	385 – 355	Semi-fluide
1	340 – 310	Très molle
2	295 – 265	Molle
3	250 – 220	Moyenne
4	205 – 175	Semi-dure

III.6.3. Caractéristiques fonctionnelles

Les conditions de travail imposées au lubrifiant (laminage, malaxage) nécessitent des graisses spéciales pour roulements qui ne peuvent pas être sélectionnés uniquement à partir de leurs caractéristiques physico-chimiques.

Le Centre de Recherche et d'Essais SNR procède en permanence à des essais d'homologation sur roulements qui nous permettent de conseiller la graisse la mieux adaptée à l'application.

Le cahier des charges d'homologation porte sur les critères de base suivants :

- Endurance en roulement à billes
- Endurance en roulement à rouleaux
- Tenue à l'eau
- Tenue en haute et basse température
- Adhérence (centrifugation)
- Résistance aux vibrations (faux effet Brinell)
- Tenue en grande vitesse

III.6.4. Mise en œuvre

Les roulements étanches et protégés sont garnis de graisse par construction. Pour les autres, la mise en place de la graisse doit être faite avec beaucoup de soin pour ne pas pénaliser les performances du roulement.

❖ Méthode d'apport de la graisse

La propreté est essentielle

Tout corps étranger pénétrant dans la graisse peut amener une destruction prématurée du roulement.

- Bien nettoyer l'environnement du roulement
- Protéger les récipients de graisse de la pollution
- L'utilisation du tube ou de la cartouche de graisse est une garantie de propreté

La graisse doit être déposée le plus près possible des parties actives du roulement (pistes et corps roulants)

Faire pénétrer la graisse entre la cage et la piste de la bague intérieure notamment pour les roulements à contact oblique et les roulements à rotule.

Pour chaque palier noter la date des lubrifications faites et à faire, le type et le poids de Graisse.

Chapitre III : lubrification des roulements

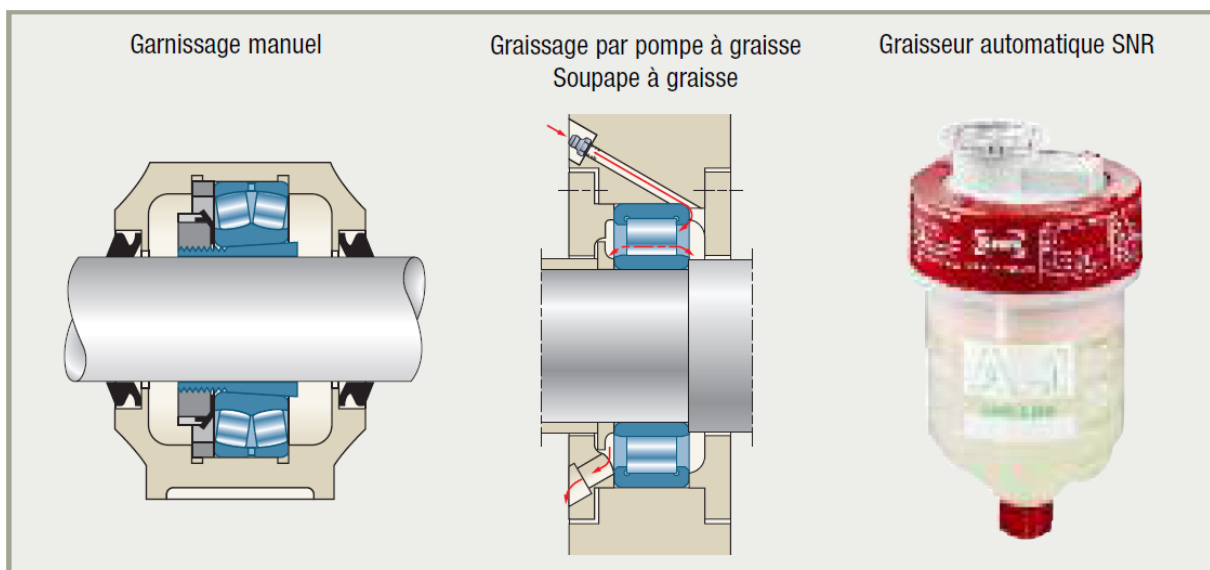
➤ Paliers et roulements avec dispositif de graissage

- Nettoyer la tête du graisseur
- Eliminer toutes les impuretés
- Vérifier et nettoyer le bec de la pompe à graisse
- Introduire la graisse
- Veiller particulièrement à vérifier la quantité introduite
- Eliminer la graisse usagée tous les 4 ou 5 apports
- Lorsque les intervalles de relubrification sont courts, prévoir un dispositif pour l'évacuation de la graisse usagée.

➤ Paliers et roulements sans dispositif de graissage

- Nettoyer soigneusement le palier avant l'ouverture
- Enlever la graisse usagée avec une spatule non métallique
- Introduire la graisse entre les corps roulants, des deux côtés
- Graisser les chicanes et les joints

III.6.5. Dispositifs de graissage



Chapitre III : lubrification des roulements

III.6.6.Choix de la graisse

Le choix de la graisse repose sur la connaissance des conditions de fonctionnement qui doivent être définies de la manière la plus précise possible: température, vitesse, charge, ambiance, vibrations, contraintes spécifiques à l'application.

Faire le choix de la graisse à utiliser en liaison avec votre interlocuteur SNR.

Le tableau page suivante permet une première orientation.

Tableur 4 : choix de graisses

Fonctionnement prédominant	Limites d'utilisation		Préconisation générale	Exemple d'applications
	Temps °C	Vitesse		
Usage Courant	-30 à + 120	< vitesse limite du roulement	<ul style="list-style-type: none"> _ Huile minérale _ Savon traditionnel (lithium, calcium...) _ Consistance : généralement grade 2, grade 3 pour roulements grande dimension ou avec particularité de fonctionnement _ Baisse des performances à partir de 80° C en continu ; certaines applications peuvent demander un choix mieux adapté 	<ul style="list-style-type: none"> _ Machines agricoles _ Mécanique générale _ Matériel manutention _ Outillage Electrique
Forte Charge	-30 à +110	< 2/3 vitesse limite du roulement	_ Similaire aux graisses d'usage courant avec additif extrême pression	<ul style="list-style-type: none"> _ Automobile _ Sidérurgie _ Matériel travaux publics
Haute Température	-30 à +130	< 2/3 vitesse limite du roulement	_ Savon traditionnel avec huile de base minérale de forte viscosité ou synthétique	<ul style="list-style-type: none"> _ Moteurs électriques classe E _ Moteurs électriques classe F _ Alternateurs
	-20 à +150			
	-20 à +220	≤1/3 vitesse limite du roulement	<ul style="list-style-type: none"> _ Graisses entièrement synthétiques _ Les graisses avec huile de base silicone ont une tenue réduite sous 	<ul style="list-style-type: none"> _ Equipements de fours _ Moteurs électriques classe H

Chapitre III : lubrification des roulements

			charge	_ Coupleurs
	-20 à +250	< 1/5 vitesse limite du roulement	-Produits de synthèse se présentant sous forme solide ou pâteuse -Produits difficilement miscibles	- Equipements de fours _ Wagonnets de four
Basse Température	jusqu'à -50	≤ 2/3 vitesse limite du roulement	-Huile de base de très faible viscosité Attention à la retenue de graisse si température supérieure à 80° C	_ Aviation _ Engins Spéciaux
Grande Vitesse	-20 à +120	≤ 4/3 vitesse limite du roulement	Huile de très faible viscosité	_ Broches de machines- outils _ Machines à bois _ Broches textile
Humidité	-30 à +120	≤ 2/3 vitesse limite du roulement	_ Graisse traditionnelle fortement dopée avec additifs anticorrosion	_ Machines à laver
Centrifugation Vibrations Bague extérieure tournante	-20 à +130	≤ 2/3 vitesse limite du roulement	_ Graisse consistance (grade 2) à forte adhérence	_ - Alternateurs Matériel travaux publics -Poulies folles
Usage Alimentaire	-30 à + 120	≤ 2/3 vitesse limite du roulement	Compatible alimentaire	-Industrie agro- alimentaire
Forte charge et faible vitesse	-5 à + 140		Adaptée à un fonctionnement à très faible vitesse et très forte charge	-Industrie lourde : sidérurgie, papeteries, carrières

III.6.7. Quantité de graisse

III.6.7.1. Graissage initial

La quantité de graisse nécessaire au bon fonctionnement du roulement doit occuper un volume égal à environ 20 à 30% du volume libre interne de celui-ci.

Ordre de grandeur de la quantité de graisse à introduire dans le roulement ouvert

$$G = 0.005D * B$$

G : Quantité de graisse en gramme ou cm³

D : Diamètre extérieur du roulement en mm

B : Largeur du roulement en mm

La quantité peut être augmentée de 20% pour les paliers munis d'un orifice d'évacuation de la graisse usée.

Un roulement tournant à très faible vitesse tolère un plein remplissage, ce qui est favorable à sa protection en ambiance très polluée (galets de manutention...)

Il est très important que cette quantité soit maintenue dans le roulement ; vérifier que les pièces adjacentes (joints déflecteurs) sont capables de limiter le transfert de graisse. S'il existe un volume adjacent libre, le remplir à 50% de graisse.

On vérifie que la quantité de graisse est convenable lorsque la température du roulement se stabilise à un niveau supérieur de 10 à 30°C à celui de la température ambiante, après un régime transitoire inférieur à une heure durant lequel la température passe par une pointe plus élevée.

III.2.6.2.Regraissage

❖ Fréquence de regraissage

Le tableau ci-dessous permet de déterminer la fréquence de base en heures en fonction du type de roulement et de la vitesse de rotation

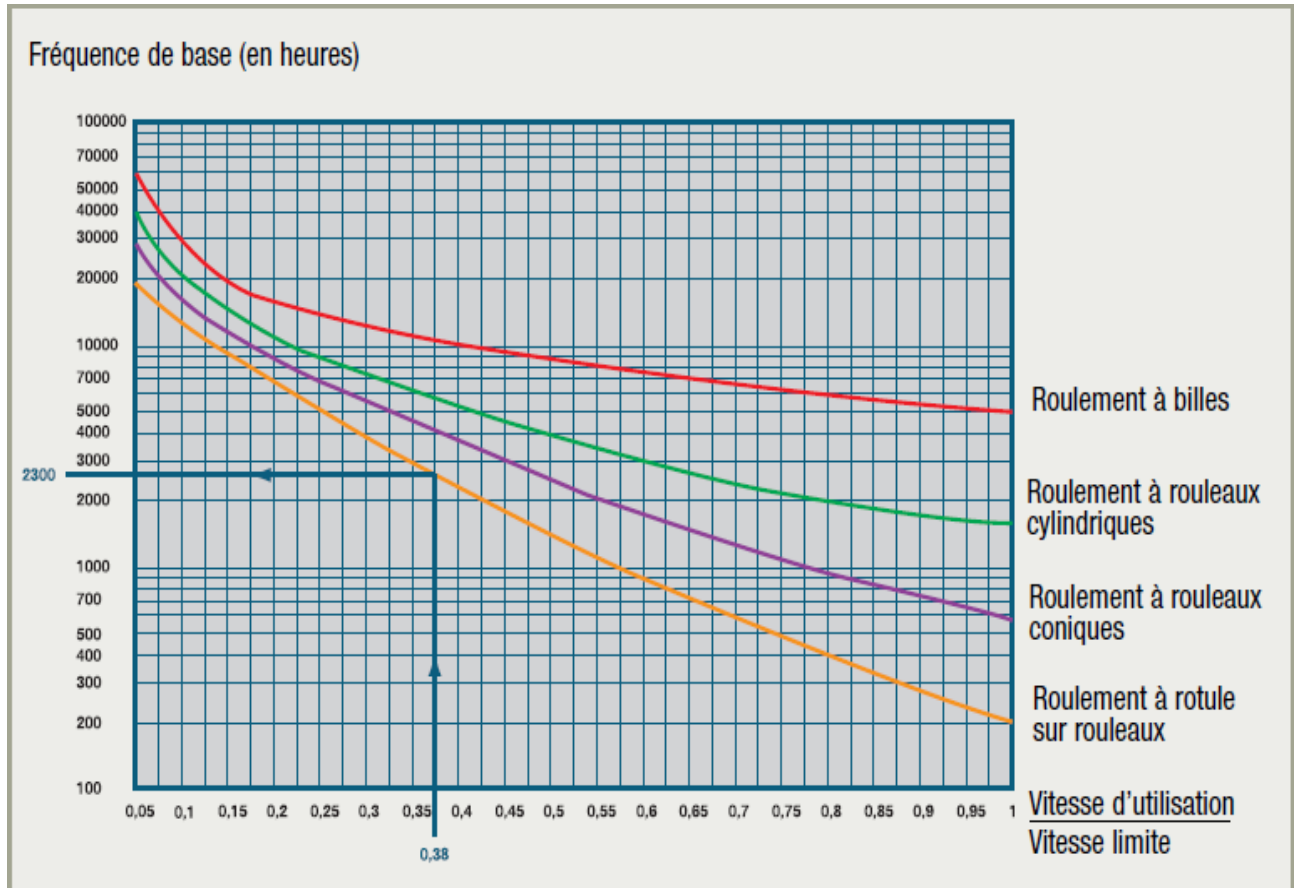


Figure 25 : diagramme fréquence de base

❖ Correction de la fréquence de regraissage

La fréquence de base (F_b) doit être corrigée par les coefficients issus du tableau ci-dessous, en fonction des conditions de fonctionnement particulières du mécanisme, selon la relation

$$F_c = F_b \times T_e \times T_a \times T_t$$

Chapitre III : lubrification des roulements

Tableau 5 : coefficient de fréquence de correction de graissage

Coefficient	Conditions	Niveau	Valeur du coefficient	
Te	Environnement			
	-poussière	-moyen		0,8
	-Humidité	- fort		0,5
	-condensation	- très fort		0,3
Ta	Application			
	- avec chocs	-moyen		0,8
	- avec vibrations	- fort		0,5
	- avec arbre vertical	- très fort		0,3
Tt	Températures	75°C		0,8
		75° à 85°C	0,5	avec graisse
		85° à 120°C	0,3	Standard
		120° à 170°C		avec graisse haute température

III.6.7.3. Poids de graisse

Le tableau, ci-dessous, permet de déterminer le coefficient c à appliquer, en fonction de la fréquence corrigée en heures, pour obtenir le poids de graisse à renouveler par la relation

$$P = D \times B \times c$$

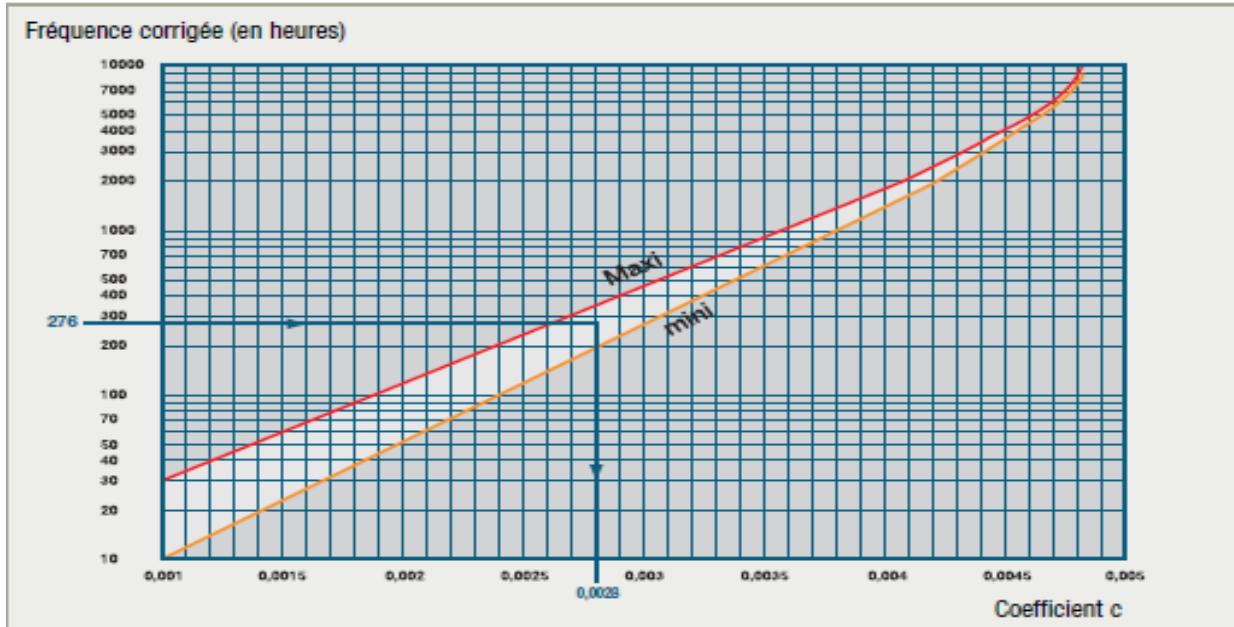


Figure 26 : diagramme de poids de graisse

Exemple

Un roulement (22212 EA), graissé avec une graisse standard, tournant à 1500 tr/mn en environnement poussiéreux, à 90°C sans autres contraintes d'application :

22212 – Roulement à rotule sur rouleaux

Vitesse utilisation / Vitesse limite = 1500 tr/mn / 3900 tr/mn = 0,38

D'ou fréquence de base : $F_b = 2300$ h (voir graphique page précédente)

Coefficients

$c = 0,028$

$T_e = 0,5$ poussières

Diamètre $D = 110$

$T_a = 0,8$ normal

Largeur $B = 28$

$T_t = 0,3$ 90°C

Poids de graisse : $P = 110 \cdot 28 \cdot 0,0028 = 9$ grammes

Fréquence corrigée : $F_c = F_b \cdot T_e \cdot T_a \cdot T_t = 2300 \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,3 = 276$ Heures.[13]

Chapitre III : lubrification des roulements

III.7.Lubrification à l'huile

La lubrification à l'huile est généralement employée lorsque le roulement est intégré dans un mécanisme déjà lubrifié à l'huile (réducteur, boîte de vitesses) ou bien lorsqu'il peut bénéficier d'un système de graissage centralisé où l'huile est utilisée aussi comme réfrigérant.

III.7.1.Type d'huile

Principaux types d'huiles utilisés pour la lubrification des roulements.

Tableau 7 : type d'huile

		Huiles minérales	Huiles synthétiques	
			Ester	perfluoroalkiléther
Commentaires		Utilisation standard	Utilisation spéciale généralement à haute ou basse température	
Viscosité	Indice	80 – 100	130 – 180	60 - 130
	Variation avec la température	Importante	Faible	faible
Densité		0.9	0.9	1.9
Point de congélation		-40 à -15°C	-70 à -30°C	-70 à -30°C
Point d'inflammation		< 240 °C	200 à 240 °C	non inflammable
Résistance à l'oxydation		Moyenne	Bonne	excellente

➤ Viscosité

Le choix de la viscosité de l'huile est très important pour l'efficacité de la lubrification, car un lubrifiant plus visqueux élève la température de fonctionnement du roulement.

➤ Additifs

Les additifs les plus utilisés sont les Extrêmes Pressions, anti-usure et anti-corrosion. Le choix d'un additif se fait avec beaucoup d'attention. Il est nécessaire de s'assurer auprès du fabricant du lubrifiant de son influence sur le comportement du roulement..

- Extrême Pression
- Anti-usure
- Anticorrosion

➤ Pollution

L'huile de lubrification doit être propre.

➤ Lubrifiants spéciaux

Dans certains montages, le roulement peut être lubrifié par le liquide véhiculé dans le montage (huile hydraulique, gazole).

III.7.2. Systèmes de lubrification

❖ Bain d'huile

Utilisé dans les mécanismes fermés et étanches. Niveau d'huile au niveau des corps roulants inférieurs des roulements les plus bas. Vitesse modérée, la dissipation de chaleur étant limitée.

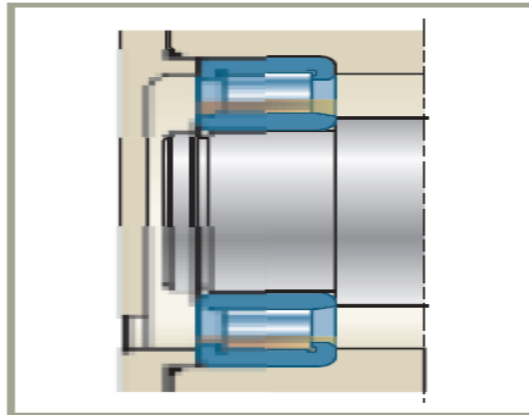


Figure 27 : bain d'huile

❖ A huile perdue

Arbre tournant à grande vitesse.

Evacuation nécessaire de l'huile usagée

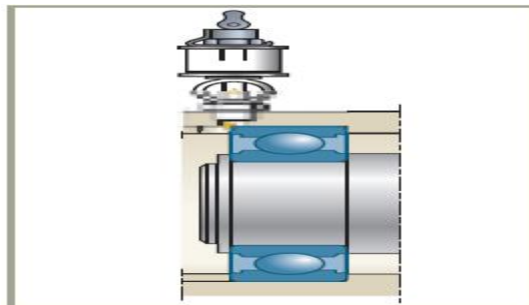


Figure 28 : huile perdue

❖ Ruissellement et projection

Projection faite généralement par les engrenages.

Des gouttières peuvent diriger l'huile vers le roulement.

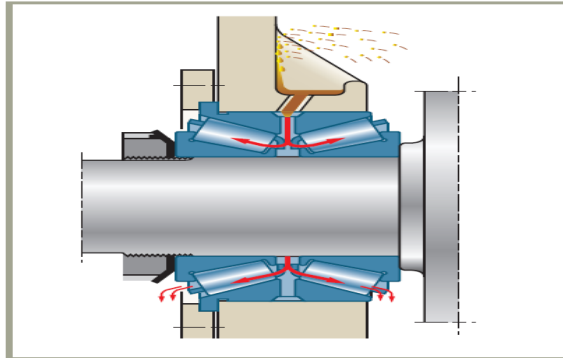


Figure 29 : Ruissellement et projection

❖ Circulation d'huile

Une pompe assure un débit constant, une réserve permet d'attendre l'amorçage au démarrage.

L'huile peut être filtrée et refroidie dans un échangeur pour obtenir de meilleures performances.

La circulation d'huile peut parfois être intermittente.

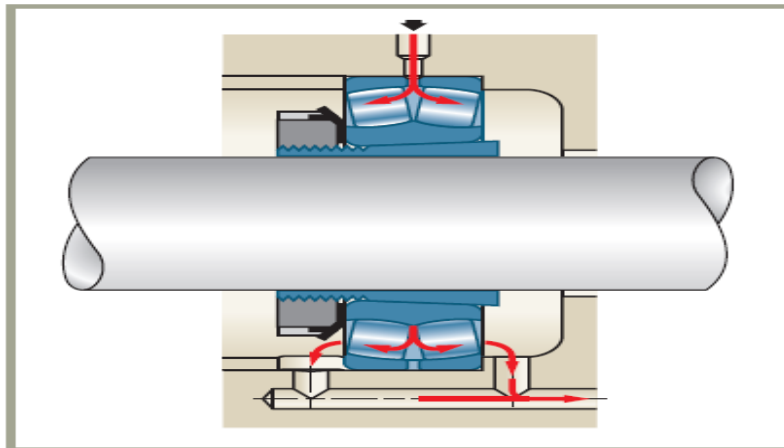


Figure 30 : circulation d'huile

❖ Brouillard d'huile

C'est aussi un mode de lubrification à huile perdue à faible consommation. Le brouillard d'huile sous pression atteint toutes les parties du roulement, interdit l'entrée de corps étrangers et assure le refroidissement.

Utilisé pour les roulements de précision tournant à grande vitesse.[13]

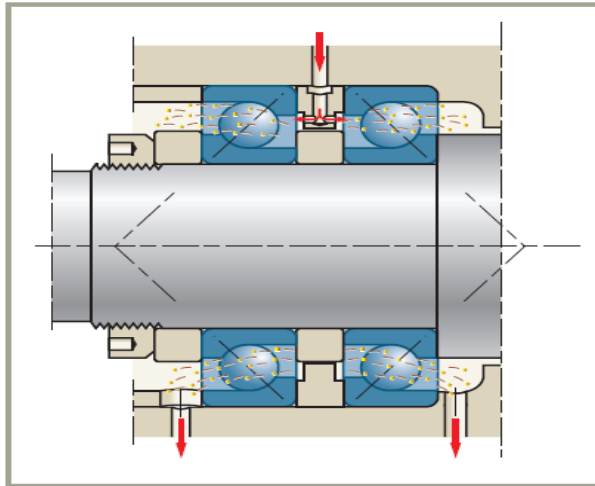


Figure 31 : Brouillard d'huile

III.8. Conclusion

A partir de ce chapitre, la lubrification des roulements c'est l'action la plus importante pour augmenter la durée de vie et diminuer la probabilité de défaillance de cet organe principal.

Pour améliorer la fiabilité des roulements il-y-a des méthodes de diagnostic dans le cadre de la maintenance conditionnelle, on utilise pour la détection des défauts du roulement en spécifiant L' ANALYSE VIBRATOIRE

Chapitre IV

Chapitre IV.1.Généralités sur les vibrations

IV.1.1.Définition de vibration

Une vibration, est un mouvement autour d'une position d'équilibre. (Norme AFNOR E90.001)

Variation avec le temps de la valeur d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.[14]

IV.1.2.Les différents types de vibrations

Il existe plusieurs sortes de vibrations :

IV.1.2.1.Vibration périodique simple- harmonique

C'est un mouvement oscillatoire qui se répète de la même façon à des intervalles de temps régulier que l'on appelle période.

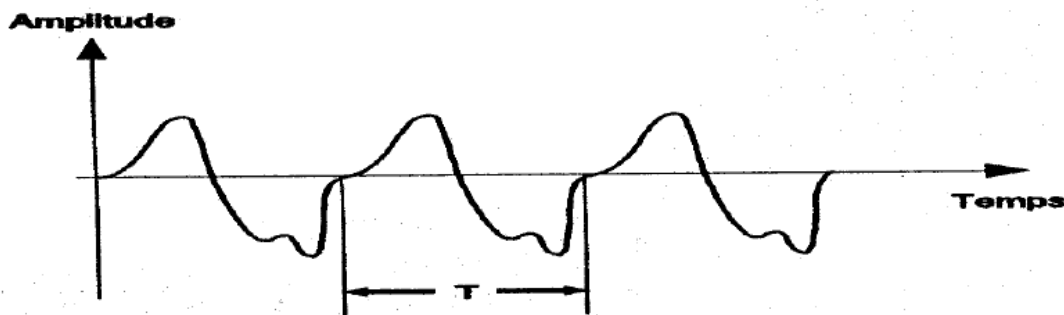


Figure 32 : Vibration périodique simple [15]

On le qualifie de phénomène déterministe. Ce mouvement peut être décrit par L'équation mathématique suivante :

$$X(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots(IV.1)$$

X_m : amplitude maximale de vibration

ω : Pulsation du mouvement qui vaut $\omega = 2 \pi f$ [rad /s]

φ : La phase de la vibration [15]

IV.1.2.2. Vibration périodique complexe

C'est la superposition de deux ou plusieurs vibrations périodiques simples. On peut écrire :

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + \dots + X_n(t) \dots \dots \dots (IV.2)$$

Avec $X_n(t) = X_n \sin(\omega t + \theta)$

La vibration est périodique. Lorsqu'il s'agit d'une combinaison de deux ondes sinusoïdales $X_1(t)$ et $X_2(t)$ de fréquences f_1 et f_2 . [15]

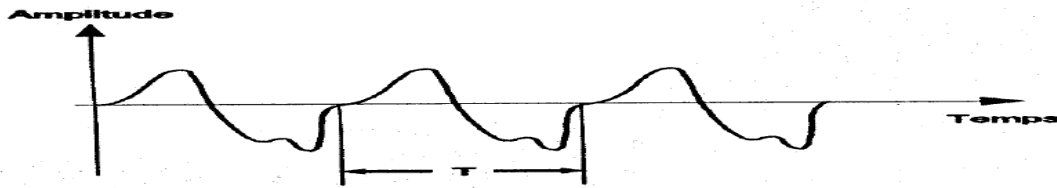


Figure 33 : Vibration complexe [15]

IV.2.3. Vibration aléatoire

C'est une vibration continue pour laquelle il est impossible de déterminer une période de répétition. On la qualifie de phénomène non déterministe. Cette dernière ne peut pas être représentée par une fonction mathématique exacte, d'où l'utilisation des lois de probabilité pour la caractériser. Son spectre de fréquence est continu. [15]

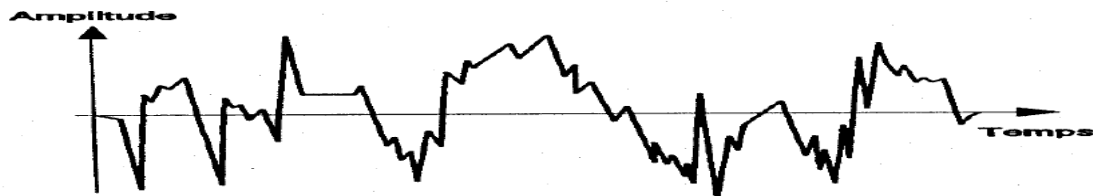


Figure 34 : Vibration aléatoire [15]

IV.2.4. Vibration transitoire

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

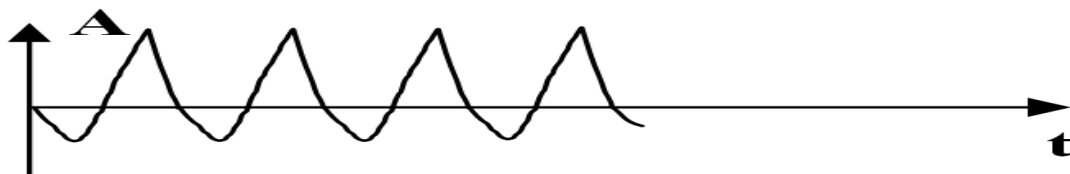


Figure 35 : Vibration transitoire [15]

IV.1.3. Caractéristiques des signaux

- **Amplitude**

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre.

➤ **L'amplitude « crête (Ac) »** : Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

➤ **L'amplitude « crête à crête (Ac-c) »** : appelée « peak to peak » (Ap-p) en anglais. Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée

« **Amplitude double** » ($A_{c-c} = 2A_c$).

➤ **L'amplitude « efficace (A_{eff}) »** : ou RMS en anglais (**Root Mean Square**).

Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « **statique** » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire [16].

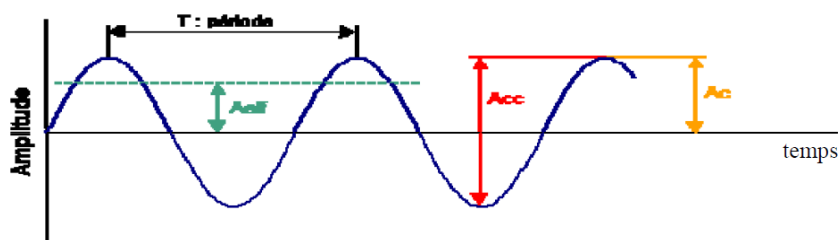


Figure 36 : les différentes amplitudes d'une vibration [16]

- **Fréquence f**

C'est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en hertz (Hz).

- **Période T**

C'est l'intervalle de temps au bout duquel la variable $x(t)$ reprend la même valeur dans la même direction (unité : seconde [s]).

IV.1.4. La transformée de Fourier

La transformée de Fourier est l'une des méthodes les plus utilisées dans le domaine industriel. De part sa facilité de mise en œuvre et d'interprétation, cette représentation permet de connaître le contenu fréquentiel d'un signal temporel. Pour cette raison la transformée de Fourier a été largement utilisée dans le domaine de diagnostic des défauts pour localiser les fréquences caractéristiques de défauts. Dans la pratique, et Particulièrement pour des signaux numériques, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (Fast Fourier Transformé, FFT) [17]

Elle est définie par :

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \dots \dots \dots (IV.3)$$

Où

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

t_e : La période d'échantillonnage du signal temporel,

n : Le numéro de l'échantillon,

K : Le numéro de la ligne fréquentielle,

Δf : L'intervalle entre deux raies fréquentielles,

N : Le nombre d'échantillons prélevés.

IV.1.5. Les grandeurs de mesure d'une vibration mécanique

Dans le domaine des vibrations mécaniques, on mesure en général trois grandeurs :

IV.1.5.1. Le déplacement vibratoire

Il s'agit de la distance du point de mesure par rapport à son point de repos. L'unité de mesure est le mètre ; Elle s'exprime en (μm) [16]

$$X(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi) \dots \dots \dots (IV.4)$$

IV.1.5.2. La vitesse vibratoire

C'est la variation du déplacement qu'à subit le point considéré sur un intervalle de temps. Elle s'exprime en (m/s). [16]

$$V(t) = \frac{dX}{dt} = X_m \omega \sin(\omega t + \varphi) \dots \dots \dots (IV.5)$$

IV.1.5.3.L'accélération vibratoire

Elle caractérise le mouvement par les variations de la vitesse en fonction du temps, Elle s'exprime en (m/S^2) . [16]

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = X_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \dots \dots \dots (IV.6)$$

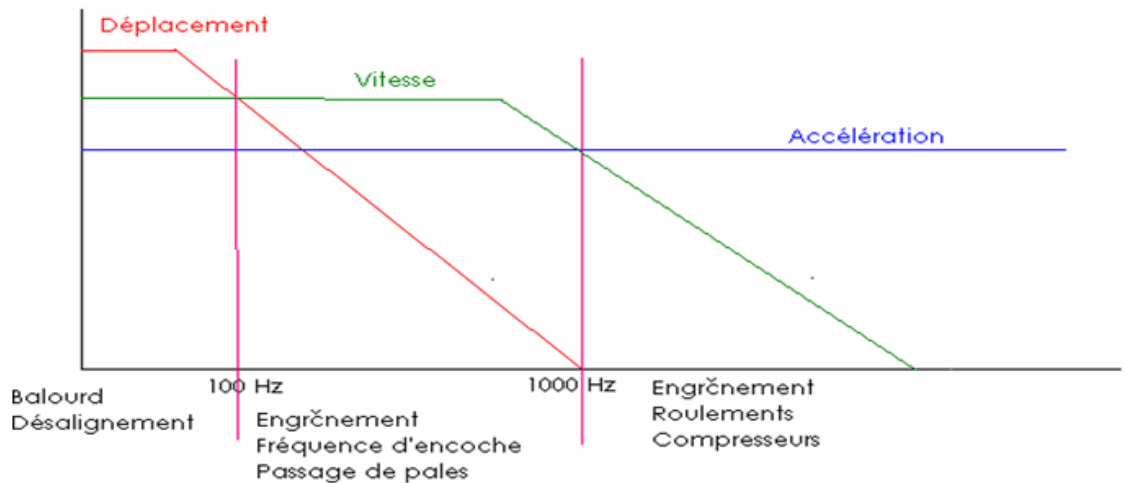


Figure 37 : Relation accélération, vitesse, déplacement [16].

IV.2.Diagnostic et surveillance des machines tournantes

IV.2.1.L'analyse vibratoire

Une méthode d'analyse et surveillance des vibrations la plus connue et la plus largement utilisée car adaptée à des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. [18]

IV.2.2. Objectifs de l'analyse vibratoire

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- La détection des défauts
- L'analyse détaillée des défauts. On utilise à cet effet des paramètres calculés :
- Soit dans le domaine temporel,
- Soit dans le domaine fréquentiel,
- Soit dans les deux à la fois. [19]

a. Les avantages

- Détection de défauts à un stade précoce,
- Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi,
- Autorise une surveillance continue,
- Permet de surveiller le matériel en fonctionnement,
- L'équipement à distance,

b. Les inconvénients

- Spectres parfois difficiles à interpréter.
- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.[20]

IV.2.3.Chaine de mesure

IV.2.3.1.Les capteurs de vibration

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations, parmi lesquels on cite les plus couramment utilisés le prosimètre (mesure de déplacement), la vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération). [21]

- **Les prosimètres**

Le prosimètre, ou sonde capteur de déplacement sans contact directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor, il est monte en permanence à l'intérieur du palier [figure 38], les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz). [21]



Figure 38 : prosimètres et leur driver. [21]

- **Vélocimétrie**

Les capteurs de vitesse, ou vélocimétrie, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. [21]



Figure 39 : capteur de vélocimétrie. [22]

- **Les accéléromètres**

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 40] est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte.

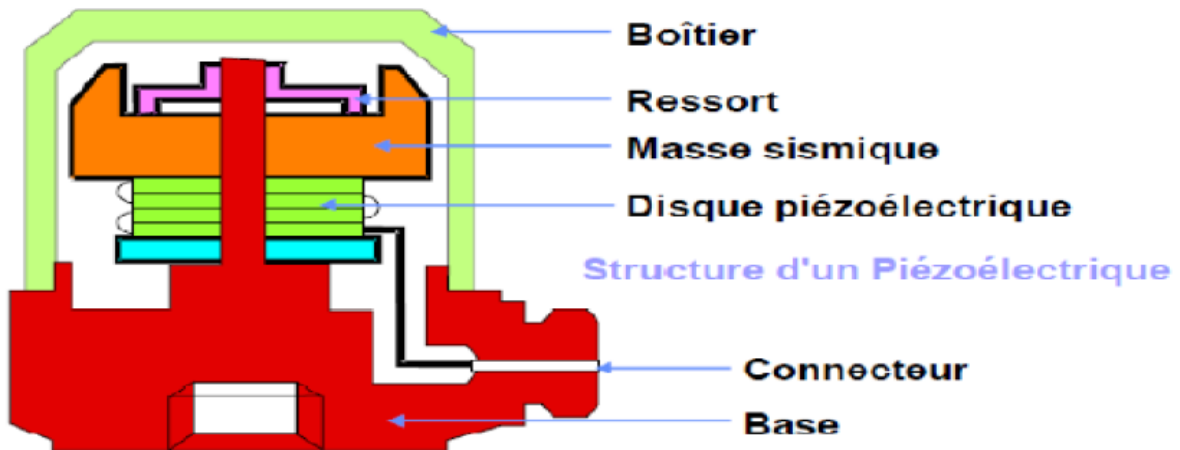


Figure 40 : Schéma de principe d'un accéléromètre. [21]

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

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse

Aucun élément mobile, donc extrêmement durable. [21]

IV.2.3.2. Les points de mesure

La plupart des vibrations des machines sont issues des parties tournantes ou oscillantes. Elles peuvent être d'origine mécanique, électromagnétique, hydraulique, etc. Elles sont transmises à la structure par l'intermédiaire des paliers, et aux fondations par l'intermédiaire des fixations. On conçoit aisément que les meilleurs points de mesurage dans le cadre de la maintenance conditionnelle des machines sont les paliers.

IV.2.4. Techniques de surveillance de l'état des roulements

Tableau 8 : Techniques de surveillance des roulements

Méthodes fréquentielles	Méthodes statistiques temporelles	Méthodes de filtrage
analyse d'enveloppe, analyse cepstrale,....etc. analyse spectrale	Valeur efficace (RMS), valeur crête, facteur crête, kurtosis,	Passé haut et passé bande

IV.3.Partie expérimentale

IV.3.1.Méthodes statistiques

Dans cette partie de travail, nous allons utiliser les méthodes de traitement de signal associées à des méthodes statistiques appropriées, pour mettre en évidence la détection de la détérioration précoce d'un roulement, utilisant un des différents indicateurs des méthodes statistiques temporelles.

- **la valeur efficace**

La valeur efficace, RMS (Root Mean Square) est la valeur moyenne quadratique qui peut être calculé grâce à l'équation (IV .7).

Elle permet de caractériser la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. En surveillance vibratoire, les vibrations sont néfastes lorsqu'il y a des variations brusques du signal de la courbe de RMS.[23]

$$RMS = Acc_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i)^2} \dots\dots\dots(IV .7)$$

Où X_i est l'amplitude des vibrations.

- **le kurtosis**

Le kurtosis (k) est le moment d'ordre quatre de mesure statistique d'une distribution (équation (IV 8)). C'est un paramètre permettant d'évaluer l'aplatissement de la loi de probabilité par rapport à une distribution normale (distribution d'amplitude gaussienne). Le kurtosis d'une distribution normale est égal à 3 et d'une distribution des valeurs non aberrantes est supérieur à 3. C'est un indicateur très utilisé pour détecter la présence des signaux impulsionnels périodiques typiques d'un choc anormal.[23]

$$k = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2)^2} \dots\dots\dots(IV.8)$$

Où \bar{X} est la moyenne de l'amplitude des vibrations,

- **facteur de crête**

Le facteur de crête (F_C) très utilisé pour la détection des défauts de roulements, caractérise leur durée de vie.

Si le facteur crête augmente, on est en situation non alarmante. Si au contraire il diminue, alors cela veut dire que le roulement est en fin de vie.

Il est égal au quotient de l'accélération crête par l'accélération efficace [23]

$$F_C = \frac{V_c}{RMS} \dots\dots\dots(IV.9)$$

- **Valeur crête**

Valeur crête (V_c) est donnée par la différence entre la valeur maximale du signal de vibrations et sa valeur minimale.[23]

$$V_c = A_{max} - A_{min} \dots \dots \dots (IV.10)$$

IV.4.Méthodologie de travail

Les expériences relatives au présent travail ont été réalisées à l'atelier du Département de Génie Mécanique à l'Université Mohammed Cherif MESSAADIA / Souk Ahras.

Le banc d'essai utilisé est un simulateur de défauts de machines MFS (MACHINERY FAULT SIMULATOR) du type MAGNUM, fabriqué aux états unis d'Amérique par un sérieux fabricant inventeur connu sous le nom de SPECTRAQUEST.

IV.4.1.Matériel utilisé

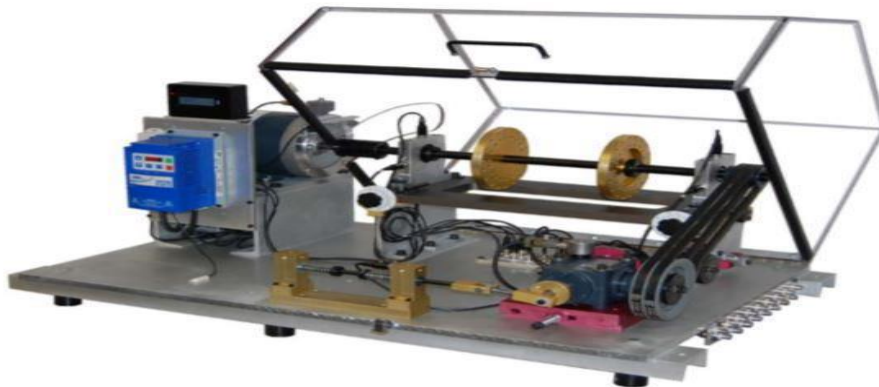


Figure 41 : Simulateur des défauts de machines MFS

Le MFS est un outil d'étude des signatures vibratoires des défauts de machines tournantes, il a une conception modulaire offrant une polyvalence, une simplicité opérationnelle et une robustesse. La structure de base comprend des supports de paliers lisses ou à roulements, des arbres, des rotors avec des extrémités de cols fendus, des accouplements, des poulies, des courroies, un mécanisme à engrenage et un système à mouvement alternatif. Pour apprendre le diagnostic des machines, différents défauts peuvent être introduits individuellement ou conjointement dans un environnement totalement contrôlé.

Les accessoires sont conçus pour être facilement manipulés entre les différents essais de l'expérimentation.

a- Entraînement

L'entraînement est assuré par un moteur électrique de type 1 HP 3 phases avec un système de montage auto-alignement pré-câblé pour faciliter le montage et le démontage.



Figure 42 : Moteur électrique de type 1 HP

b- Mesure de la fréquence de rotation



Figure 43 : variateur de fréquence (SMVector)

La variation des vitesses de rotation en fréquence (Hz) ou en nombre de tour par minute (tr/min) est assurée sur le stand par l'intermédiaire d'un Tachymètre électronique intégré.

c- Accéléromètre piézoélectrique

L'accéléromètre piézoélectrique utilisé offre plus d'avantages que les autres. C'est un transducteur léger, compact avec une gamme de réponse fréquentielle large. Il est utilisé dans plusieurs conditions de surveillance des machines tournantes contenant les composants qui délivrent de hautes fréquences de vibrations comme les roulements et les engrenages.

Chapitre IV : Analyse vibratoire

L'accéléromètre piézoélectrique est un capteur qui produit un signal électrique proportionnel à l'accélération du signal vibratoire de la machine. Il est basé sur l'effet piézoélectrique d'un quartz ou un cristal céramique pour générer en sortie un signal électrique proportionnel à l'accélération appliquée.

Deux différents types d'accéléromètres piézoélectriques industriels basés sur la technologie ICP (Intégrates Circuit Piézoélectrique) ont été utilisés dans ce travail Figures 44 et 14, ils sont liés avec des câbles de raccordement au système d'acquisition des données.

Tableau 9 : récapitule les caractéristiques correspondantes à chaque type.

	Uni-axial	Triaxial
Plage de fréquences	0,3-10000 Hz	0,5-50000 Hz
Sensibilité	100 mV/g	100 mV/g
Plage de mesure	± 50 g	± 50 g
Montage	Par goujon	Par goujon



Figure 44 : Accéléromètre piézoélectrique uni-axial.



Figure 45 : Accéléromètre piézo-électrique triaxial

d- Analyseur de vibration

L'analyseur de vibration utilisé pour la mesure des accélérations relatives aux différents essais est du type « Spectral PAD/8 » équipé d'un logiciel « VibraQuest, il est installé sur un micro-ordinateur qui permet la lecture, l'enregistrement et l'exportation sous différents formats, des données recueillies pendant l'expérimentation par le biais des capteurs des signaux vibratoires fixés sur les organes considérés par l'étude.



Figure 46 : Analyseur de vibration Spectral PAD/8

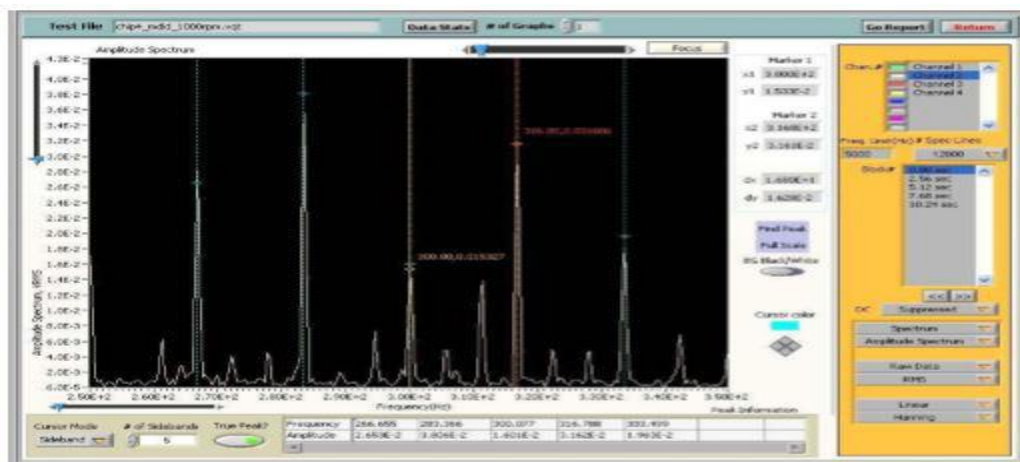


Figure 47 : Le logiciel VibraQuest.

IV.5.Préparation des essais

La transmission de mouvement entre l'arbre principal et le réducteur est assurée par des poulies et des courroies. Le mécanisme est facilement démontable afin de pouvoir changer les roulements de manière aisée. Ainsi, un nombre de variation de charges et de vitesses sont mises en place pour la réalisation de l'expérience.

Tous les organes de ce banc d'essai sont reproduits en plusieurs exemplaires dont un seul est conservé à l'état sain, les autres présentent chacun un défaut différent. Ceci permet de fournir un signal de référence pour identifier n'importe quel état de la machine y compris celui sain, afin de réaliser l'objectif de cette étude qui est la détection des défauts et leur interprétation.

Dans ce qui suit sont présentées les figures des roulements étudiés de ce simulateur de défauts dans leurs différents états.

1. Les roulements

Un jeu de roulements est fourni avec le simulateur de défauts, il compte quatre dont le premier qui est sain de toute anomalie ; trois autres présentant un défaut chacun tel que : défaut sur la bague extérieure, un second sur la bague intérieure et un troisième sur l'élément roulant.



Figure 48 : Roulement à son état sain.



Figure 49 : Roulement avec défaut sur la bague intérieur.



Figure 50 : Roulement avec défaut sur la bague extérieur.



Figure 51 : Roulement avec défaut de bille.

Chapitre IV : Analyse vibratoire

IV.5.1. Planification des essais

On a utilisé pour notre étude trois facteurs en différents niveaux :

Tableau 10 : Niveaux des facteurs

Facteur	Etat	Charge	Vitesse
Niveau	4	4	3

Tableau 11 : Codification des états

N°	Etat	Code
1	Sain	E0
2	Défaut de bague intérieure	E1
3	Défaut de bague extérieure	E2
4	Défaut de bille	E3

Tableau 12 : Codification des vitesses

N°	Vitesse (tr/min)	Code
1	500	V0
2	1000	V1
3	1500	V2

Tableau 13 : Codification des charges

N°	Charge (Nm)	Code
1	0	C0
2	11.298	C1
3	22.596	C2
4	33.894	C3

Tableau 14 : les Indicateurs scalaires

Indicateur scalaire choisis			
Valeur efficace	Valeur crête	Facteur crête	Kurtosis
RMS	V_C	F_C	K

IV.5.2. Plan d'expérience

L'expérimentation est planifiée selon un plan factoriel complet, dont lequel toutes les combinaisons des niveaux des facteurs ont été considérée. Ainsi le nombre des essais a été calculé comme suit :

$$N = nF1 \cdot nF2 \cdot nF3 \dots \dots \dots (VI.11)$$

Avec :

N : Nombre total des essais

nF1 : Niveaux du facteur 1 (Etat)

nF2 : Niveaux du facteur 2 (Charge)

nF3 : Niveaux du facteur 3 (Vitesse)

Ainsi :

$$N = 4 \cdot 3 \cdot 4$$

$$N = 48 \text{ essais}$$

Donc, le nombre total des essais nécessaires à faire ce travail expérimental est 48 essais, sachant que pour chaque essai l'analyseur de vibration nous fournit trois signaux en même temps, ce qui fait que le nombre de signaux recueillis monte à 144. Le tableau suivant est un modèle donné comme partie (celle de l'état sain uniquement) de la matrice globale présentée en annexe.

L'expérience consiste donc à choisir un roulement avec, à chaque fois un des quatre états considérés dans cette démarche et de mesurer le signal vibratoire. Trois directions correspondantes pour extraire les indicateurs. Après calcul à l'aide d'un programme créé sur EXCEL, et qui a pour but de calculer les indicateurs scalaires des trois directions simultanément, les réponses obtenues sont présentés sur les tableaux suivants :

REMARQUE :

AX : AXIALE

RH : RADIALE HORIZONTALE

RV : RADIALE VERTICALE

Chapitre IV : Analyse vibratoire

Tableau 15 : valeurs des indicateurs scalaires (état sain)

		RMS	V_c	F_c	K
E0C0V0	AX	0.00072	0.00091	1.27524	2.99041
	RH	0.00551	0.02686	4.45760	3.50010
	RV	0.00165	0.00670	4.07024	3.65957
E0C0V1	AX	0.00077	0.00092	1.19297	2.87046
	RH	0.01082	0.04442	4.10551	3.14347
	RV	0.00383	0.01403	3.65832	2.83092
E0C0V2	AX	0.00079	0.00097	1.21872	3.05555
	RH	0.02222	0.10013	4.50556	3.57412
	RV	0.00545	0.02642	4.74279	4.07663
E0C1V0	AX	0.00074	0.00091	1.22734	3.03637
	RH	0.00557	0.02359	4.23592	3.54453
	RV	0.00217	0.00813	3.74313	3.95206
E0C1V1	AX	0.00098	0.00115	1.16714	2.85274
	RH	0.01164	0.05359	4.60367	3.30735
	RV	0.00436	0.01883	3.47928	3.02610
E0C1V2	AX	0.00083	0.00099	1.19002	2.92222
	RH	0.01995	0.08712	4.36746	4.53158
	RV	0.00539	0.02810	4.99357	3.79162
E0C2V0	AX	0.00087	0.00106	1.22144	2.95907
	RH	0.00794	0.03320	4.18307	3.44039
	RV	0.00272	0.00951	3.49856	3.50890
E0C2V1	AX	0.00102	0.00119	1.16605	2.91341
	RH	0.01719	0.07334	4.26649	3.58470
	RV	0.00442	0.01643	3.71431	3.30834
E0C2V2	AX	0.00075	0.00093	1.24233	3.04314
	RH	0.02822	0.14181	5.02494	5.86499
	RV	0.00672	0.02599	3.77305	3.59029
E0C3V0	AX	0.00082	0.00098	1.18776	3.03745
	RH	0.00703	0.03256	3.97285	3.74949
	RV	0.00278	0.01089	3.91562	3.16880
E0C3V1	AX	0.00080	0.00099	1.23793	3.03935
	RH	0.01404	0.05438	3.87433	3.15544
	RV	0.00427	0.02087	4.89212	4.49525
E0C3V2	AX	0.00062	0.00082	1.31845	3.00759
	RH	0.02217	0.08317	3.75196	3.14021
	RV	0.00749	0.02536	3.38519	2.87923

Chapitre IV : Analyse vibratoire

Tableau 16 : état défaut sur la bague intérieure

		RMS	V_c	F_c	K
E1C0V0	AX	0.00077	0.00094	1.21805	3.04941
	RH	0.02363	0.15918	6.73661	11.30330
	RV	0.00739	0.07878	10.66137	35.78679
E1C0V1	AX	0.00078	0.00095	1.20950	2.94736
	RH	0.05126	0.25088	4.89382	5.67184
	RV	0.01361	0.09800	6.61813	11.15314
E1C0V2	AX	0.00065	0.00080	1.23484	2.88540
	RH	0.05393	0.25925	4.80727	4.92004
	RV	0.02182	0.25501	6.72188	23.73484
E1C1V0	AX	0.00068	0.00086	1.26069	2.94681
	RH	0.02337	0.15222	6.51245	10.05030
	RV	0.00539	0.06043	5.86591	13.60441
E1C1V1	AX	0.00089	0.00107	1.21003	2.98927
	RH	0.04977	0.28143	5.65402	6.38647
	RV	0.01515	0.10807	5.96098	9.73712
E1C1V2	AX	0.00076	0.00093	1.22578	2.95349
	RH	0.06006	0.27063	4.50641	4.04434
	RV	0.02286	0.23061	6.42040	16.12448
E1C2V0	AX	0.00077	0.00093	1.20415	2.93884
	RH	0.02727	0.21563	7.90813	17.54430
	RV	0.00837	0.06828	5.91348	14.65721
E1C2V1	AX	0.00090	0.00107	1.19113	3.01976
	RH	0.04783	0.25179	4.84737	6.15046
	RV	0.01643	0.12516	6.45696	13.14626
E1C2V2	AX	0.00068	0.00084	1.23506	2.90675
	RH	0.06031	0.31186	5.17098	4.28212
	RV	0.02223	0.22146	6.59398	16.48920
E1C3V0	AX	0.00073	0.00091	1.23893	2.98356
	RH	0.02315	0.16104	6.83876	8.96712
	RV	0.00618	0.07548	6.41870	16.57937
E1C3V1	AX	0.00084	0.00102	1.21506	3.03068
	RH	0.05009	0.25210	5.03298	6.32080
	RV	0.01492	0.12138	6.44450	14.16458
E1C3V2	AX	0.00079	0.00095	1.19911	2.94213
	RH	0.06506	0.29335	4.40828	4.22846
	RV	0.02278	0.25174	5.56557	22.19037

Chapitre IV : Analyse vibratoire

Tableau 17 : état de défaut sur la bague extérieur

		RMS	V_c	F_c	K
E2C0V0	AX	0.00078	0.00097	1.23676	2.98800
	RH	0.04884	0.56284	11.52473	23.91851
	RV	0.00634	0.064383	8.19632	17.61175
E2C0V1	AX	0.00088	0.00106	1.19576	2.99424
	RH	0.08092	0.68255	8.43536	14.21679
	RV	0.01665	0.10428	6.26414	7.32453
E2C0V2	AX	0.00087	0.00104	1.19322	2.88377
	RH	0.10018	0.60320	6.02103	8.11800
	RV	0.02350	0.12343	5.22939	5.72306
E2C1V0	AX	0.00070	0.00082	1.24954	2.95373
	RH	0.05184	0.57799	11.14911	24.14442
	RV	0.00698	0.06548	9.38075	19.01614
E2C1V1	AX	0.00093	0.00109	1.17445	2.79986
	RH	0.08156	0.74407	9.12283	13.68820
	RV	0.01593	0.10166	6.38063	7.09031
E2C1V2	AX	0.00073	0.00091	1.23827	3.07337
	RH	0.10050	0.59417	5.91200	8.26963
	RV	0.02376	0.13982	5.04791	5.78621
E2C2V0	AX	0.00079	0.00096	1.21052	2.97979
	RH	0.05360	0.50055	9.33831	19.90227
	RV	0.00722	0.06138	8.49788	14.81524
E2C2V1	AX	0.00084	0.00105	1.24827	3.11607
	RH	0.08565	0.68456	7.99281	12.37817
	RV	0.01595	0.09430	5.91144	7.02596
E2C2V2	AX	0.00075	0.00093	1.23333	3.02944
	RH	0.10247	0.62262	6.07634	8.15436
	RV	0.02339	0.14638	4.84354	5.79856
E2C3V0	AX	0.00084	0.00091	1.22826	2.88989
	RH	0.04967	0.45929	9.24736	21.04822
	RV	0.00669	0.07070	10.56603	15.26182
E2C3V1	AX	0.00088	0.00104	1.18840	3.01985
	RH	0.09043	0.71326	7.88696	10.38466
	RV	0.01639	0.07472	5.75124	6.49925
E2C3V2	AX	0.00062	0.00078	1.26425	3.10728
	RH	0.10097	0.64185	6.35668	8.16683
	RV	0.02327	0.12527	5.38352	5.77896

Chapitre IV : Analyse vibratoire

Tableau 18 : état des défauts sur l'élément roulant

		RMS	V_C	F_C	K
E3C0V0	AX	0.00069	0.00084	1.22572	2.99414
	RH	0.02940	0.24269	8.25409	15.13984
	RV	0.00395	0.03403	8.60962	8.57947
E3C0V1	AX	0.00086	0.00103	1.20060	2.91263
	RH	0.04861	0.55541	11.42650	20.26321
	RV	0.00577	0.03787	6.56539	4.12496
E3C0V2	AX	0.00075	0.00090	1.20175	2.95751
	RH	0.05745	0.31723	4.91832	6.18912
	RV	0.01310	0.08283	6.32294	6.03556
E3C1V0	AX	0.00069	0.00087	1.25498	3.10297
	RH	0.02397	0.16763	6.06506	9.18998
	RV	0.00427	0.02722	4.76062	6.42827
E3C1V1	AX	0.00089	0.00105	1.18272	3.02578
	RH	0.07534	0.48739	6.01874	10.10851
	RV	0.00945	0.06976	7.38012	5.99928
E3C1V2	AX	0.00073	0.00090	1.23490	3.11563
	RH	0.06894	0.43453	6.30293	6.94421
	RV	0.01864	0.10783	5.27264	5.00338
E3C2V0	AX	0.00085	0.00103	1.21195	2.89624
	RH	0.02403	0.19986	6.37241	12.90517
	RV	0.00420	0.02662	5.17468	6.54461
E3C2V1	AX	0.00079	0.00097	1.23298	3.14068
	RH	0.03800	0.28654	7.54075	8.74386
	RV	0.00826	0.04940	5.98078	5.36733
E3C2V2	AX	0.00060	0.00076	1.26873	2.89763
	RH	0.05532	0.44354	6.01053	6.75838
	RV	0.01578	0.12476	5.34548	7.85581
E3C3V0	AX	0.00069	0.00085	1.23277	3.06535
	RH	0.02558	0.14665	5.73279	7.74746
	RV	0.00423	0.02306	5.45338	4.27360
E3C3V1	AX	0.00081	0.00099	1.21959	3.08699
	RH	0.05105	0.35741	6.56889	8.12665
	RV	0.00747	0.06004	8.04178	6.34949
E3C3V2	AX	0.00059	0.00077	1.29987	2.93165
	RH	0.06104	0.31012	4.98684	5.04190
	RV	0.01536	0.08107	4.51716	4.75539

IV.5.3. Pertinence des courbes

Après avoir dessiné les graphiques correspondants on a constaté que les valeurs des indicateurs des composantes axiales ne semblent pas être significatives, elles montrent une stabilité en fonction des deux paramètres : la charge et la vitesse, ceci est vrai pour la totalité des états étudiés dans cette expérimentation, des exemples montrent ce constat sur les figures (Figure 52, Figure 53, Figure 54, Figure 55), le reste des courbes est présenté en annexe

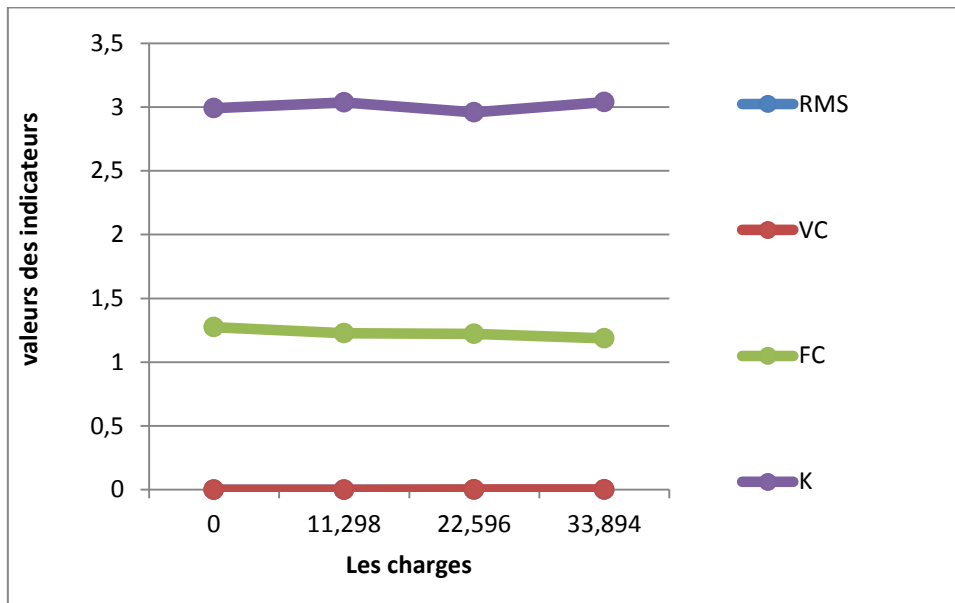


Figure 52: Etat sain [E0V0]

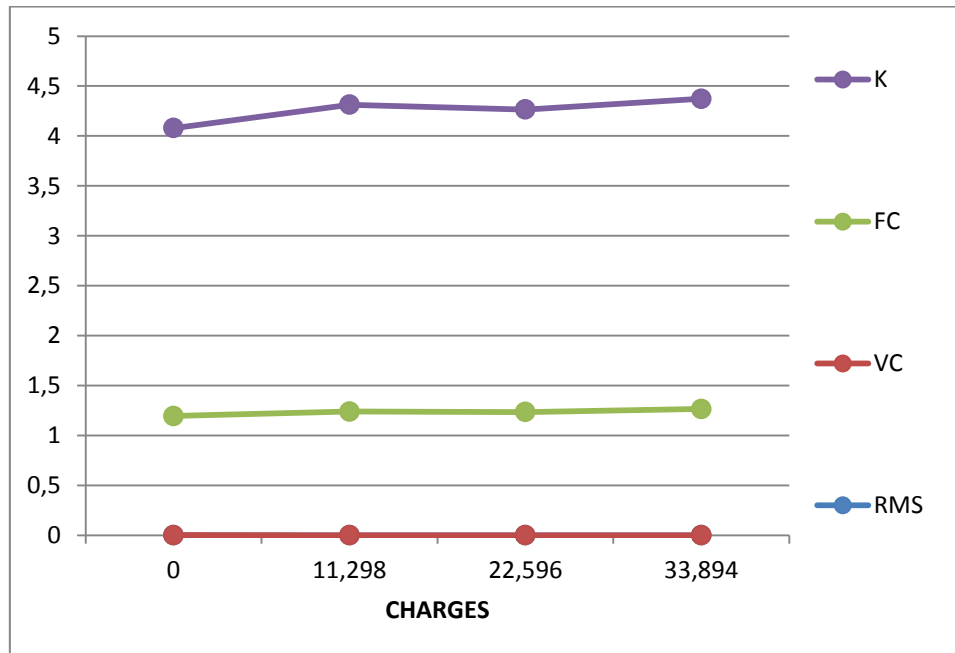


Figure 53 : Etat 01 (Roulement à défaut de bague intérieure) [E1V1]

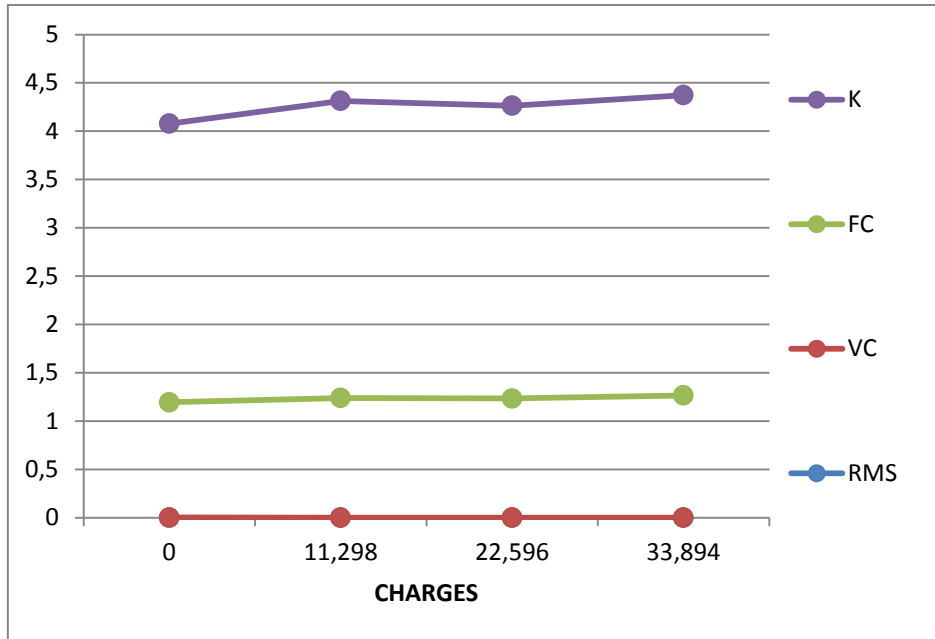


Figure 54 : Etat 02 (Roulement à défaut de bague extérieure) [E2V2]

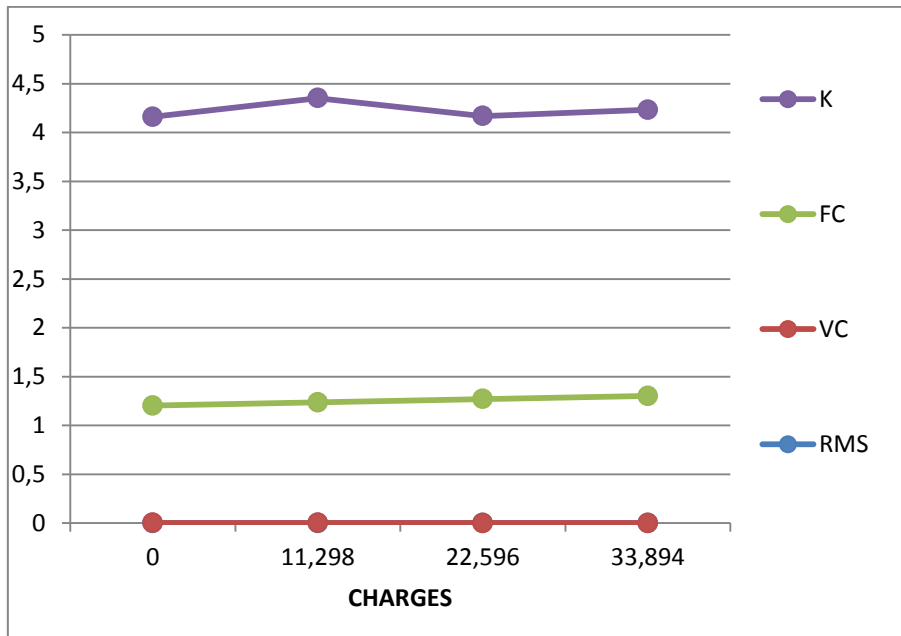
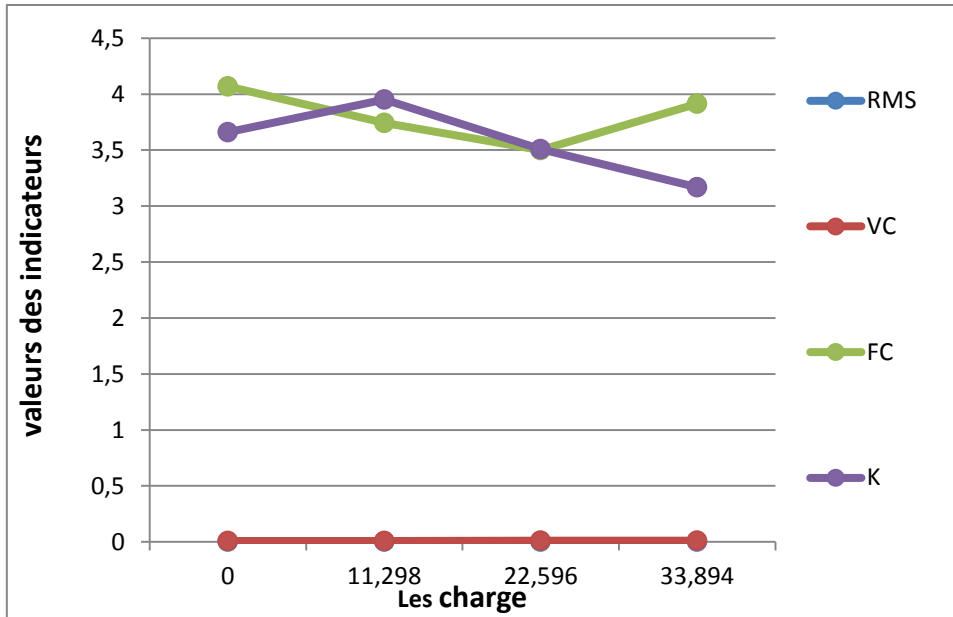


Figure 55: Etat 03 (Roulement à défaut de bille) [E3V2]

Dans ce qui suit, on s'intéresse aux deux composantes : radiale horizontale (RH) et radiale verticale (RV) afin de détecter les différents défauts considérés ; ci-dessous des exemples de graphiques pour différents états ; les autres graphiques sont présentés en **annexe**.

RV



RH

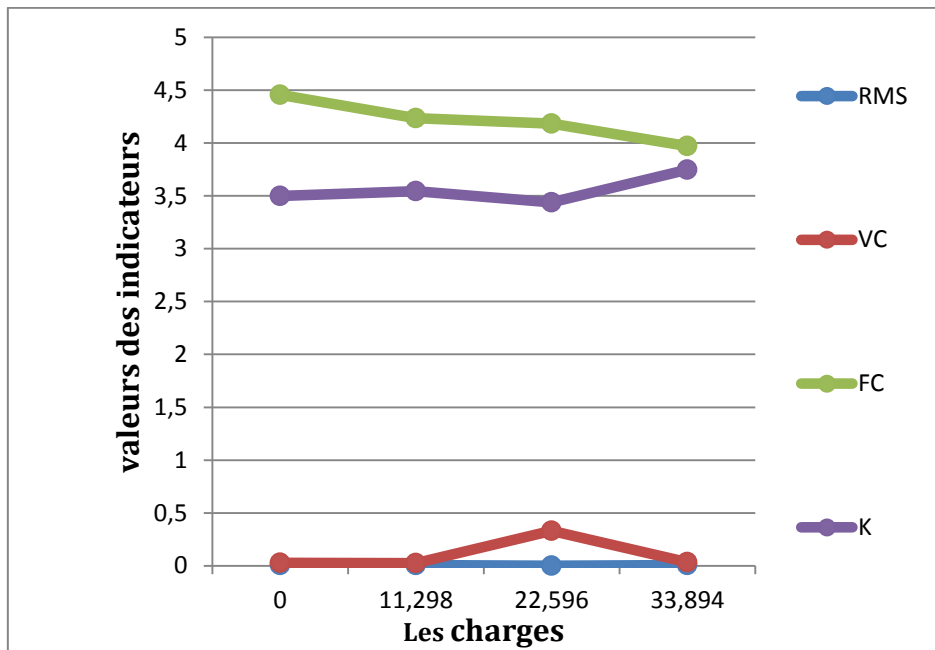


Figure 56: Etat sain [E0V0]

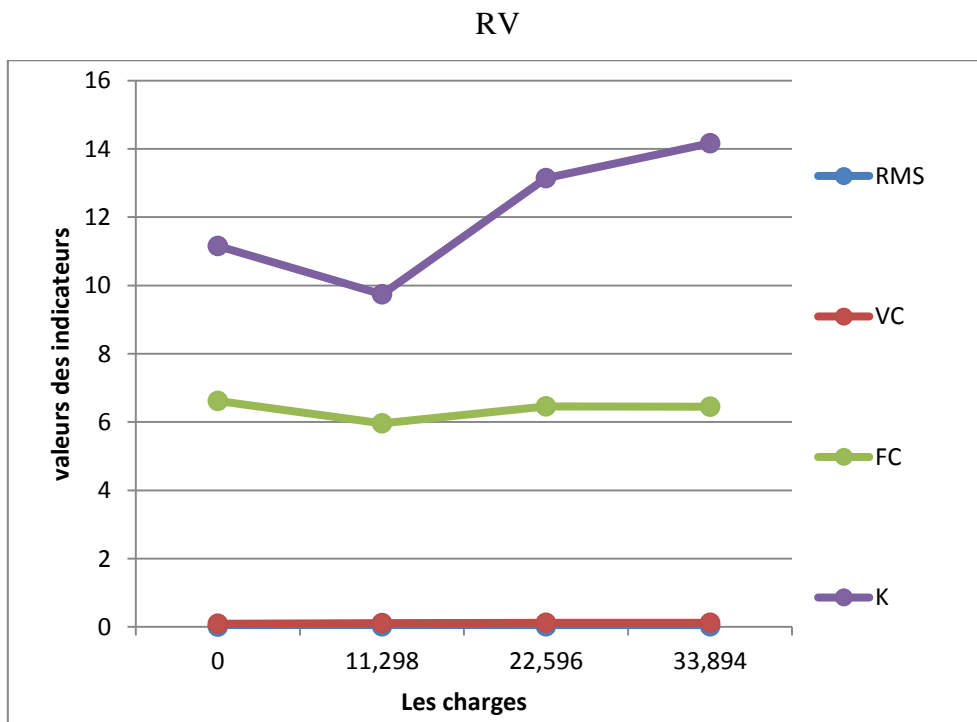
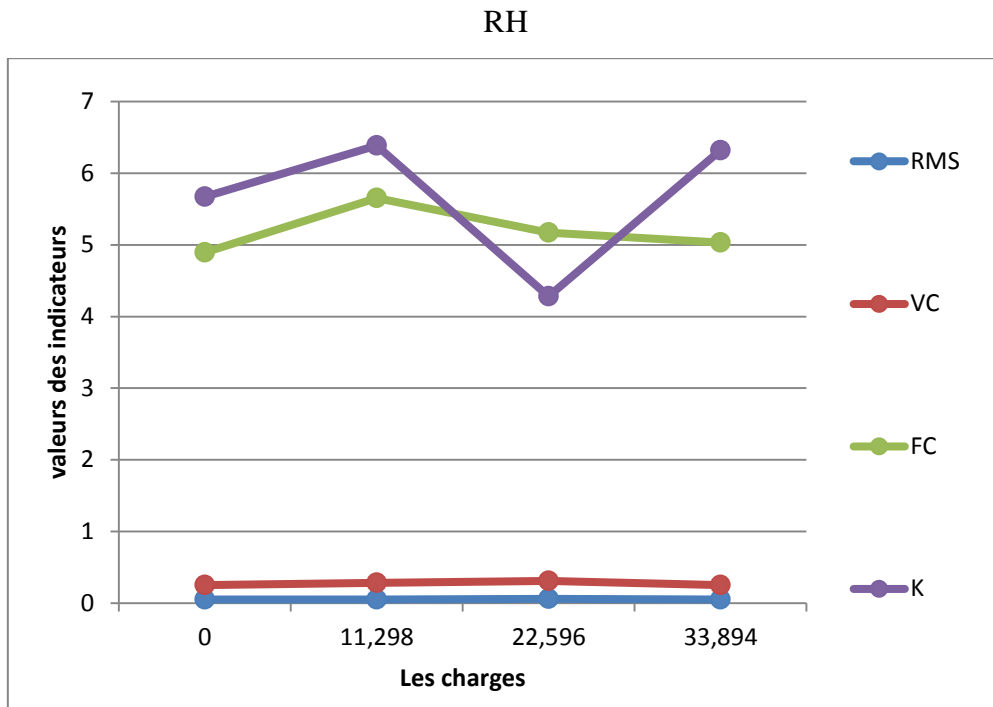


Figure 57 : Etat de défaut sur la bague intérieure [E1V1].

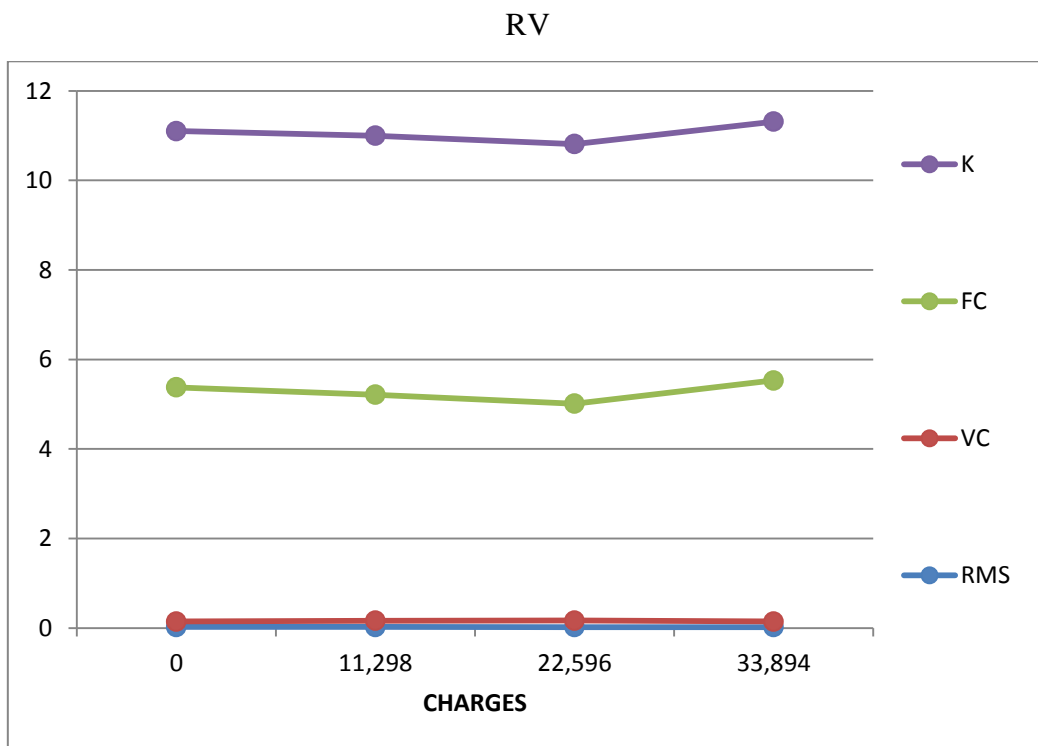
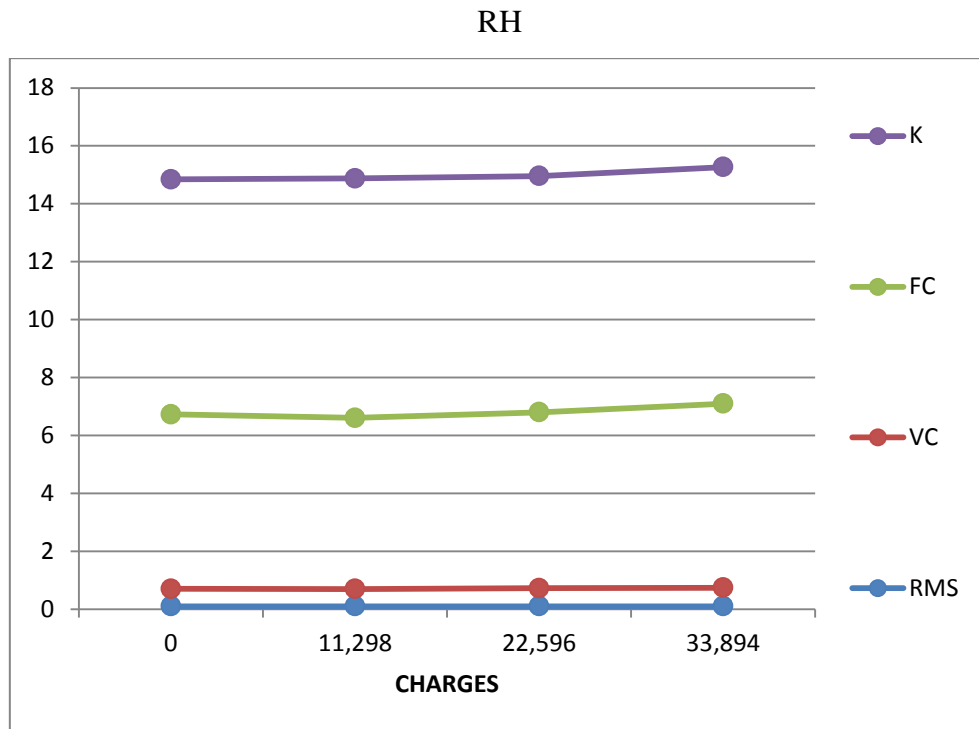


Figure 58 : Etat de défaut sur la bague extérieure [E2V2].

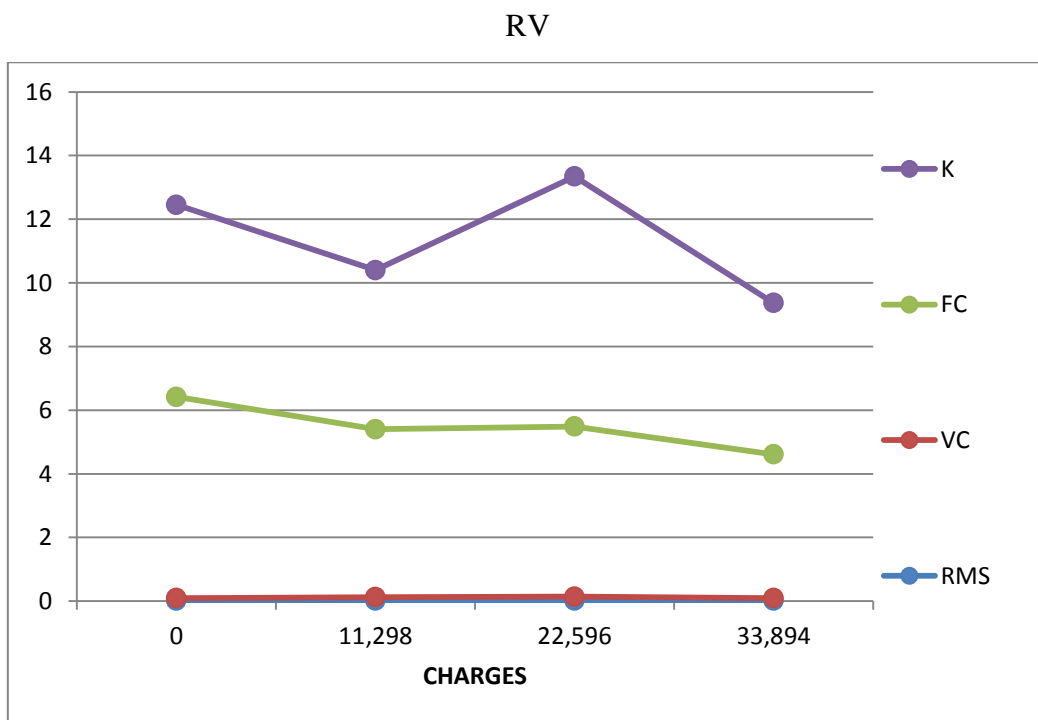
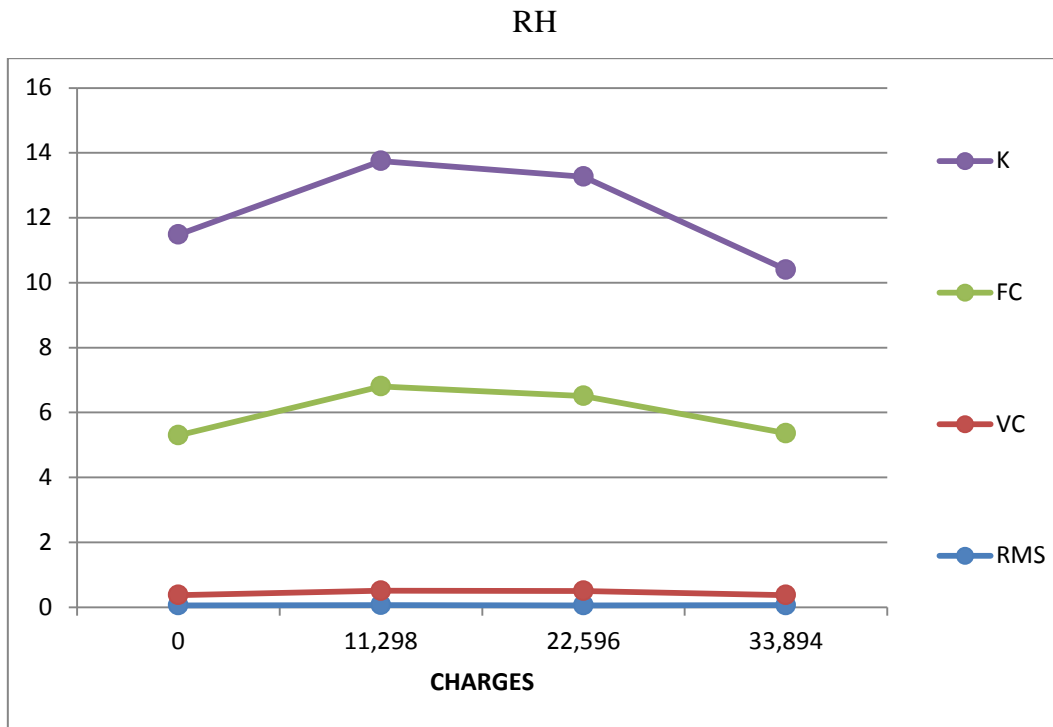


Figure 59 : Etat de défaut sur la bille [E3V2]

IV.6. Interprétation des graphiques des composantes radiales

L'examen des courbes qui concernent les deux composantes radiales, on s'aperçoit que les valeurs des indicateurs ne sont pas toujours significatives, ceux qui sont sensibles aux changements de la charge ou de la vitesse sont : le Kurtosis et le facteur crête. Dans ce qui suit l'interprétation porte seulement sur ces trois indicateurs.

- **Etat sain**

Les courbes de l'état sain montrent que le Kurtosis et le facteur crête sont en décroissance en fonction de la charge seulement et stables en fonction des vitesses dans les deux cas de la composante radiales.

- **Etat 01 : Défaut de bague intérieure**

Les valeurs du Kurtosis et du facteur crête sont plus élevées que l'état sain. Le facteur crête s'est montré constant devant l'évolution de la charge et de la vitesse aussi bien pour la composante radiale horizontale que verticale. Alors que le Kurtosis est décroissant devant la charge sur la composante radiale verticale

- **Etat 02 : Défaut de bague extérieure**

Dans ce cas, les valeurs du Kurtosis et du facteur crête pour ce cas-ci, elles sont plus élevées encore et présentent une décroissance en fonction de la vitesse. La charge n'a pas d'influence sur ces deux indicateurs.

- **Etat 03 : Défaut de l'élément roulant**

Ce cas est caractérisé par une augmentation des Valeurs du Kurtosis et du facteur crête qui sont très élevées, et montrent une évolution décroissante en fonction de la vitesse et la charges selon l'axe RH et RV

IV.7. Conclusion

L'objectif de cette étude était de donner des informations sur la tendance des phénomènes et de l'apparition du défaut, ainsi que l'identification de la provenance du défaut.

Le succès d'un service de maintenance est de déterminer, entre autres, par sa capacité de proposer la bonne action au bon moment et au bon endroit. Une maintenance appropriée contribue de manière décisive à cet objectif stratégique. Ainsi arriver, en utilisant l'analyse vibratoire des machines à diagnostiquer le système de maintenance existant.

Conclusion générale

Dans notre étude, on a examiné un problème qui touche, tous les secteurs industriels et tout système mécanique, en particulier les machines tournantes, et précisément les roulements.

Une mauvaise lubrification entraîne plusieurs défauts sur la machine, et pour déterminer ces derniers nous avons utilisé la méthode statistique de surveillance (l'analyse vibratoire).

Les résultats du présent travail ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :
D'abord, les valeurs des indicateurs des composantes axiales semblent être constantes en fonction des deux paramètres : la charge et la vitesse, dans tous les états étudiés. Seulement, on a opté pour les deux composantes radiales : horizontale et verticale afin de détecter les différents défauts considérés.

Les valeurs significatives des indicateurs des composantes radiales, c'est-à-dire qui sont sensibles aux changements de la charge ou de la vitesse sont : le Kurtosis et le facteur crête.

Le Kurtosis et le facteur crête sont décroissants en fonction de la charge seulement des deux composantes radiales, pour l'état sain et celui de la bague intérieure. Mais ils sont décroissants en fonction de la vitesse pour la bague extérieure et l'élément roulant.

Quelques cas ont montré des valeurs constantes de l'indicateur avec l'évolution de la charge, de la vitesse ou des deux simultanément, ceci, n'est pas un inconvénient, mais tout au contraire, il permet de réduire les contraintes lors de la mise au point d'une surveillance en ligne.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail servira de bibliographie pour d'autres études.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

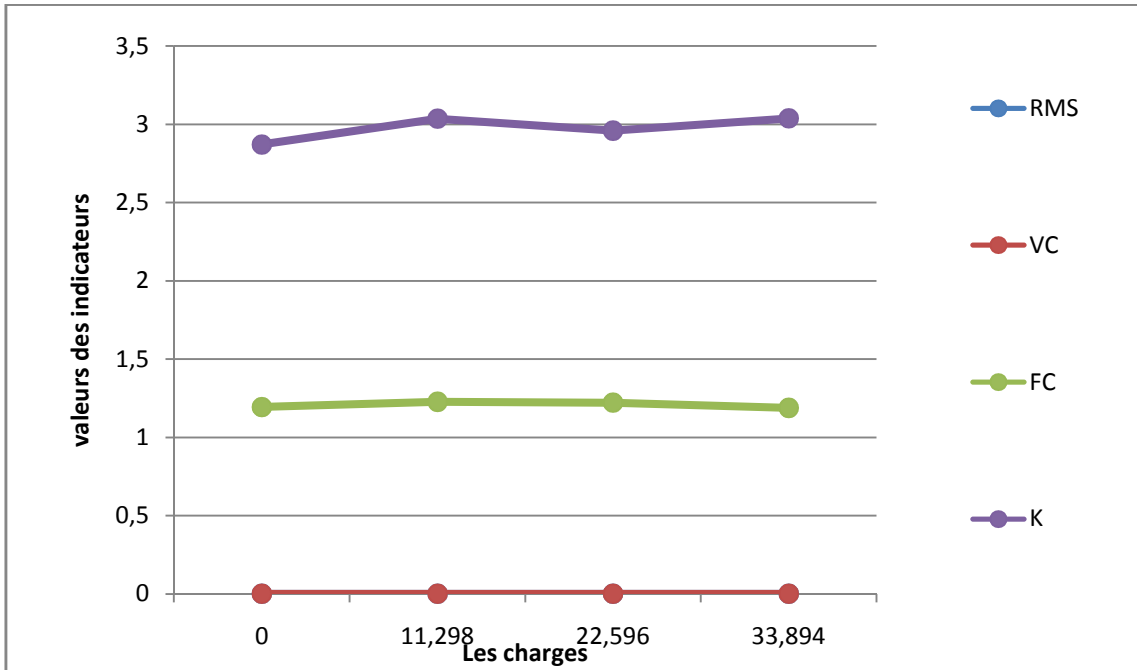
- [1] **Kassas .B** ,(2017) " Application de l'arbre de défaillance « Fault-tree » pour le système du ballon à vapeur au niveau de l'unité Production Ammoniac" Université badjimokhtar Annaba
- [2] **AFNOR** : « Recueil des normes françaises », X06, X50, X60.
- [3] **Douaba .N ,Berouba .S,**(2017) " Analyse analytique FMD et AMDEC d'un compresseur à vis- ATLAS COPCO ZE3-" Université kasdimerbah Ouargla .
- [4] **HENG.J** , « Pratique de la maintenance préventive », Edition DUNOD 2002.
- [5] www.hubertfaigner.com/articles.php?lng=fr&pg=10 « Concepts et stratégies de la maintenance »BTS MI, consulté le 28/01/2021
- [6] **LAGGOUNE .R,**(2011) ; cours, chapitre 4 : « coûts de maintenance », Université Abderrahmane MIRA de Bejaia ; promotion.
- [7] **BANOUEH. S, BAZIZEN. A/Rahim** ,(2003) « Informatisation des modules de maintenance curative et préventive » ; Cote : « 621N/35 », dirigé par Mr R.LAGGOUNE, Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [8] Bonnett, A. H., & Yung, C. (2008). "Increased efficiency versus increased reliability", *Industry Applications Magazine, IEEE*, 14(1), pp 29-36.
- [9] Trajin. B. (2009). "Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes", Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [10] "Roulement à bille et à rouleaux. (2007), document NTN (for new technologie network) corporation. CAT. NO. 2202-VIII/F.
- [11] MEHALA Kadda , (2017)" polycopies lubrification industrielle " faculté de génie mécanique « Université des sciences et de technologies d'Oran "MOHAMMED BOUDIAF"
- [12] LAIB. L(2010), Etude de la stabilité à l'oxydation des huiles lubrifiantes algériennes (pour moteurs à essence). Mémoire de magister, Université de Boumerdes,.
- [13] catalogue de lubrification des roulements (SKF)
- [14] Norme AFNOR E90.001 . 1. JACQUES MOREL. «Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécaniques», Louis-Jean, 1991.

BIBLIOGRAPHIE

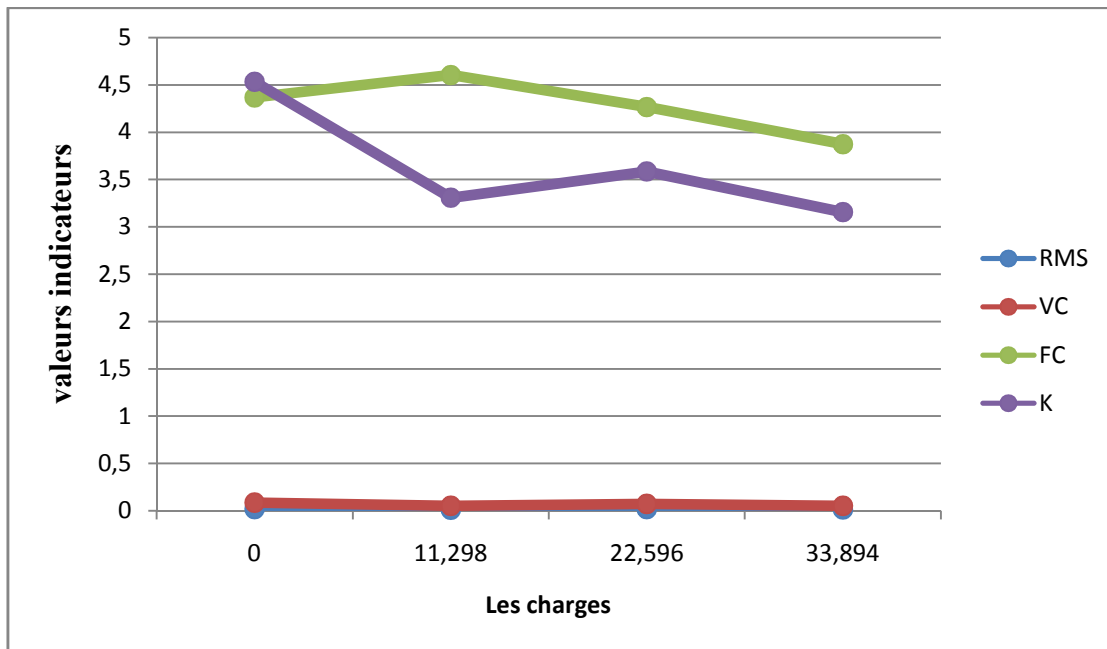
- [15] KHELFA.A et GUENOUCHE.D (2007) Faculté des hydrocarbures et de la chimie ,
Département : Transport et Equipement des Hydrocarbures , En vue de l'obtention du
diplôme d'Ingénieur d'Etat en mécanique des chantiers pétroliers *Boumerdès*
- [16] **A.Boulenger et C.Pachaud**Aide-mémoire "Surveillance de machines par
analyse des vibrations"Dunod,
- [17]- M.MAFART, Les opérations unitaires du génie industriel alimentaire, Tome 2 :
techniques séparatives (2e éd.).
- [18] Chevalier R, (2001). «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines
tournantes à EDF», RFM,
- [19] Omar DJEBILI , (2013). «Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire
des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue
de contact de roulement». Thèse de doctorat , Université De Reims Champagne Ardenne
- [20] ABA. A, (2015) « Diagnostic vibratoire sur des pompes rotatives EP2 & P112 ». Rapport
de Fin de Mise en Situation Professionnelle du Technicien Supérieur en Mécanique
Industrielle, DIRECTION REGIONALE HAOUUD BERKAOUI .
- [21] Landolsi.F, «Cours De Techniques de Surveillance, Partie I Surveillance Des Machines
Par Analyse Vibratoire».
- [22] Bensana.T, (2008) «Diagnostic des défaillances basé sur l'analyse vibratoire d'une
turbine à vapeur». Mémoire de Magister Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [23] *A.Boukar and N.Hamzaoui* ‘ ‘ Evaluation des indicateurs de surveillance par analyse
vibratoire : Application aux engrenages et roulements ‘ ‘
1Département de Génie Mécanique, Institut National Supérieur des Sciences et Techniques
d'Abéché - INSTA, BP 130 Abéché, Tchad
2Département de Génie Mécanique Conception, Institut National des Sciences Appliquées de
Lyon, France

ANNEXE

Annexe

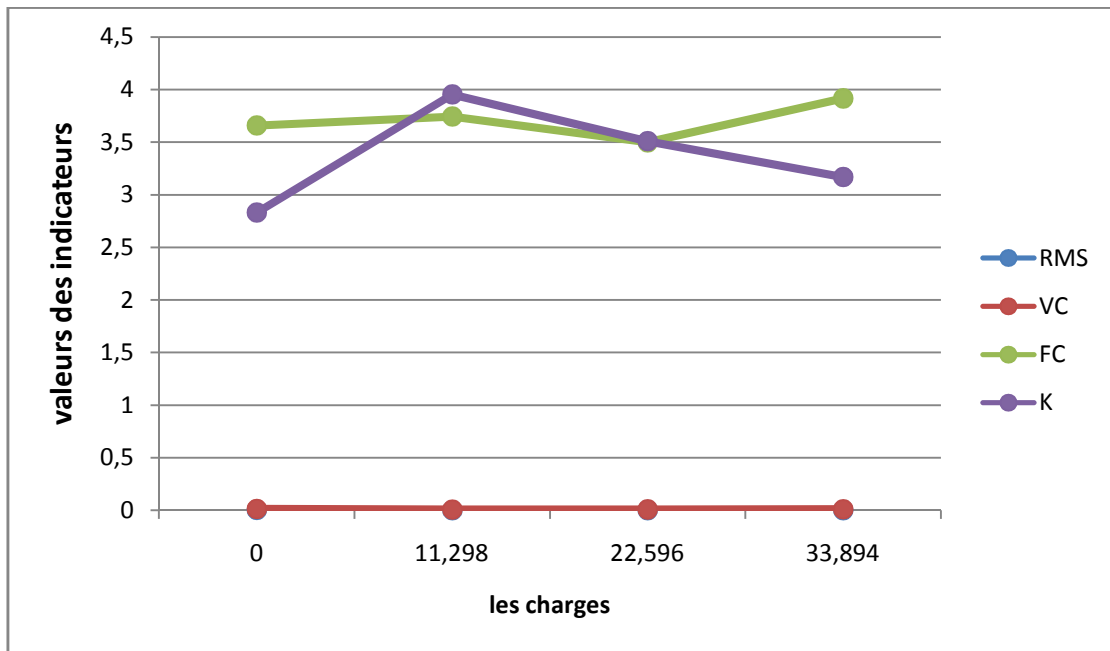


[E0V1] AX



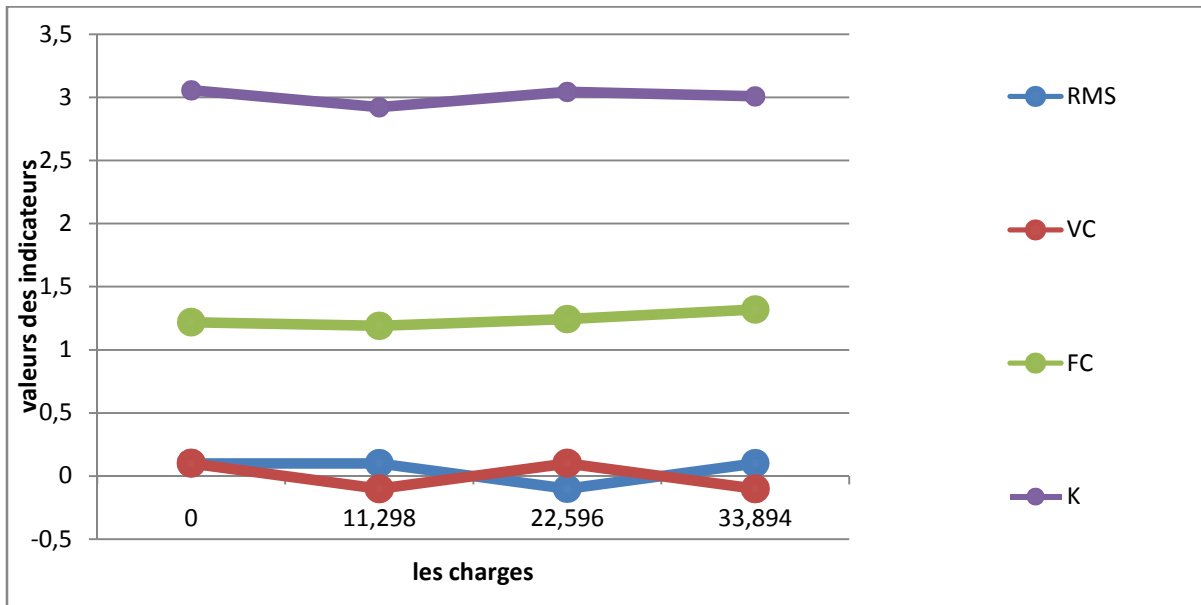
[E0V1] RH

ANNEXE

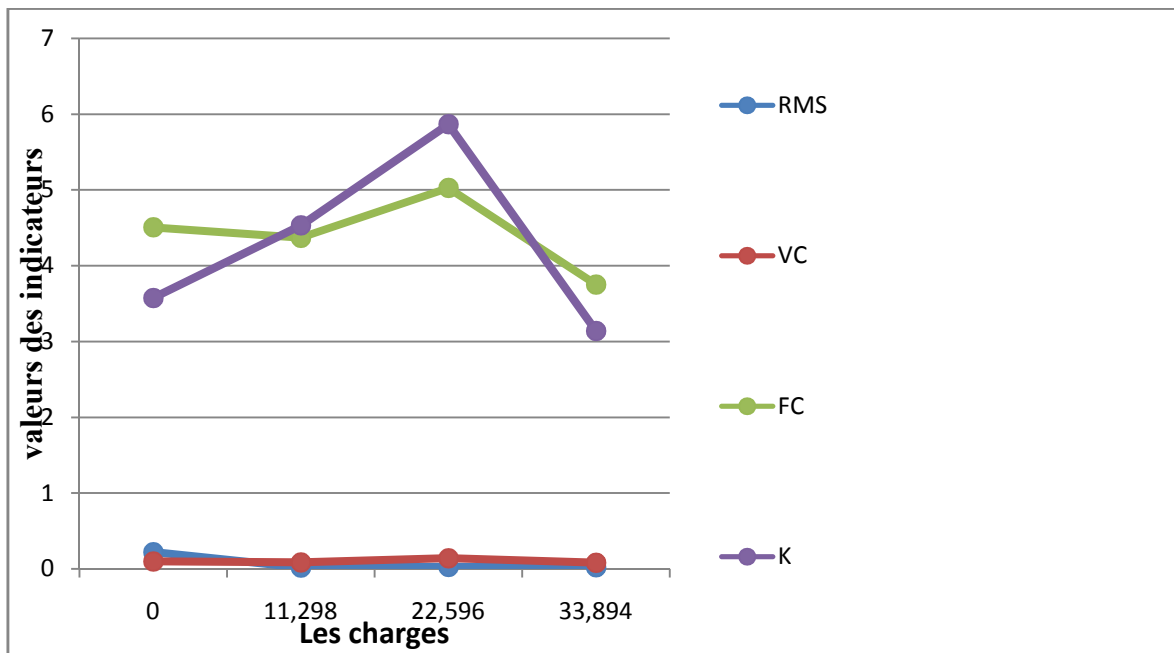


[E0V1] RV

ANNEXE

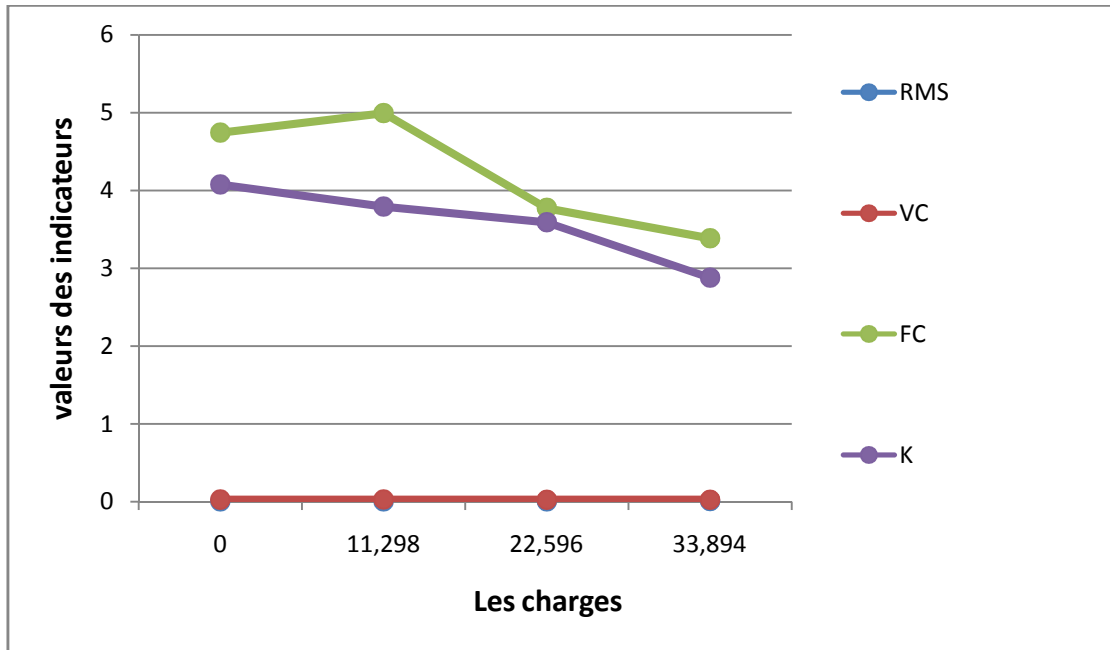


[E0V2] AX



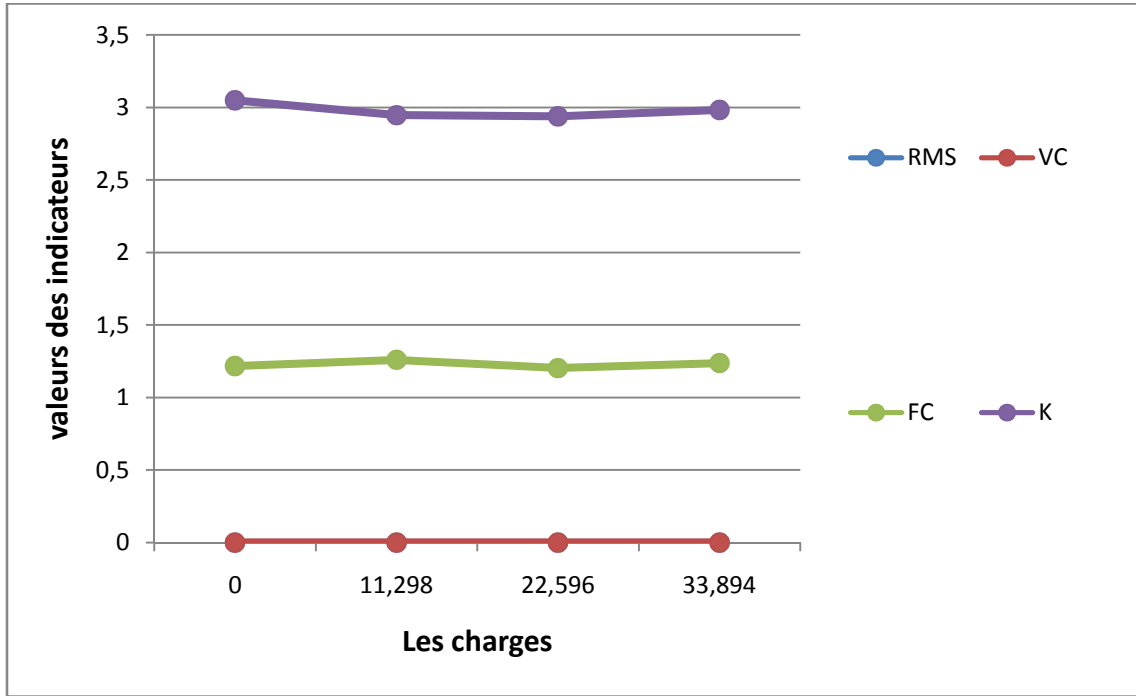
[E0V2] RH

ANNEXE

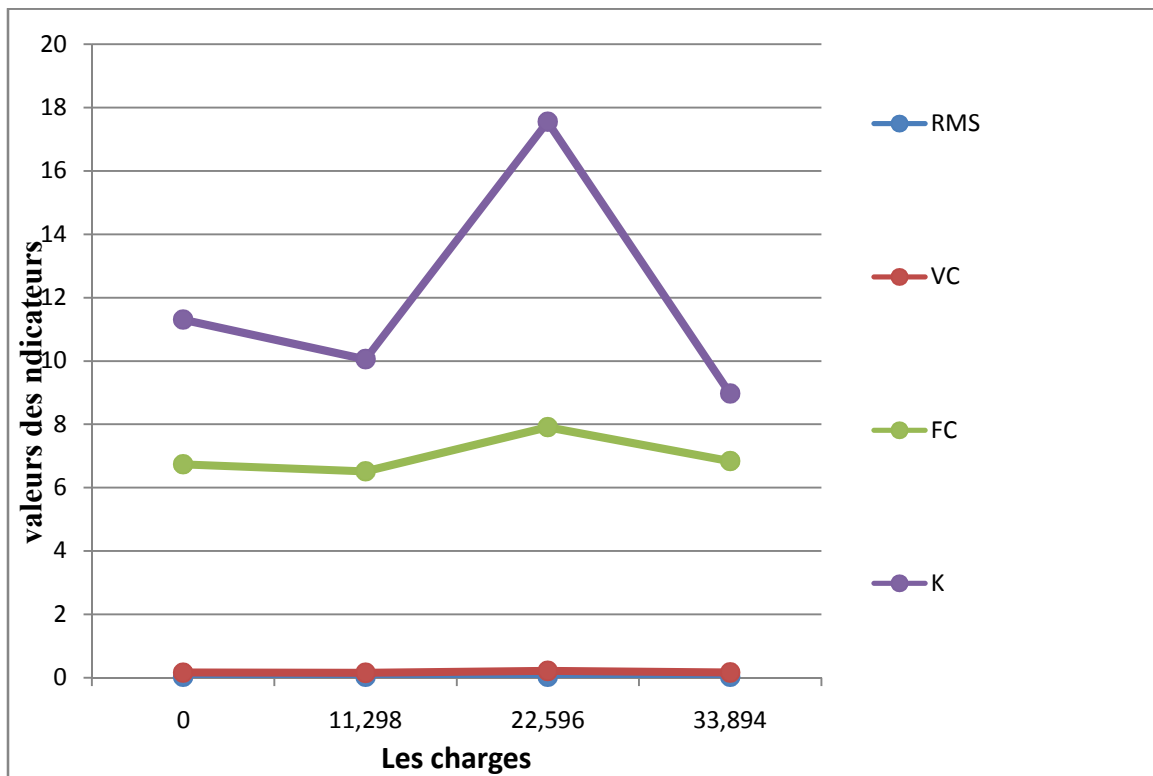


[E0V2] RV

ANNEXE

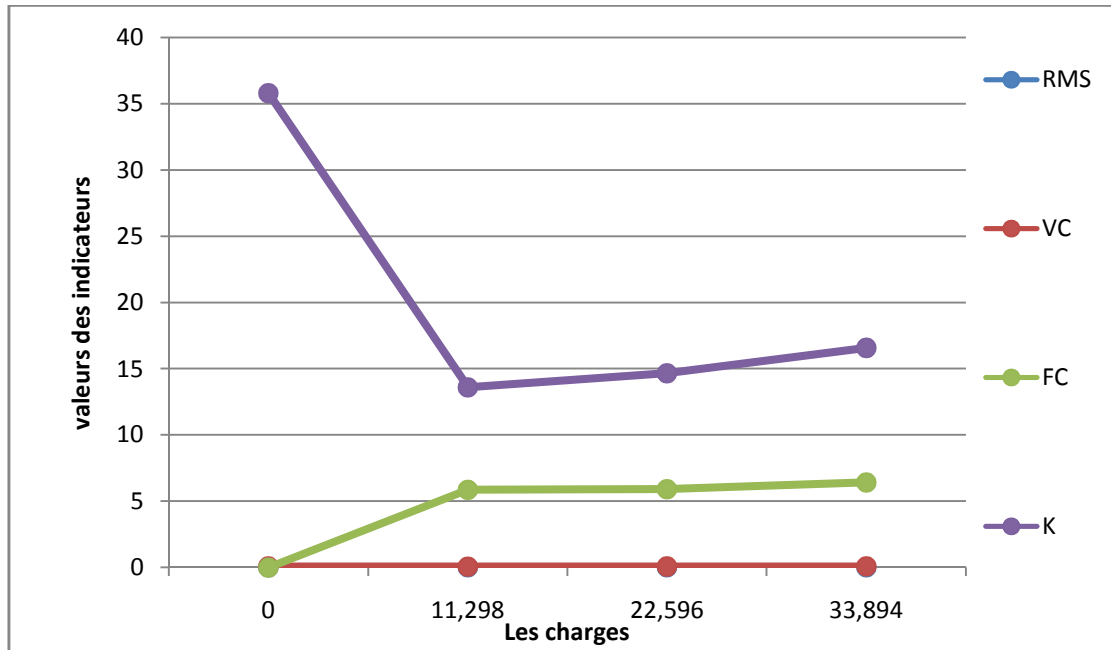


[E1V0] AX



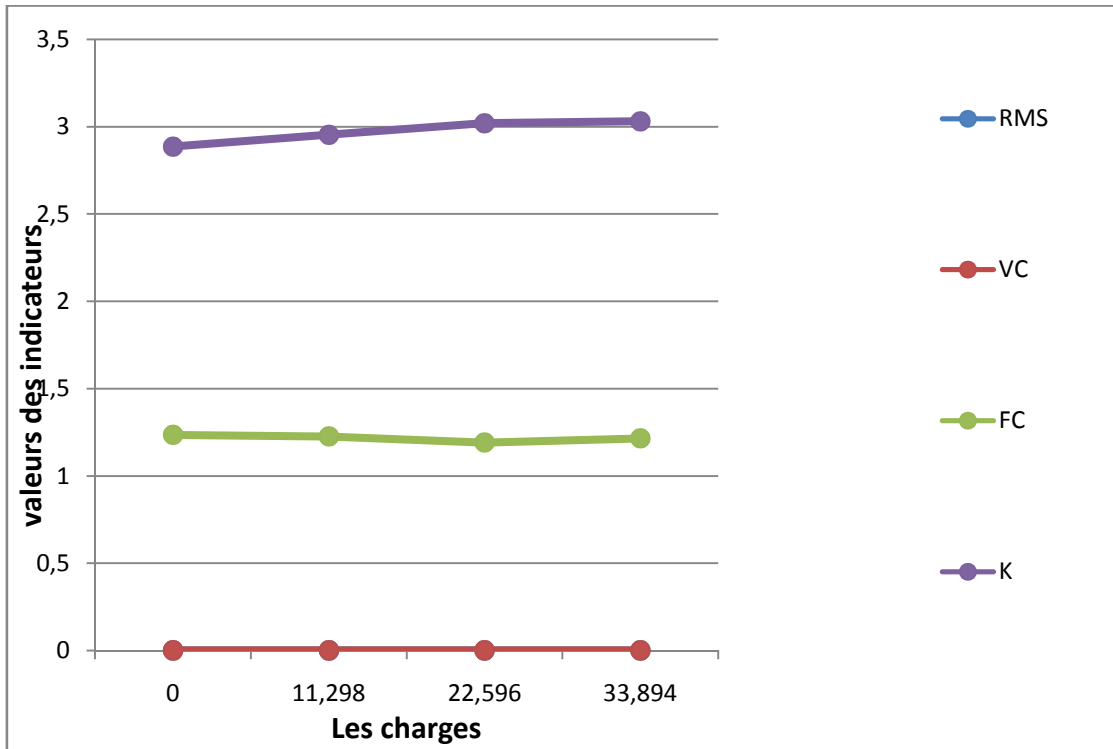
[E1V0] RH

ANNEXE

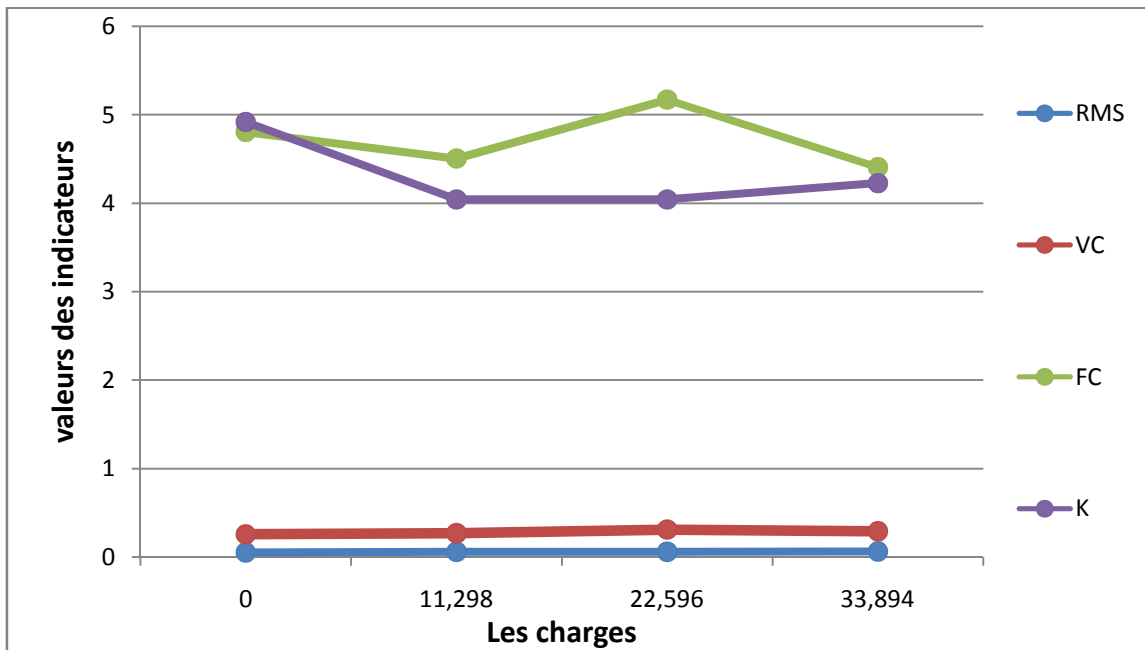


[E1V0] RV

ANNEXE

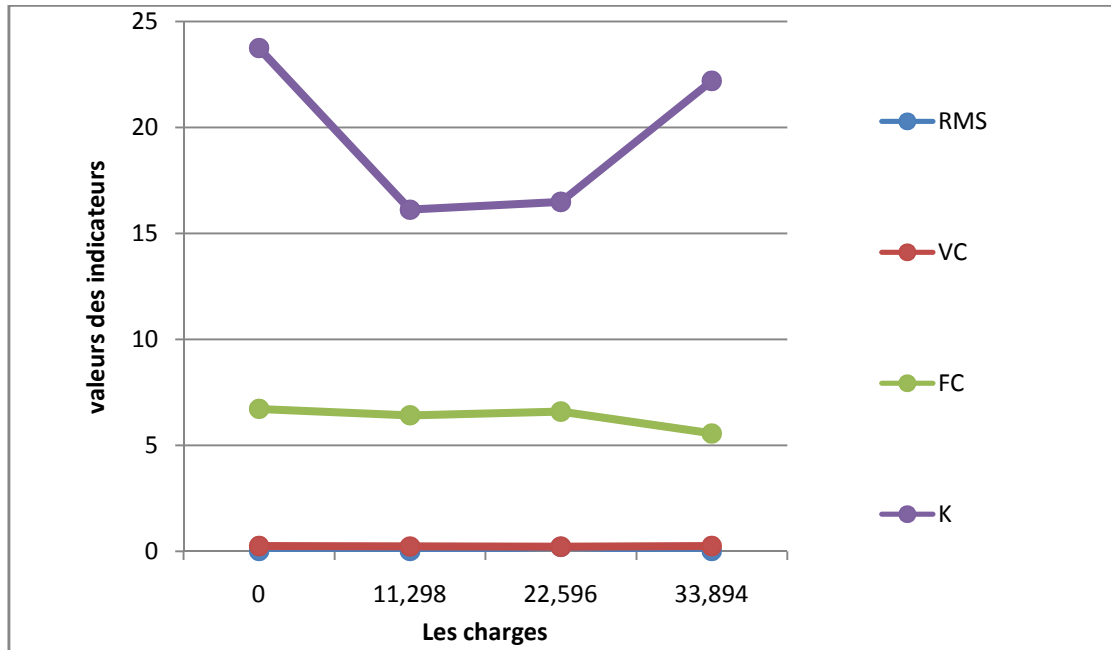


[E1V2] AX



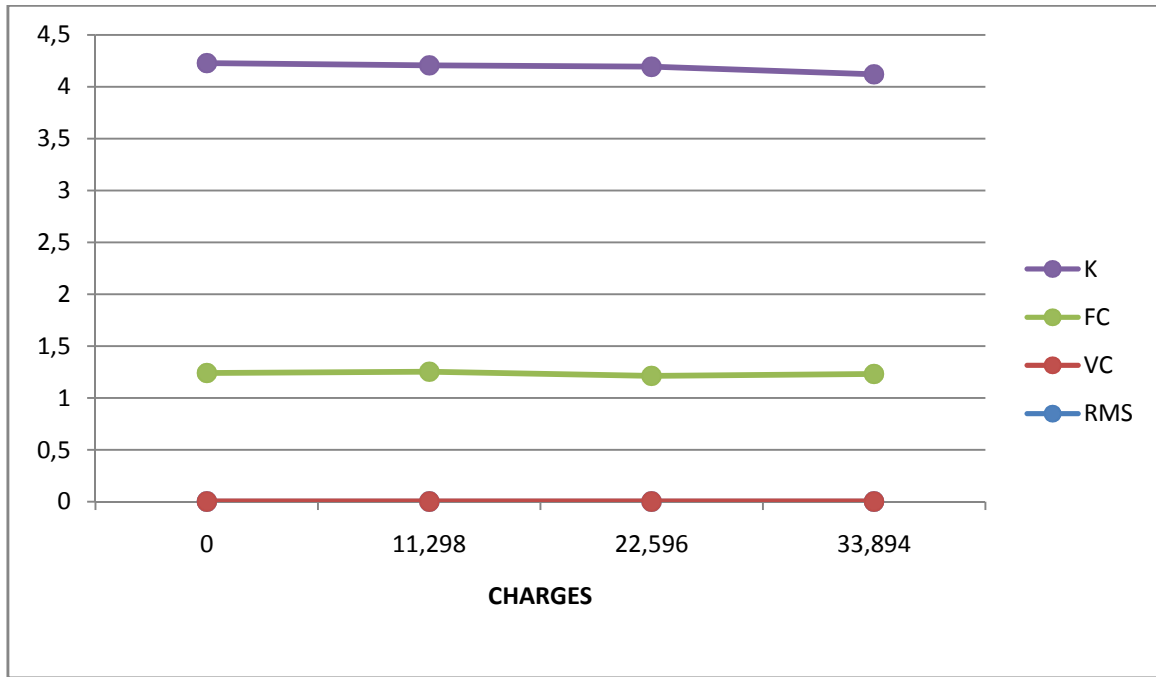
[E1V2] RH

ANNEXE

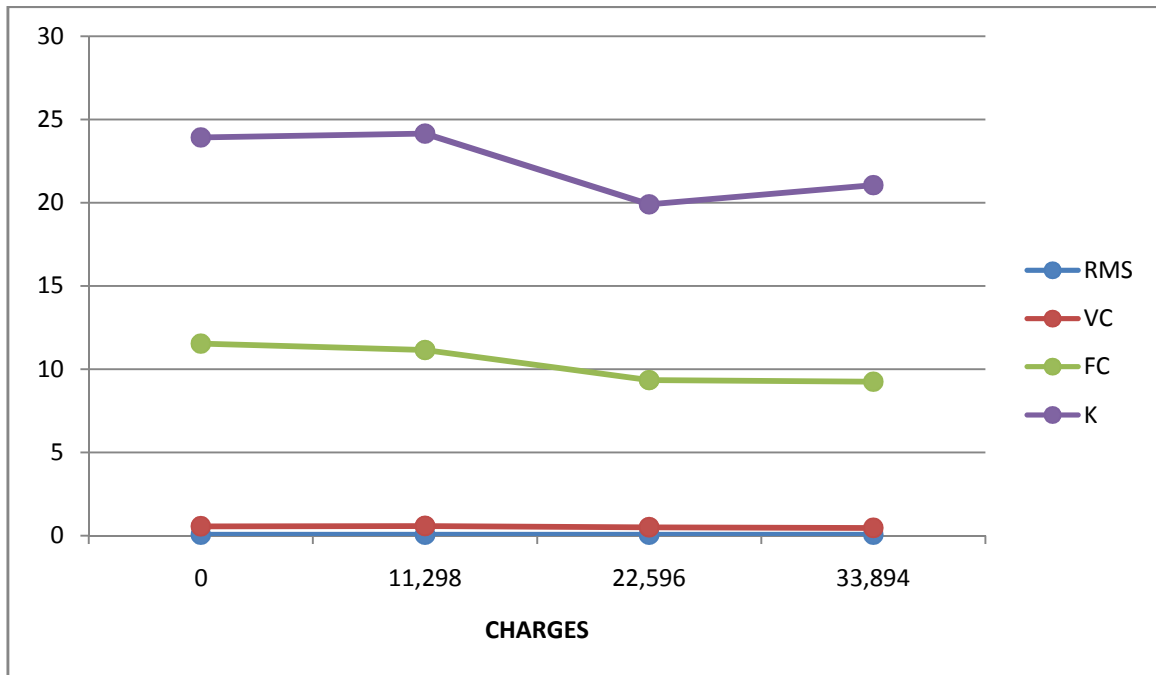


[E1V2] RV

ANNEXE

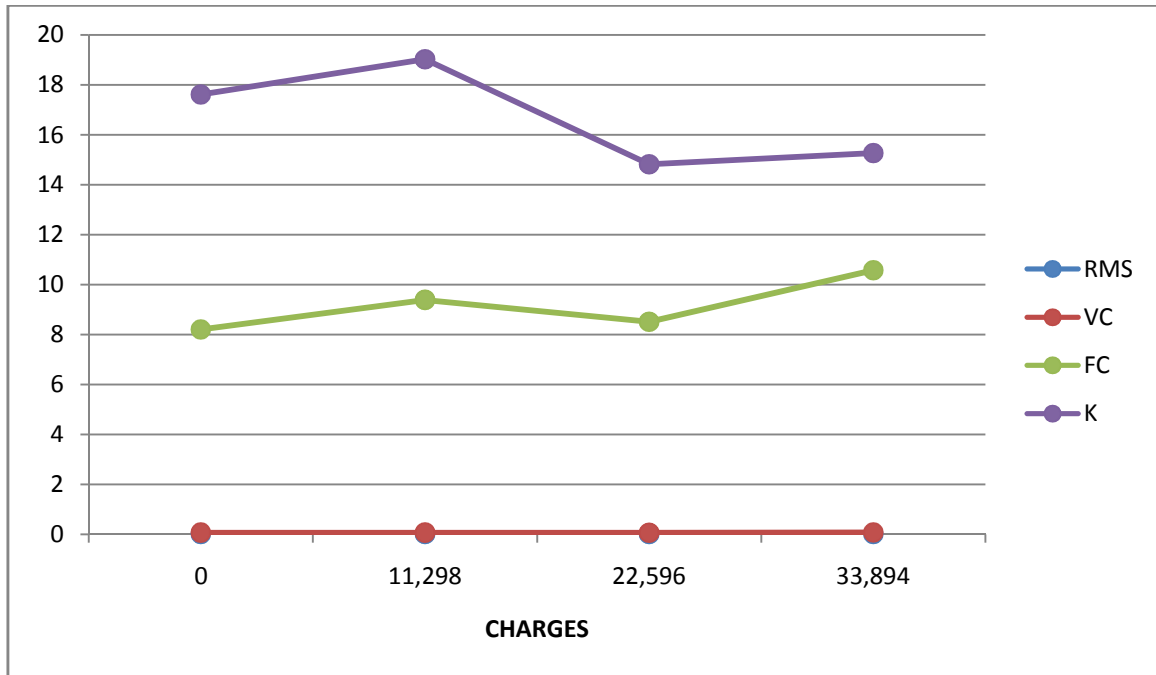


[E2V0]AX



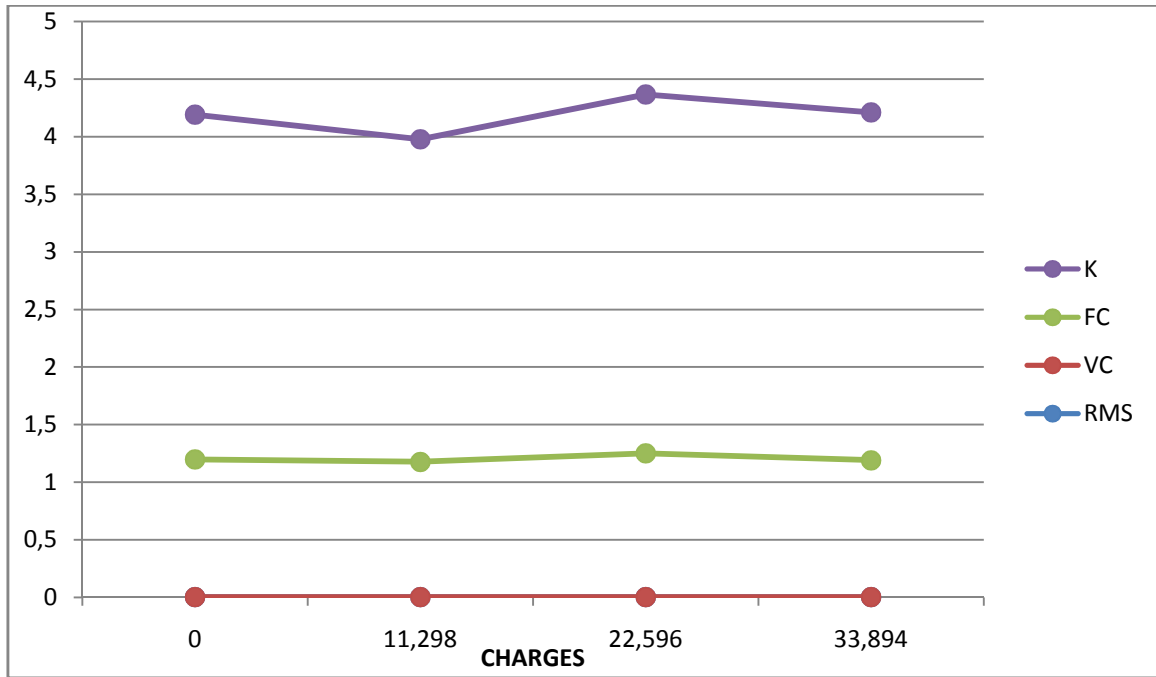
[E2V0]RH

ANNEXE

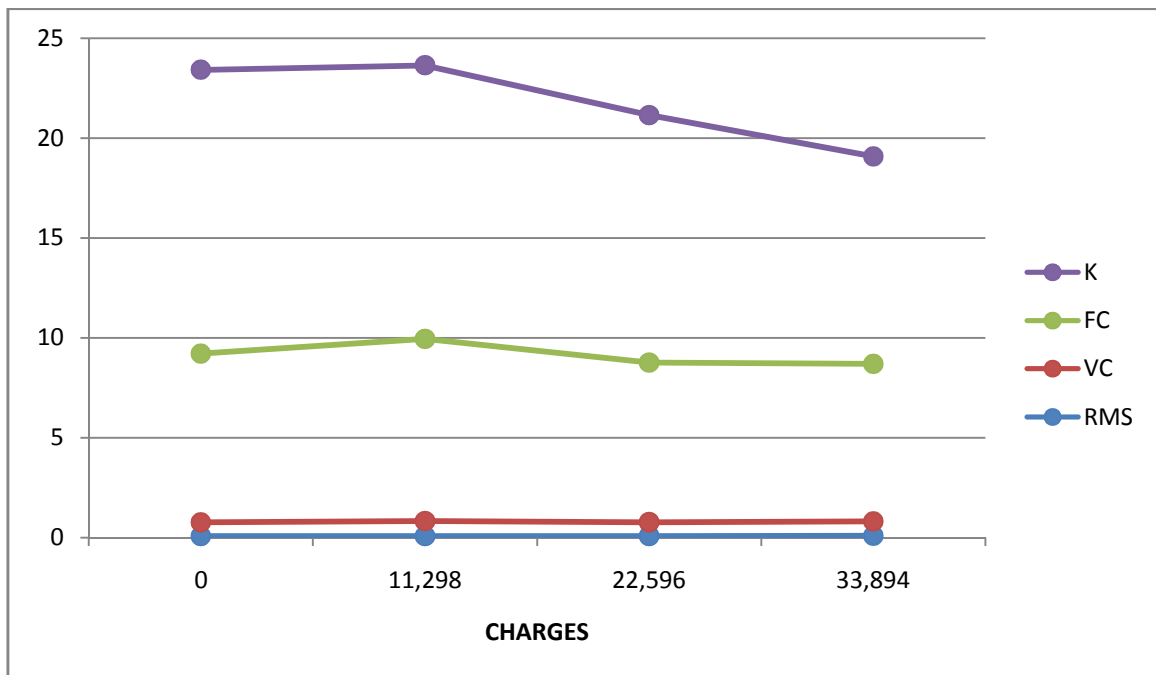


[E2V0]RV

ANNEXE

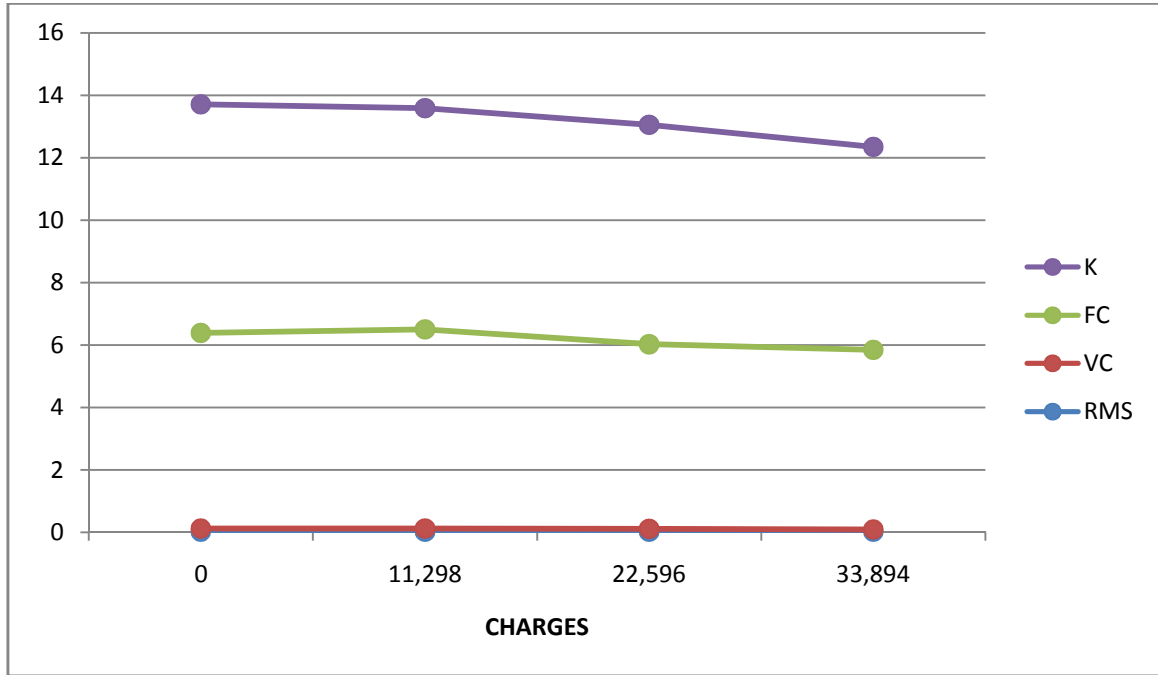


[E2V1]AX



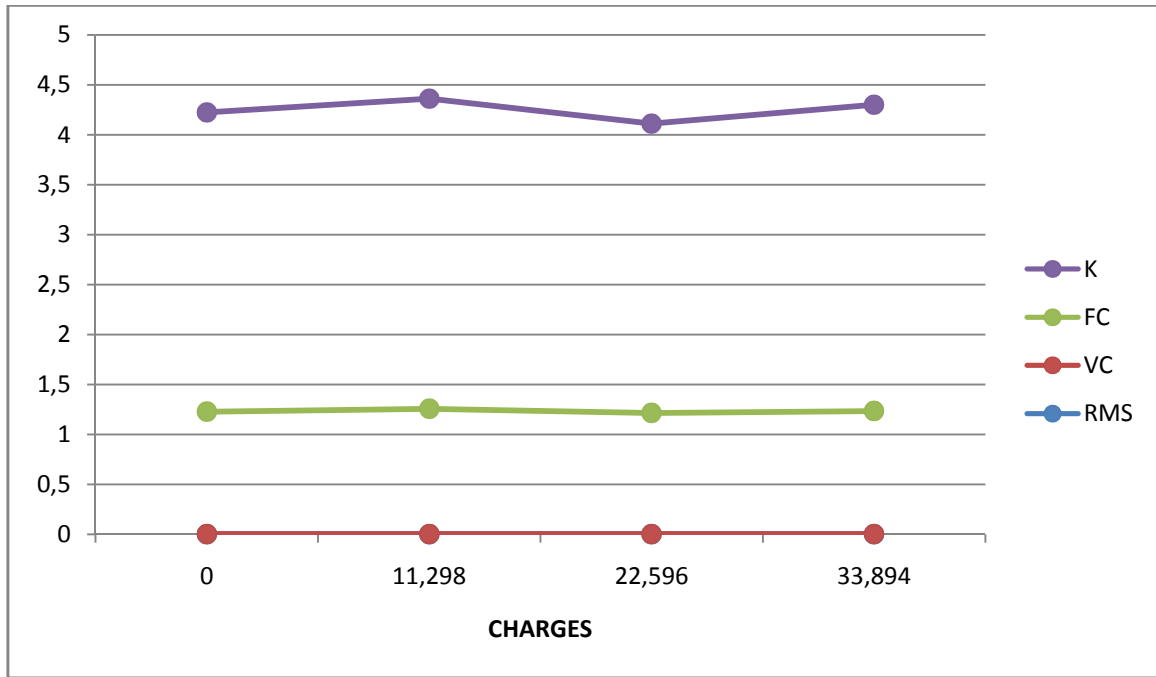
[E2V1]RH

ANNEXE

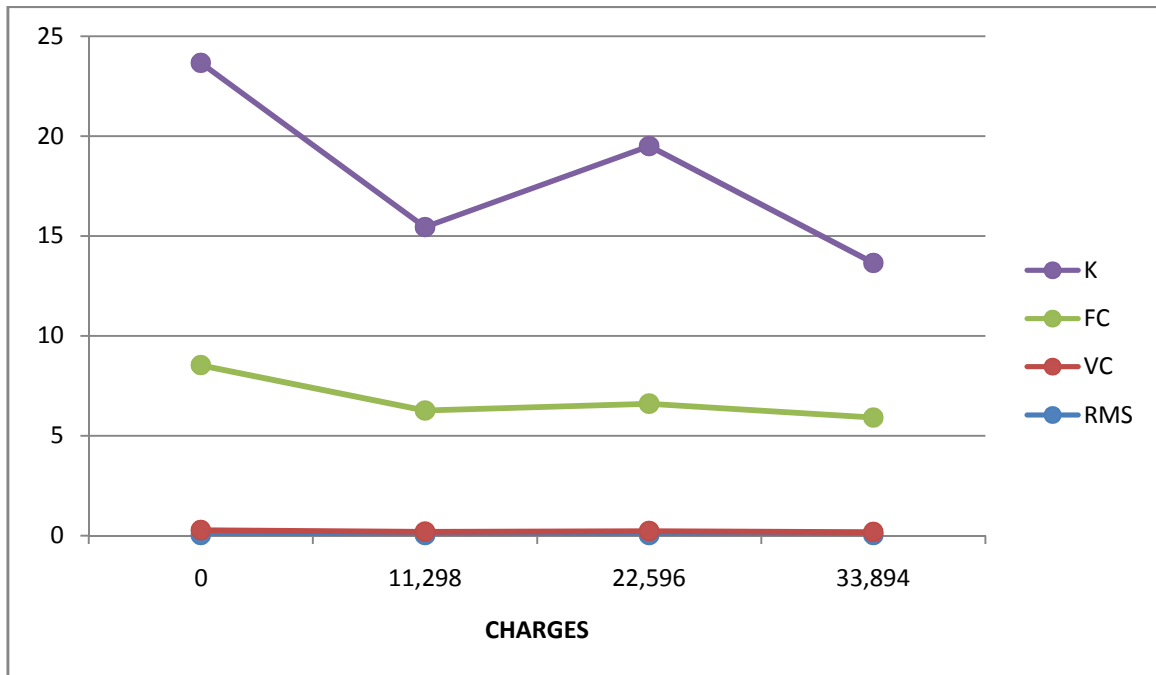


[E2V1]RV

ANNEXE

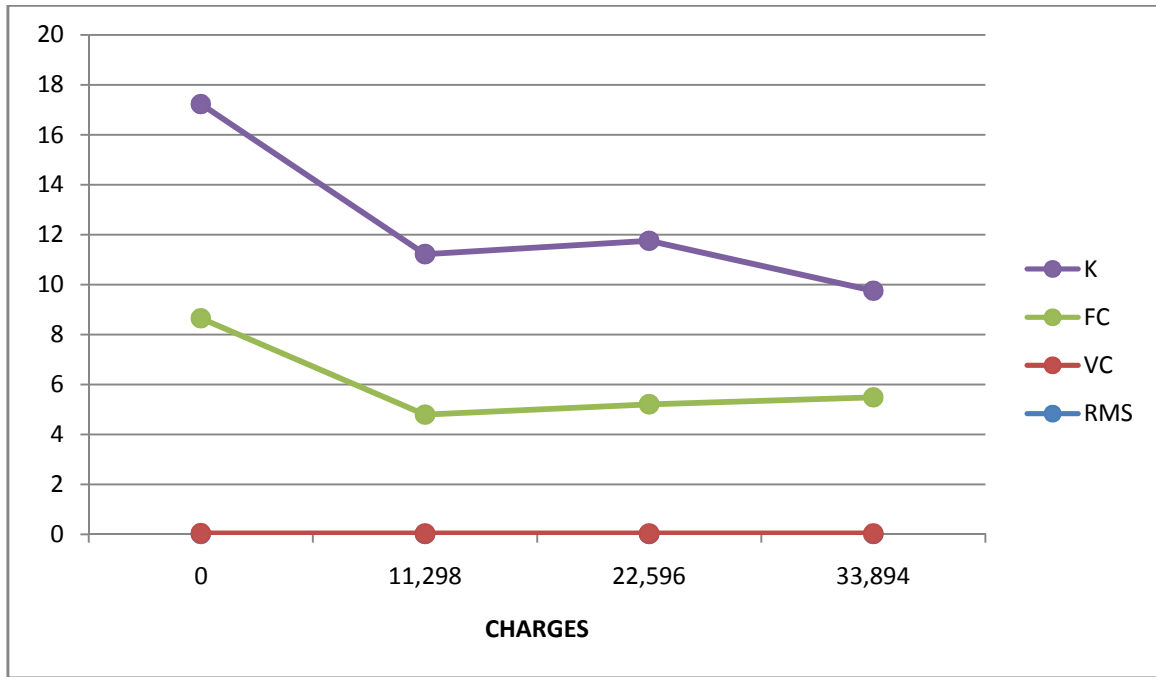


[E3V0]AX



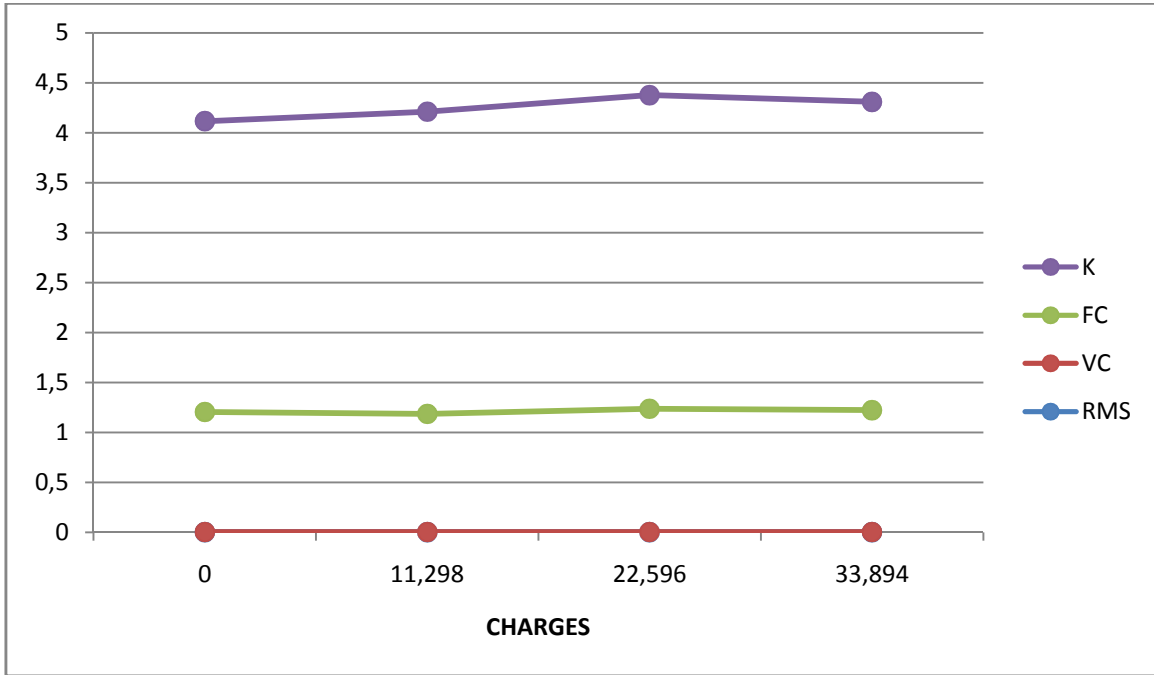
[E3V0]RH

ANNEXE

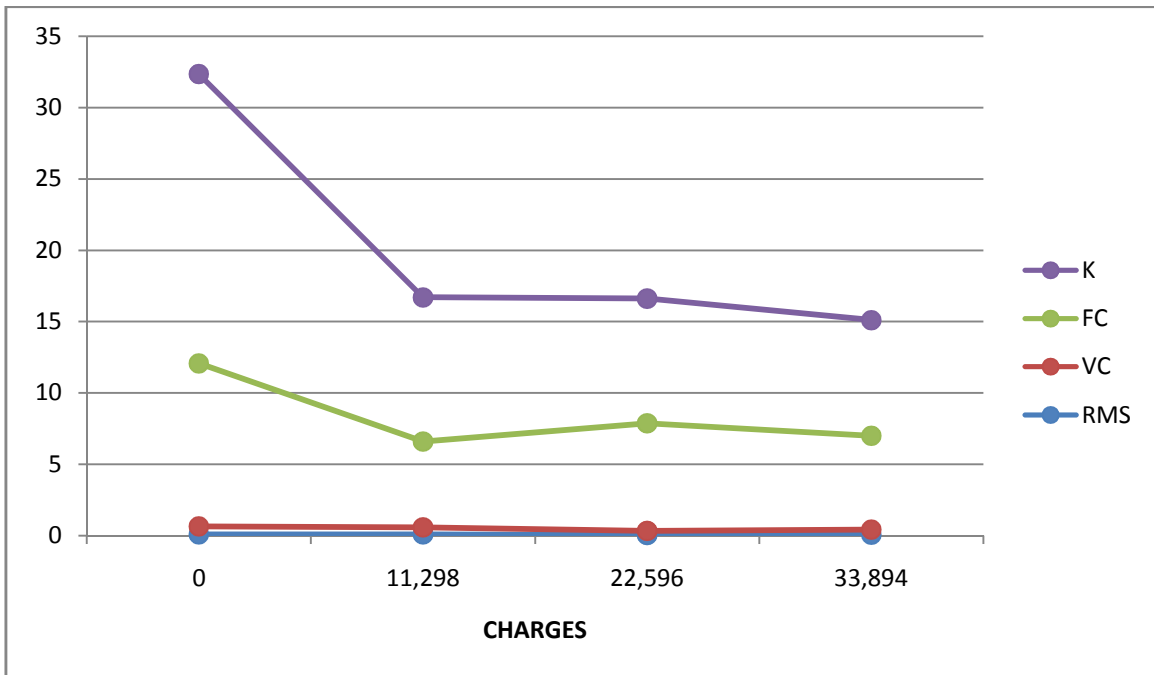


[E3V0]RV

ANNEXE

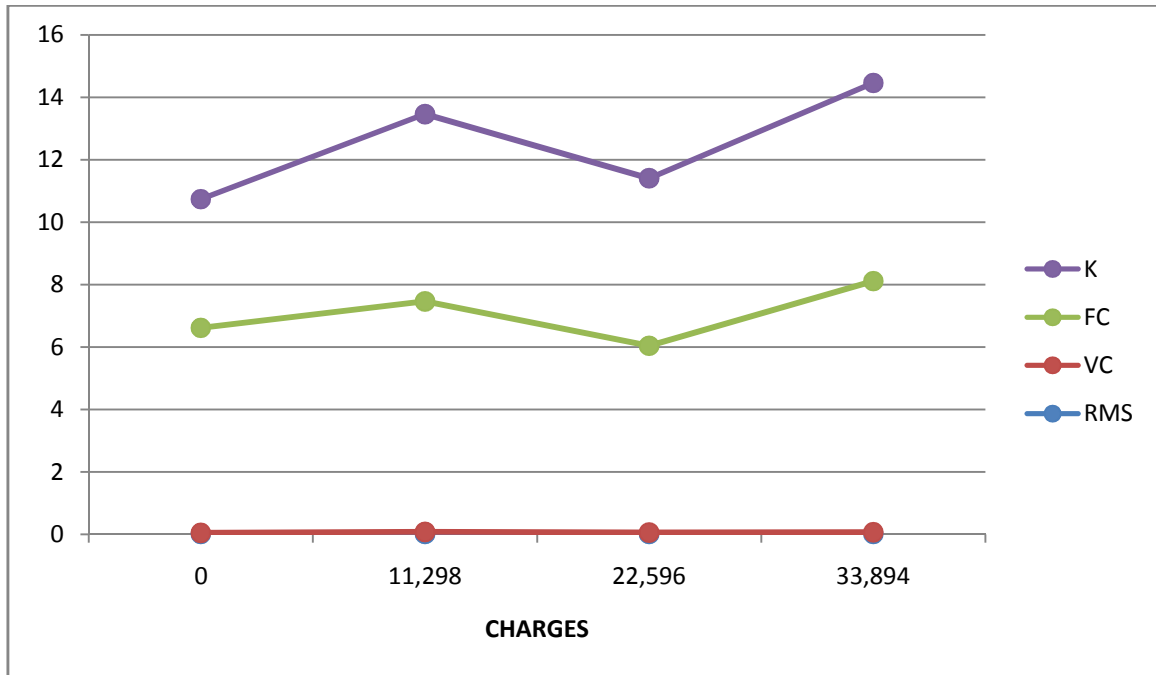


[E3V1]AX



[E3V1]RH

ANNEXE



[E3V1]RV