



FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études MASTER

Filière : **électromécanique**
Spécialité : **Maintenance industrielle**

Présenté par : M^r : LARABI Hamimi
M^r : AHCENE Sidali

Thème

**Application de la méthode SVM à la
détection et la classification des défauts
dans les machines tournantes**

Mémoire soutenue le 08/02/2022 devant les jurys composés de :

Mr. BELGAID Hocine	MCB	UMMTO	President
Mr. CHERABI Bilal	MCB	UMMTO	Promoteur
Mr. NAIT Ouslimane Ahmed	MCB	UMMTO	Examineur

Année universitaire 2020/2021

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos très chers parents à qui on doit tout ce qu'on est, et qui nous a donné un véritable modèle de travail, et qui nous a appris le respect de l'autre, la gentillesse et la persévérance. Nous espérons qu'ils trouveront dans ce travail toute notre reconnaissance et tout notre amour.

A nos chers frères et sœurs qui ont toujours été là pour nous.

Nous dédions ce mémoire à notre encadreur et à tous nos enseignants.

A tous nos amis

et à tous les autres qui nous a encouragé à finir ce travail.

Remerciements

Nous rendons grâce à Dieu qui nous a donné l'aide, la patience et le courage pour accomplir ce travail.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements à Dr **CHERABI BILAL**, pour nous avoir encadré et pour les recommandations qu'il nous a prodiguées et qui nous ont été d'un grand apport.

Nous tenons à adresser nos plus vifs remerciements aux membres de jury, pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier nos familles et nos amis, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Merci à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de près ou de loin et qui méritent d'y trouver leur nom.

Résumé

Ce mémoire présente une technique de diagnostic de défaut et de classification basée sur la méthode d'apprentissage automatique « Les Machines à Vecteurs de Support, SVM » qui est basée sur des données.

Dans notre travail, nous nous intéressons à la classification des défauts de roulement apparaissant dans les machines tournantes avec la méthode SVM.

Dans la phase de classification, les machines à vecteurs supports (Support Vector Machines (SVM)) ont été retenues. Ce système de diagnostic a été évalué en utilisant des signaux vibratoires en différents modes de fonctionnement (sain et avec défauts). Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette approche.

Mots-clés : Maintenance industrielle, analyse vibratoire, réseau de neurones, défaut de roulements, Diagnostic de défauts, Machines à Vecteurs de Supports, Apprentissage automatique, Modélisation.

Abstract

This thesis presents a damages diagnosis and classification technique based on the machine learning method "Support Vector Machines, SVM" which is based on data.

In our work, we are interested in the classification of bearing defects appearing in rotating machines with the SVM method.

In the classification phase, Support Vector Machines (SVM) were retained. This diagnostic system was evaluated using vibration signals in different operating modes (healthy and with damages). The results obtained show the effectiveness of this approach.

Keywords: Industrial maintenance, vibration analysis, neural network, bearing faults, fault diagnosis, support vector machines, machine learning, modelling.

Liste des figures

Figure I.1 : Cas de figure conduisant à la défaillance.....	14
Figure I.2 : Différents types de maintenance.	15
Figure I.3 : Structure de la maintenance Conditionnelle.	17
Figure I.4 : Les différentes étapes du diagnostic industriel.	18
Figure I.5 : Classification des méthodes de diagnostic.	21
Figure II.1 : Déséquilibre statique.	26
Figure II.2 : Déséquilibre de couple.	27
Figure II.3 : désalignement parallèle et désalignement angulaire.	28
Figure II.4 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée.	29
Figure II.5 : différents types de roulement à billes.	32
Figure II.6 : différents types de roulement à rouleaux.	33
Figure II.7 : roulement à aiguille.	34
Figure II.8 : Le palier.	34
Figure II.9 : l'écaillage des pistes.	36
Figure II.10 : blocage.	37
Figure II.11 : fissure et cassure des bagues.	38
Figure II.12 : détérioration de cage.	39
Figure II.13 : déformation du chemin de roulement.	50
Figure II.14 : usure et grippage.	40
Figure II.15 : corrosion des pistes.	41
Figure II.16 : corrosion de contact.	42
Figure II.17 : usure (modification de la précision géométrique).	43
Figure II.18 : effet de passage du courant sur les roulements.	43
Figure II.19 : rayures et empreintes.	44
Figure II.20 : rotation de bagues.	45
Figure II.21 : taches et décoloration.	45
Figure II.22 : écaillage en peau d'organe (peeling).	46

Figure II.23 : Schéma synoptique illustrant les effets des deux types de défauts et leurs manifestations.	47
Figure II.24 : Ecaillage sur la bague intérieure.	48
Figure II.25 : Ecaillage sur la bague extérieure.	49
Figure II.26 : Ecaillage sur l'élément roulant.	49
Figure III.1 : neurone biologique.	53
Figure III.2 : neurone formel (artificiel).	55
Figure III.3 : Le réseau de neurones à un seul niveau.	56
Figure III.4 : Le réseau de neurones multi-niveaux.	56
Figure III.5 : Fonction d'identité.	58
Figure III.6 : Fonction d'un seuil θ	58
Figure III.7 : Fonction sigmoïde.	58
Figure III.8 : Différents hyperplans possibles ainsi que les vecteurs de supports.	61
Figure III.9 : Maximisation de la marge.	62
Figure III.10 : Choix de l'hyperplan optimal.	62
Figure III.11 : Transformation d'espace.	63
Figure III.12 : Les cas de séparation de la méthode SVM.	64
Figure IV.1 : Banc d'essai de roulements.	71
Figure IV.2 : Densité spectrale de puissance.	72
Figure IV.3 : Présentation des sorties désirées.	76
Figure IV.4 : le noyau gaussien.	77
Figure IV.5 : le noyau polynomial.	77
Figure IV.6 : le noyau linéaire.	78
Figure IV.7 : Modèle de fonction objectif.	79
Figure IV.8 : Objectif min vs nombre d'évaluation de la fonction.	80

Table des matières

Introduction générale.....	10
CHAPITRE I Maintenance et diagnostique	12
I.1. Introduction.....	13
I.2. Concepts et terminologies	13
I.2.1. Défaut.....	13
I.2.2. Dégradation.....	13
I.2.3. Défaillance	13
I.2.4. La panne	14
I.3. Maintenance industrielle.....	14
I.3.1 Maintenance préventive	15
I.3.2 Maintenance corrective	17
I.4. Diagnostic industriel.....	18
I.4.1. Les différentes étapes techniques du diagnostic.....	18
I.4.2. Les différentes méthodes utilisées pour remonter à la cause de la défaillance.....	19
I.5. Conclusion	22
CHAPITRE II Classification et défauts de machines tournante	23
II.1. Introduction	24
II.2. Classement des machines.....	24
II.3. Défauts des machine tournantes	25
II.3.1. Défaut de balourd.....	25
II.3.2. Désalignement.....	27
II.3.3. Défauts d'un mauvais serrage mécanique.....	28
II.4. Les roulements.....	28
II.4.1. Constitution des roulements.....	28
II.4.2. Caractéristiques des roulements	30
II.4.3. Types de roulement	30
II.4.4. Défauts de roulement	35
II.5. Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé.....	48
II.5.1. Défaut de la bague interne.....	48
II.5.2. Défaut sur la bague externe.....	48
II.5.3. Défaut de l'élément roulant	49
II.6. Conclusion.....	50
CHAPITRE III Réseaux de neurones et classifieurs SVM.....	51
III.A. Réseaux de neurones.....	52

III.A.1. Introduction	52
III.A.2. Historique	52
III.A.3. Neurone biologique	53
III.A.4. Principe de fonctionnement	54
III.A.5. Neurone formel	55
III.B. Classifieur SVM (Support Vecteur Machines)	60
III.B.1. Historique	60
III.B.2. Présentation de SVM	60
III.B.3. Principes de fonctionnement général de la technique SVM	61
III.B.4. Domaines d’application de SVM	64
III.B.5. Avantages et inconvénients des SVMs	66
III. Conclusion	68
CHAPITRE IV Classification des défauts de roulement par la méthode SVM (Simulation et résultats)	69
IV.1. Introduction :	70
IV.2. Présentation du langage Matlab :	70
IV.3. Base des données	71
IV.4. Description des signaux étudiés :	71
IV.4.1. Signaux prélevés d’un roulement en fonctionnement normal :	73
IV.4.2. Signaux prélevés des roulements défectueux :	73
IV.5. Lancement de la classification avec la méthode SVM sur Matlab	76
IV.5.1. Présentation des sorties désirées	76
IV.5.2. Classification des défauts avec le noyau gaussien, polynomial et linéaire	77
IV.5.3. Comparaison entre trois noyaux et interprétation des résultats	81
IV.5. Conclusion	83
Conclusion générale	84
Annexe	86
Bibliographie :	91

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance industrielle est un ensemble d'opérations ayant pour but d'assurer le fonctionnement correct et continu d'appareillage conformément aux normes exigées par l'utilisateur.

Les pannes imprévues pouvant parvenir sur certaines machines ont parfois des conséquences très coûteuses. La perte de production pendant les réparations engendre un manque à gagner qui peut affecter les bénéfices de l'entreprise. Si l'on y ajoute les effets sur la gestion du personnel, la qualité de production amoindrie la perte éventuelle de réputation pour l'entreprise, il devient évident que de telles pannes ne doivent pas être tolérées.

Pour remédier à cela, il faut concevoir une nouvelle approche de maintenance dans les ateliers.

L'approche moderne consiste à mesurer l'état d'une machine tout au long de son fonctionnement afin de n'intervenir que lorsque les paramètres obtenus en imposent la nécessité. Cette méthode est appelée maintenance conditionnelle.

Pour que la maintenance conditionnelle soit efficace il faut effectuer des mesures précises et fiables de l'état des machines. Un certain nombre de variables sont, généralement, choisis comme étant des indicateurs fiables : La température, la pression d'huile...etc.

Dans le cas des machines tournantes, les expériences ont montré que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante, est la vibration.

L'augmentation des vibrations de la machine permet de détecter un défaut. L'analyse des caractéristiques de vibration de la machine permet d'en identifier la cause. On peut, par la suite, en déduire avec précision le délai à ne pas dépasser sans quoi l'état de fonctionnement deviendrait critique.

Au niveau des outils de traitement, les réseaux de neurones artificiels et la méthode svm sont des outils particulièrement adaptés pour aider les spécialistes de la maintenance dans des activités de reconnaissance et de classification des défauts de fonctionnement des machines.

A la lumière de ce qui précède, l'objectif du présent travail est d'élaborer un système de détection et de classification des défauts de roulements de machines tournantes par utilisation de la méthode svm.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

-le premier chapitre présente des généralités sur la maintenance industrielle et le diagnostic industriel.

-dans le deuxième chapitre nous décrivons les classes et les défauts des machines tournantes ainsi que les défauts des roulements les plus fréquemment rencontrés dans les machines tournantes.

-le troisième chapitre est consacré aux réseaux de neurones et à la présentation de la méthode SVM.

-le dernier chapitre est consacré aux résultats de simulation de la méthode svm pour la classification des défauts de roulements des machines tournantes.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale et les perspectives relatives à la poursuite du travail effectué.

CHAPITRE I

Maintenance et diagnostique

I.1. Introduction

Nous nous intéressons, dans notre travail à la détection et à la classification des défauts de roulements apparaissant dans des machines tournantes.

Nous allons, dans ce chapitre, définir les notions de base en maintenance industrielle nécessaires à la compréhension de notre travail.

I.2. Concepts et terminologies

L'objectif de la maintenance industrielle est de vérifier l'état de fonctionnement d'une machine puis d'assurer les corrections nécessaires en cas de mauvais fonctionnement.

Une machine, comme tout autre dispositif, peut être en bon état de fonctionnement ou bien présenter des problèmes, ces derniers peuvent être de différentes nature. Si nous les classons par leurs degrés de gravité nous pouvons les définir de la façon suivante :

I.2.1. Défaut

Le concept de défaut est important dans les opérations de surveillance et la maintenance des processus industriels.

On le définit par l'écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications tolérées. [1]

I.2.2. Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance de l'une des fonctions assurées par un équipement. Si les performances sont au-dessous du seuil défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il ne s'agit plus de dégradation mais de défaillance. [1]

I.2.3. Défaillance

Une défaillance est une altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa (ou ses) fonction(s) requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques.

Un défaut peut se présenter dans un système sans mener ce dernier à la défaillance.

On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.
- Défaillance significative : nécessitant un processus de traitement.
- Défaillance critique : nécessitant une intervention d'urgence.

On peut aussi distinguer trois types de défaillances classées par leurs apparitions dans le temps :

- Défaillance progressive : La défaillance se développe au fur et à mesure jusqu'à l'arrêt définitif du système.
- Défaillance aléatoire : Dans ce cas la défaillance se présente d'une façon aléatoire, c'est-à-dire, le système s'arrête et reprend son fonctionnement plusieurs fois pendant une période de temps avant sa défaillance complète.
- Défaillance soudaine : C'est le basculement soudain et définitif d'un système au-dessous du seuil du fonctionnement normal.

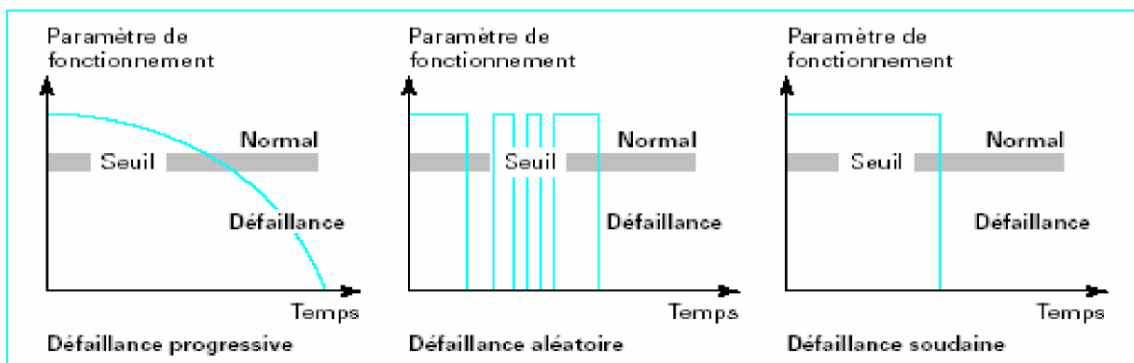


Figure I.1: Cas de figure conduisant à la défaillance. [5]

I.2.4. La panne

Une panne est une interruption permanente de la capacité du système ou d'un dispositif à réaliser une fonction requise.

I.3. Maintenance industrielle

La maintenance a pour objet de caractériser les défauts de fonctionnement puis d'optimiser le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux.

La maintenance industrielle nécessite une surveillance qui est un dispositif informationnel analysant l'état du système et fournissant des indicateurs. Cette surveillance consiste, notamment, à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à le diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. [3]

La figure suivante regroupe les différents types de maintenance :

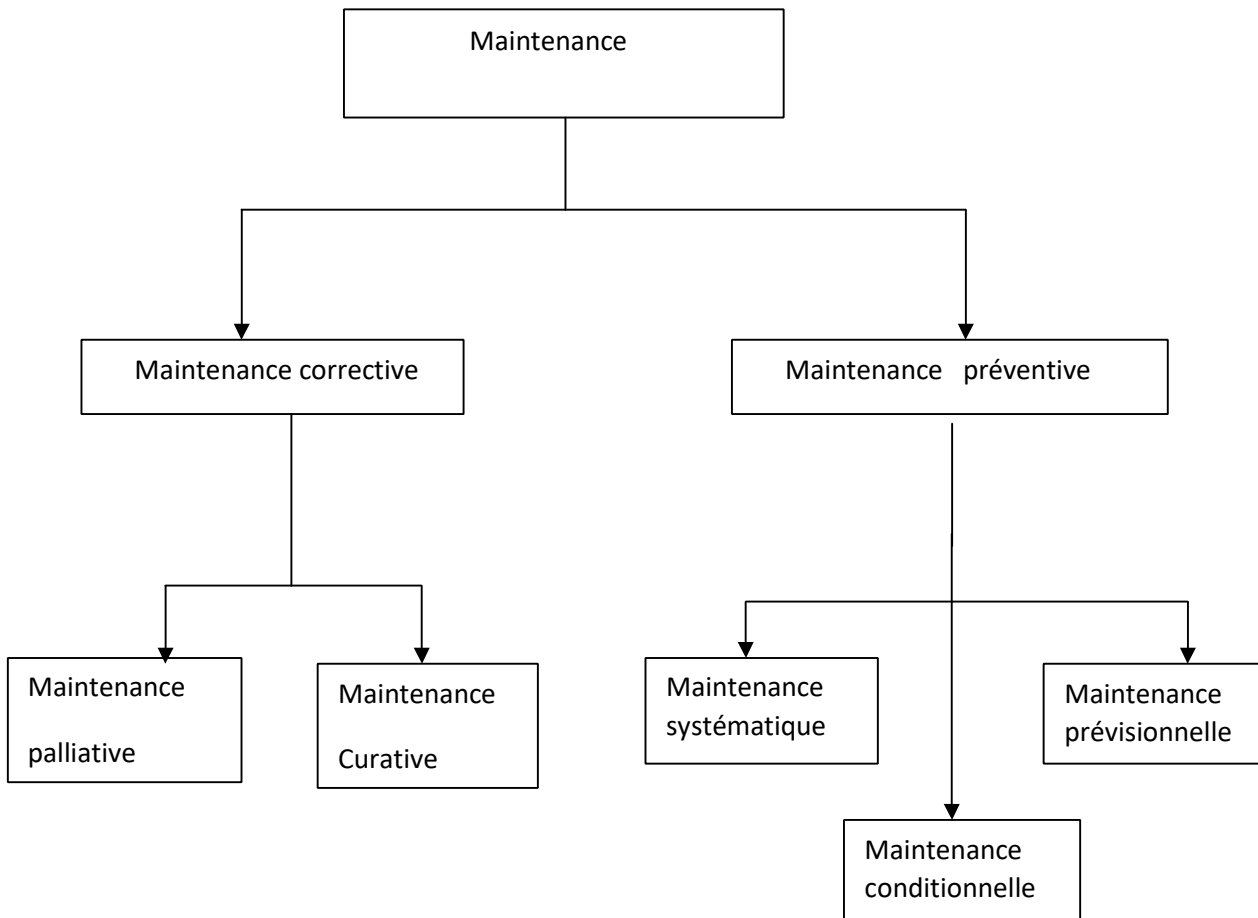


Figure I.2 : Différents types de maintenance. [5]

I.3.1 Maintenance préventive

L'objectif de la maintenance préventive est de diminuer la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un composant qui pourrait nuire à sa fonction requise. Ce type de maintenance intervient si une durée de vie d'un composant est expirée (maintenance systématique) ou si ce composant se trouve dans un état de dégradation significatif et qui pourrait provoquer une défaillance sur le système qui le rend incapable d'accomplir sa fonction requise (maintenance conditionnelle). [1]

I.3.1.1 Maintenance systématique

La maintenance préventive systématique intervient avant même qu'une simple dégradation ait été constatée, car, elle intervient à la limite de la durée de vie des composants et sans prendre en considération l'état du système à cet instant. Le composant est alors remplacé d'une façon systématique. [1]

I.3.1.2 Maintenance prévisionnelle

La maintenance préventive prévisionnelle est liée à la dégradation des composants et son évolution dans le temps. Son rôle consiste à retarder la dégradation et à planifier des interventions. [1]

I.3.1.3 Maintenance conditionnelle

Cette maintenance consiste à surveiller et analyser de façon continue l'état de fonctionnement et l'évolution dans le temps des installations ou des machines afin de prévenir un dysfonctionnement avant qu'il n'arrive.

En pratique, on parle d'une surveillance de l'état des machines et ceci pendant les phases de démarrage, de fonctionnement et d'arrêt. La connaissance et le traitement de ces données permettent de déceler les anomalies de fonctionnement et de décider les interventions nécessaires.

Cette méthode présente donc l'avantage d'éviter la surprise et de permettre généralement la planification de l'intervention ainsi de limiter au strict minimum les arrêts des machines.

La maintenance conditionnelle aujourd'hui, fait l'objet d'une demande croissante dans un grand nombre d'applications industrielles.

La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale du défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé. Elle impose donc des traitements en ligne. [1]

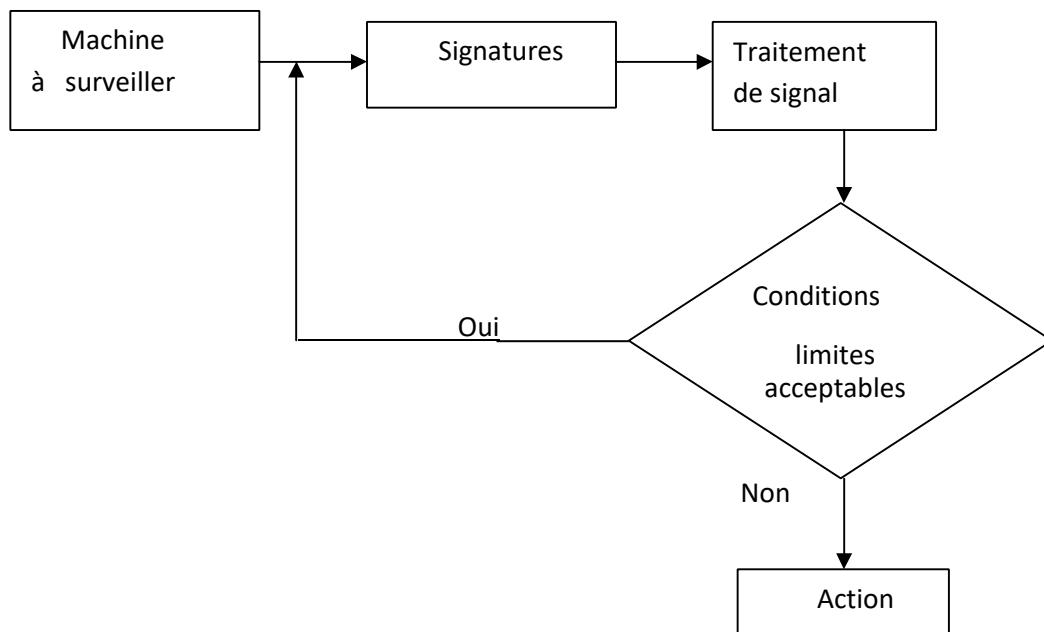


Figure I.3 : Structure de la maintenance Conditionnelle. [5]

I.3.2 Maintenance corrective

Ce type de maintenance intervient après la détection et la localisation d'un défaut, elle est destinée à remettre une entité dans un état qui lui permet d'accomplir la fonction requise. On distingue deux types de maintenance corrective : la maintenance corrective palliative et la maintenance corrective curative. [1]

I.3.2.1 Maintenance palliative

La maintenance palliative consiste à rétablir les fonctions requises du système d'une façon temporaire et provisoire. En général, ce type de maintenance est toujours suivi de la maintenance curative, appelée aussi, dans un langage courant, dépannage, son rôle est de gagner du temps pour la préparation et la planification pour les tâches de la maintenance curative. [1]

I.3.2.2 Maintenance curative

La maintenance curative est un ensemble d'actions qui permettent de faire rétablir le bon fonctionnement du système d'une façon permanente, ces actions pouvant être des réparations ou des remplacements de composants. [1]

I.4. Diagnostic industriel

Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Deux tâches essentielles sont nécessaires à l'établissement d'un diagnostic :

- Observer les symptômes de défaillance.
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations. [3]

I.4.1. Les différentes étapes techniques du diagnostic

Les étapes techniques du diagnostic industriel nécessaires à la conception, au développement et à l'exploitation de systèmes d'aide au diagnostic, sont définies dans la figure (I.4).

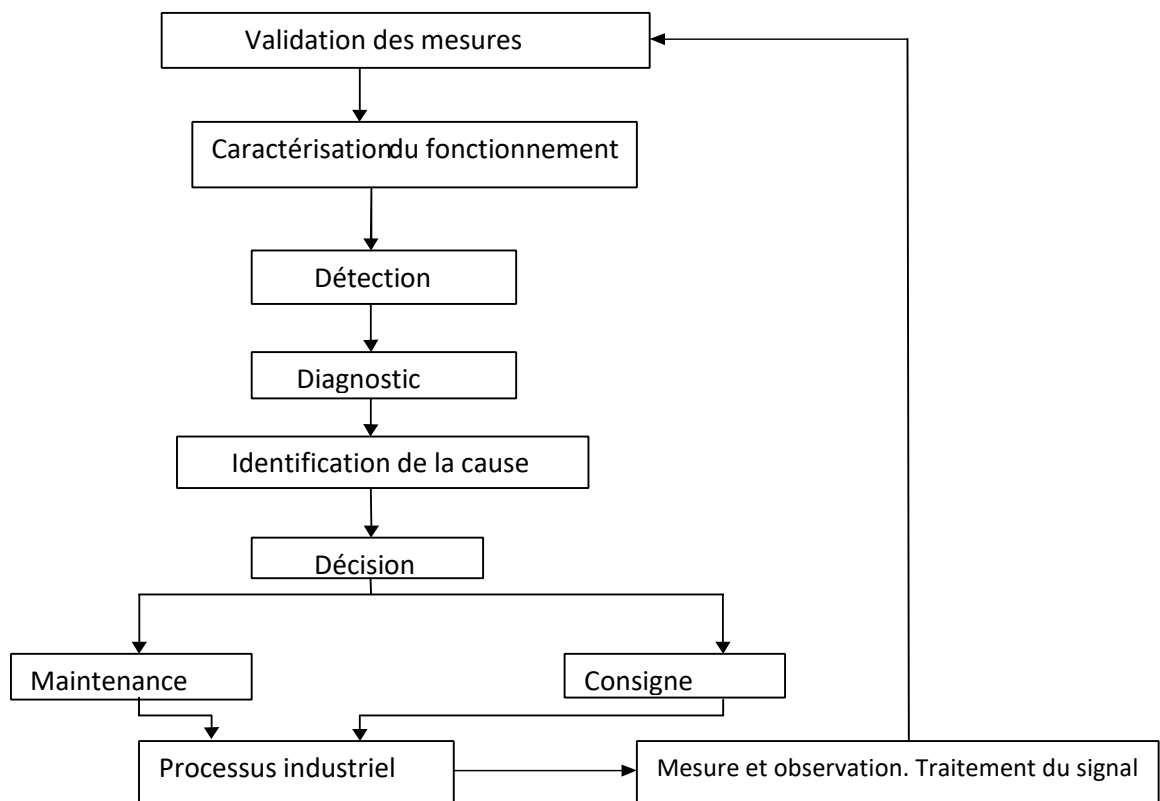


Figure I.4: Les différentes étapes du diagnostic industriel. [5]

La première étape en diagnostic industriel consiste à extraire des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux. Ces mesures sont réalisées par un personnel compétent avec des moyens de mesure (capteurs), afin de détecter un défaut et identifier ses causes.

La décision consiste à fixer des seuils d'alarme sur la valeur de l'écart mesuré entre la signature nominale (théorique) et celle observée.

La maintenance et la consigne (changements) interviennent pour corriger les anomalies existantes à l'aide d'un processus industriel. Pour s'assurer de l'efficacité de ce processus mis en œuvre, des mesures doivent être réalisées et traitées. [3]

I.4.2. Les différentes méthodes utilisées pour remonter à la cause de la défaillance

I.4.2.1. Mode de raisonnement

- **Les méthodes inductives**

Ces méthodes correspondent à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable. [5]

- **Les méthodes déductives**

Pour ces méthodes, la démarche est bien sûr inversée puisque l'on part de l'événement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles.

I.4.2.2. Les différentes méthodes

Les méthodes de diagnostic peuvent, aussi, être divisées en deux grandes familles :

- Les méthodes internes.
- Les méthodes externes.

Ce qui différencie ces deux méthodes est le fait de disposer, au moins, d'un modèle mathématique décrivant le système. [5]

-Les méthodes internes

Ces méthodes sont basées sur des modèles physiques ou de comportement (modèles mathématiques) validés expérimentalement par les techniques d'identification des paramètres.

-La méthode du modèle :

Son principe consiste à comparer le comportement prédit issu d'un modèle de représentation (de bon fonctionnement), au comportement réellement observé, afin de détecter les incohérences et en déduire les causes de dysfonctionnement (défauts d'instrumentation "capteurs ou actionneurs" ou défaut du processus "commande, Système d'information, etc.").

-La méthode d'identification des paramètres ou d'estimation du vecteur d'état :

Son principe repose sur la surveillance de l'évolution de certains paramètres physiques lors du fonctionnement d'un processus et qui ne sont pas mesurables directement. [5]

-Les méthodes externes

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et/ou les approches probabilistes.

On peut citer, dans ce cadre :

-Les réseaux de neurones artificiels :

Les réseaux de neurones artificiels et leur caractère associatif, leur confère la possibilité de reconnaître des données incomplètes et bruitées.

-La reconnaissance de forme :

Les performances des algorithmes de reconnaissance des formes dépendent fortement de la reconnaissance à priori des modes de fonctionnement.

-La logique floue :

La logique floue donne des explications logiques en exploitant toutes les règles disponibles pour approcher le résultat obtenu. En d'autres termes, c'est la logique qui s'efforce d'apporter des solutions à un problème clef de toutes les réalisations pratiques, en exploitant le savoir-faire de l'opérateur expert.

-La neuroflou :

C'est une méthode présentée en combinant les concepts des réseaux de neurones artificiels (RNA) et celles de la logique floue (LF). [2]

Le schéma suivant résume toutes les classifications citées précédemment.

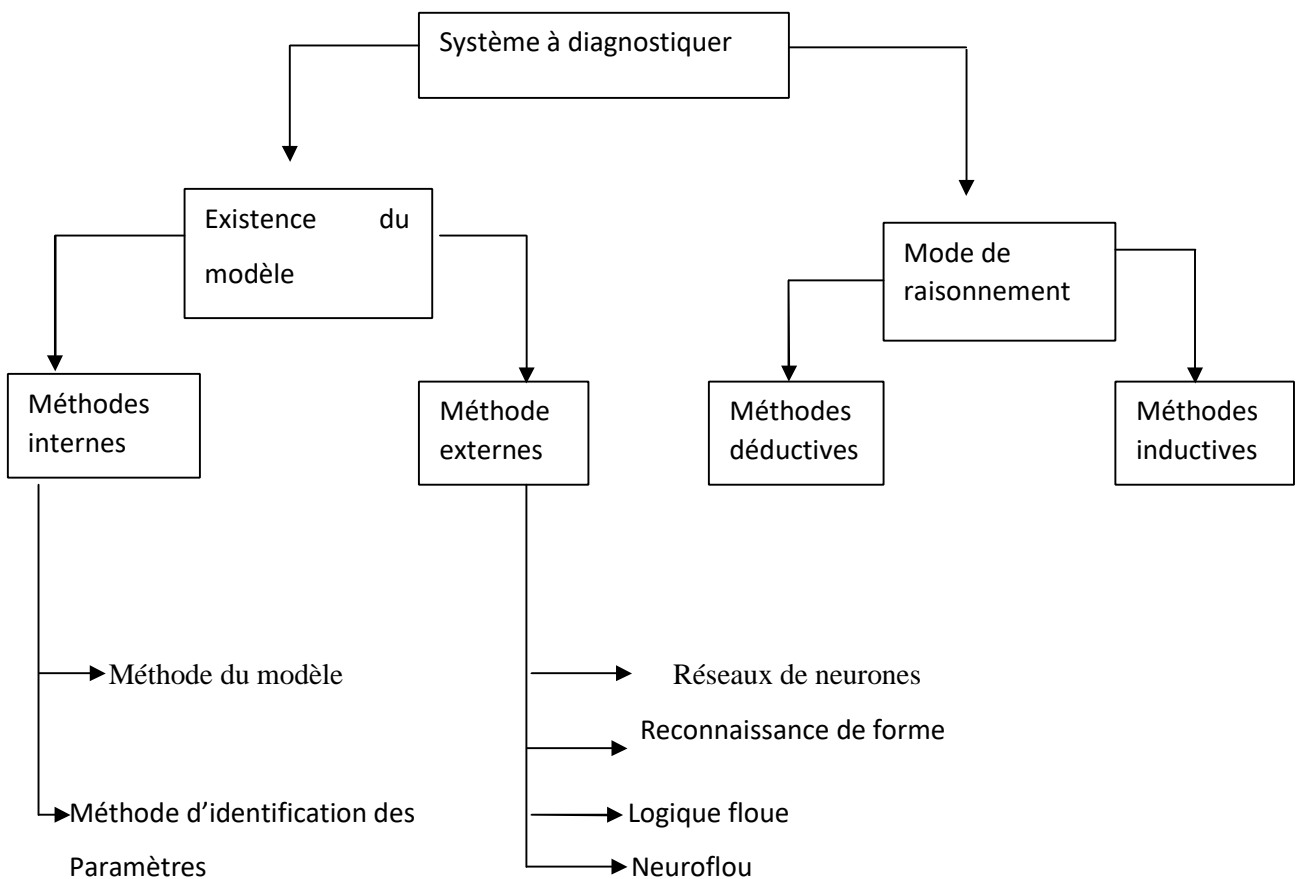


Figure I.5 : Classification des méthodes de diagnostic. [5]

I.5. Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons défini les notions de base de la maintenance industrielle, en particulier la maintenance conditionnelle, en s'appuyant sur la surveillance qui consiste à détecter les défauts puis les diagnostiquer pour les localiser et identifier les causes.

Notre travail porte sur la détection et la classification des défauts intervenant lors de fonctionnement des machines tournantes, nous allons, dans ce qui suit, étudier les phénomènes de vibrations qui constituent le paramètre utilisé pour caractériser l'état de fonctionnement du système.

CHAPITRE II

Classification et défauts de machines tournante

II.1. Introduction

Les machines tournantes occupent actuellement une place prépondérante dans les applications faisant intervenir des systèmes de transmission de puissance. La mesure des vibrations sur ces machines revêt une importance toute particulière puisqu'elle joue un rôle capital dans les programmes de maintenance. Lorsque ces vibrations sont trop élevées, elles causent souvent un sentiment d'inquiétude, puisqu'elles annoncent possiblement un arrêt ou un bris imprévu et par conséquent une perte non négligeable de productivité ou une atteinte à la sécurité du personnel.

Les vibrations des machines tournantes sont dues à plusieurs forces dynamiques, y compris celles dues aux conditions anormales de fonctionnement ou à divers défauts. Des modèles de génération du signal de vibration ont été développés afin de rendre possible l'identification des défauts à partir des signaux mesurés et par conséquent la connaissance de l'état défectueux de la machine. Ces modèles permettent la détermination des caractéristiques spécifiques qui peuvent être extraites à l'aide du traitement des signaux, permettant ainsi de fournir des diagnostics sur l'état de la machine.

Les vibrations dans les machines tournantes peuvent être causées par divers phénomènes d'excitation.

II.2. Classement des machines

Les machines tournantes peuvent être classées selon plusieurs critères à savoir :

- En fonction du nombre (n) de liaisons.
- En fonction de leur état rigide ou flexible.

Les liaisons disposées dans les paliers guident le rotor par rapport au stator avec deux liaisons, les forces moyennes (statiques) appliquées sur chacune d'elles sont déterminées à partir des forces appliquées sur le rotor dans une direction donnée par rapport à l'axe qui joint le centre des liaisons, cette configuration est dite isostatique. Si le nombre de liaisons est supérieur à deux, les forces appliquées sur les liaisons dépendent des impédances au droit des liaisons, cette configuration est dite hyperstatique.

-Classification selon l'état (rigide ou flexible) :

Les matériaux qui constituent les rotors étant doués de masse et élasticité, les rotors se déforment sous l'action des forces centrifuges dues aux balourds et à la vitesse de rotation.

Cependant lorsque les déformations sont faibles, il est possible de considérer le rotor en état rigide, tout état non-rigide est dite flexible.

La mise en place d'un dispositif de surveillance des équipements par analyse vibratoire requière un investissement financier important, c'est pourquoi il est judicieux de choisir les machines de la chaine de production, qui sont d'une importance capitale, pour appliquer cette méthode. Afin de ne pas surveiller des machines qui n'ont aucune importance dans la chaine de production, les industriels établissent le classement suivant :

-Machines Vitales : ce sont des machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de production. Les frais et délais de remise en l'état sont importants. Les pertes de production sont inestimables.

-Machines Importantes : Machines doublées ou non, et dont la panne entraîne une baisse sensible de production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi ;

-Machines Secondaires : Machines doublées et dont une panne ne remet pas en cause, les capacités de production.

II.3. Défauts des machine tournantes

II.3.1. Défaut de balourd

C'est la cause de vibration la plus commune et la plus fréquente rencontrée. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation, et peut être causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante. La force engendrée par le balourd est une fonction de la masse, et du rayon du cercle, sur lequel le rotor tourne. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Le phénomène de balourd, se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation.

Un défaut de balourd est donc relevé par :

- Une composante d'amplitude élevée à la fréquence de rotation du rotor en direction radiale.

- Un déphasage voisin de 90° entre deux composantes correspondant à des points de mesures radiales sur le même palier de rotor.
- Prépondérance de l'amplitude liée à la fréquence de rotation. Le déphasage entre les deux composantes d'ordre 1 de la fréquence de rotation sur le même palier, selon deux directions radiales orthogonales, est de 90° .

II.3.1.1. Balourd statique

Le balourd statique est la condition de déséquilibre où l'axe central principal est décalé parallèlement au centre de rotation. Le balourd statique, peut être décelé en plaçant la pièce ouvrière sur des tranchants de couteaux parallèles, le coté lourd du rotor se déplacera vers le bas.

Le balourd statique, peut souvent être décelé en comparant l'amplitude et la phase de vibration du palier ou de l'arbre aux bouts du rotor. On a trouvé des lectures d'amplitude et de phase de vibration identiques mesurées aux paliers ou à chaque bout de l'arbre.

Ce type de balourd peut être corrigé en ajoutant ou en enlevant du poids dans un seul plan de correction.

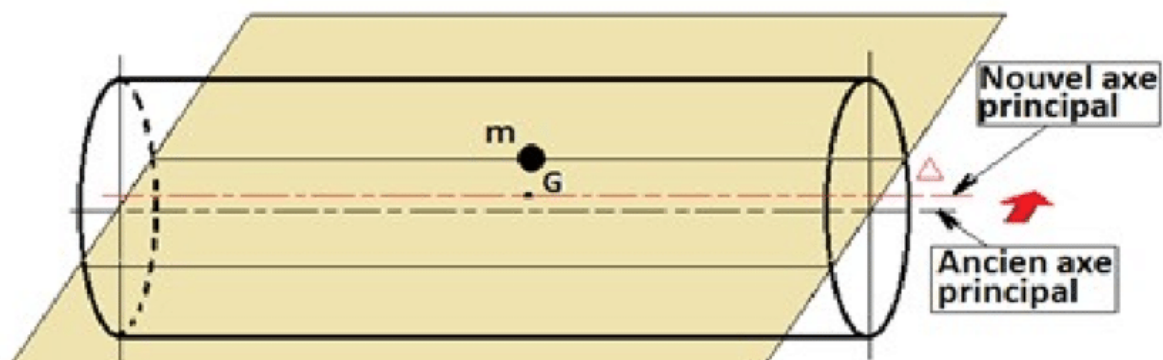


Figure II.1 : Déséquilibre statique.

II.3.1.2. Balourd de couple

Le couple est toute simplement deux forces parallèles égales agissant en direction opposée, mais sur la même ligne droite. Le balourd à chaque extrémité du rotor, mais sur des côtés opposés de la ligne du centre de rotation, crée un déséquilibre de couple. Le balourd de couple devient apparent seulement lorsque la pièce est en rotation, et peut souvent être identifié en comparant les lectures d'amplitude et de phase de vibration du palier ou de l'arbre à chaque bout de rotor.

Les lectures d'amplitudes sont égales, mais les lectures de phase seront en désaccord de 180° . Contrairement au balourd statique, qui peut être corrigé sur un seul plan, le balourd de

couple ne peut être corrigé qu'en faisant des corrections d'équilibre sur deux plans.

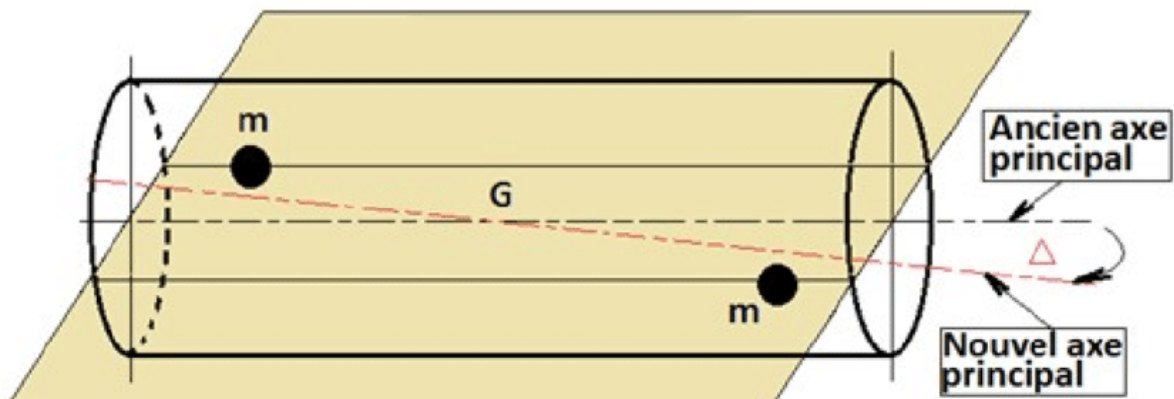


Figure II.2 : Déséquilibre de couple.

II.3.2. Désalignement

Le désalignement est un problème presque aussi commun que le balourd, et la raison est bien simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'existe aucune force qui puisse causer de vibration.

Un désalignement provoque des vibrations aux fréquences de rotation, ainsi qu'aux harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 de la fréquence de rotation. Un désalignement se produit par des niveaux :

- Axiaux très élevés à deux fois la fréquence de rotation ;
- Radiaux élevés à deux fois la fréquence de rotation. On constate deux types de désalignement (parallèle et angulaire) :

- Désalignement parallèle :

Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre. Le désalignement parallèle se caractérise par une vibration radiale élevée.

- Désalignement angulaire :

Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines à un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée.

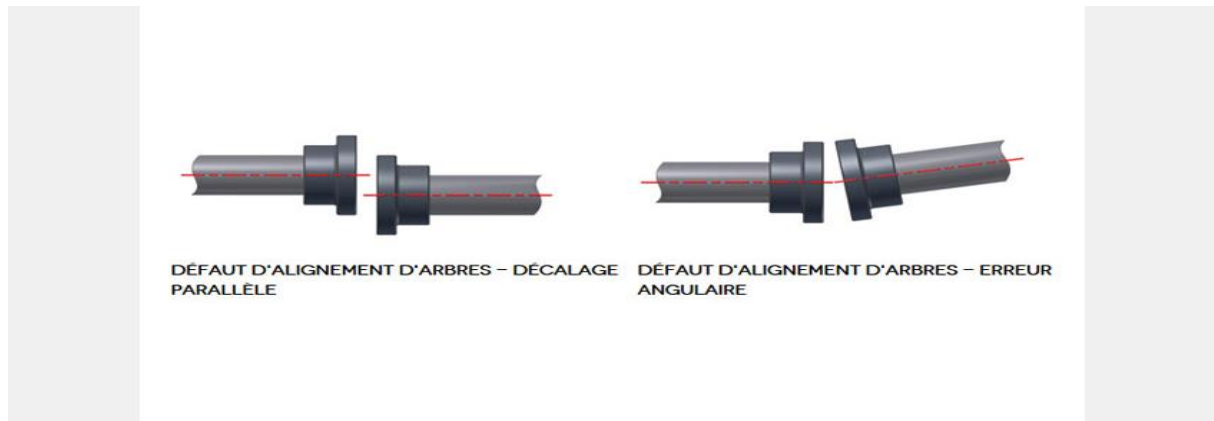


Figure II.3 : désalignement parallèle et désalignement angulaire.

II.3.3. Défauts d'un mauvais serrage mécanique

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence radiale égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se traduit sous l'effet de balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier. Une analyse du déphasage entre deux mesures prises orthogonalement sur un même palier permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante) d'un défaut de serrage ou d'une déformation du support (force directionnelle due à la contrainte).

II.4. Les roulements

Le roulement est un organe de base qui assure une liaison mobile entre deux éléments d'un mécanisme en rotation l'un par rapport à l'autre. 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.

II.4.1. Constitution des roulements

La majorité des roulements sont composés d'une bague intérieure et d'une bague extérieure, d'éléments roulants (billes ou rouleaux), et d'une cage. Les éléments roulants situés entre les deux bagues du roulement 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 ».

Elle supporte les charges appliquées aux roulements. En général, la bague intérieure est montée sur l'arbre et la bague extérieure dans le logement.

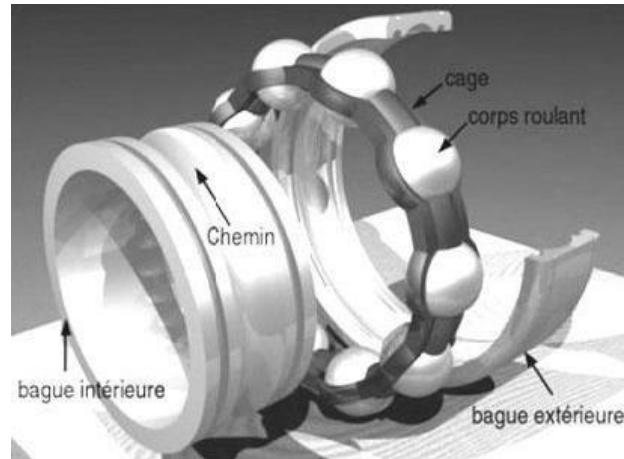


Figure II.4 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée. [6]

-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. [8]

-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 tous 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). [7]

-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.4.2. 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 :

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

II.4.3. Types de roulement

Il existe plusieurs types de roulement et sont classé selon le type d'éléments roulant (Bille ou rouleau), Les roulements à billes sont classés en différentes catégories suivant la forme de leur bague (roulements à billes à gorge profonde, à contact oblique). Les roulements à rouleaux sont classés suivant la forme des rouleaux (roulements à rouleaux cylindriques, coniques, à rotule sur rouleaux, roulements à aiguilles).

Les roulements sont également répartis en roulements radiaux qui encaissent principalement des charges radiales et les butées pour les charges axiales.

Les roulements se subdivisent encore en d'autres catégories : simple, double, ou à quatre rangées d'éléments roulants, roulements à bagues séparables ou non.

Les types de roulements sont présentés en ci-dessous. [7]

- 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 butées. Il est possible de faire des combinaisons de roulements radiaux et axiaux qui possèdent alors les caractéristiques propres des roulements radiaux et des roulements axiaux.

- 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 paires 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.

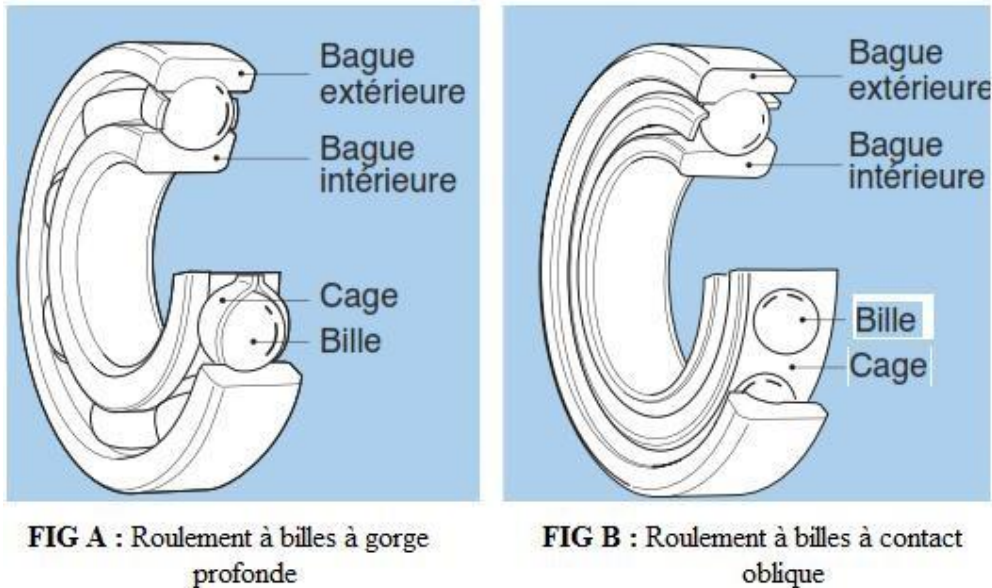


Figure II.5 : différents types de roulement à billes. [7]

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 serré 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. [7]

D. Roulements à rouleaux coniques

Les roulements à rouleaux coniques sont conçus de manière à ce que le chemin de roulement des bagues intérieure et extérieure et les génératrices des rouleaux coniques se coupent en un point qui se trouve sur l'axe du roulement. Les enroulements 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 précharge. Le réglage du jeu interne (ou précharge) après montage est délicat et demande une attention particulière. Les roulements à rouleaux coniques sont capables de supporter de fortes charges axiales et radiales. [7]

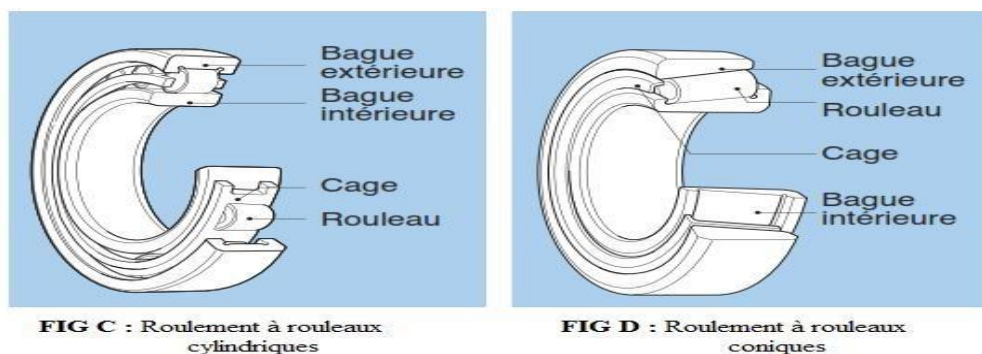


Figure II.6: différents types de roulement à rouleaux. [7]

E. Roulements à rouleaux sphériques

Equipés 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. [7]

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 mouvements d'oscillations et de pivotement. Il existe de nombreux types de roulements à aiguilles. [7]

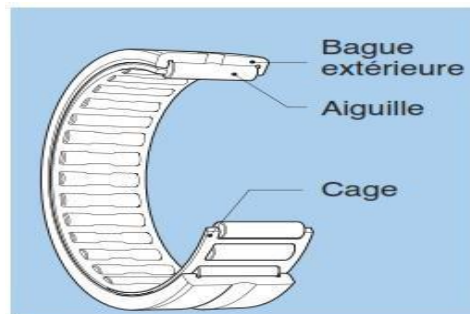


Figure II.7: roulement à aiguille. [7]

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 appliques. 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.

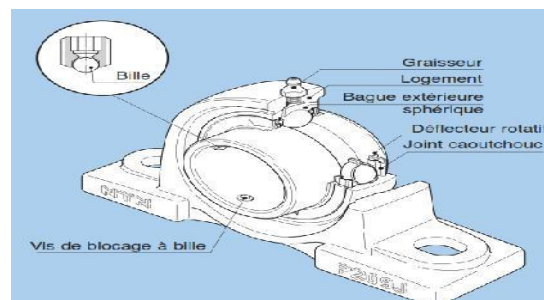


Figure II.8 : Le palier. [7]

II.4.4. Défauts de roulement

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente. Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), faux effet Brinell, etc... Tous ces défauts se traduisent par une perte de métal et provoquent des chocs répétés des billes sur la cage de roulement.

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

Elles sont données par les formules :

- Fréquence d'un défaut localisé sur la bague externe du roulement :

$$f_{be} = \left(\frac{N}{2}\right) fr \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \dots \dots \dots (2.1)$$

- Fréquence d'un défaut localisé sur la bague intérieure

$$f_{bi} = \left(\frac{N}{2}\right) fr \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \dots \dots \dots (2.2)$$

- Fréquence d'un défaut localisé sur un élément roulant

$$f_b = \left(\frac{D}{d}\right) fr \left[1 - \left(\left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right)^2\right] \dots \dots \dots (2.3)$$

- Fréquence d'un défaut de cage

$$f_{bi} = \left(\frac{1}{2}\right) fr \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \cos \varphi\right] \dots \dots \dots (2.4)$$

Ces fréquences peuvent être rencontrées pour un roulement en fonctionnement normal (du fait du non linéarité de la raideur de contact sur un roulement en fonctionnement), mais surtout lors de l'apparition de défauts sur les éléments le constituant qui vont engendrer des impulsions produites à chaque fois qu'un élément roulant rencontre un écaillage sur son chemin.

-Origine : peut-être :

- un écaillage de la piste interne (sur l'arbre).
- un écaillage sur la piste externe (sur l'alésage).
- un défaut localisé sur un élément roulant (bille ou rouleau).

II.4.4.1. 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 [7] :

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



Figure II.9: l'écaillage des pistes. [7]

-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.

B/ Blocage : Le roulement chauffe de façon continue .la matière change de couleur. Le roulement peut se bloquer.



Figure II.10: blocage. [7]

-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.

-Actions 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.

C/ Fissures et cassures : Ecaillages ponctuels Présence de fissures et de cassures.



Figure II.11: fissure et cassure des bagues. [7]

-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.

D/ Détérioration de cage :

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



Figure II.12: détérioration de cage. [7]

-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.

E/ Déformation du chemin de roulement :

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



Figure II.13: déformation du chemin de roulement. [7]

-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.

F/ 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 II.14: usure et grippage. [7]

-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 précharge.

Vérifier les conditions d'utilisation.

Vérifier les méthodes et manipulations et de montage du roulement.

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



Figure II.15 : corrosion des pistes. [7]

-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.

H/ 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.

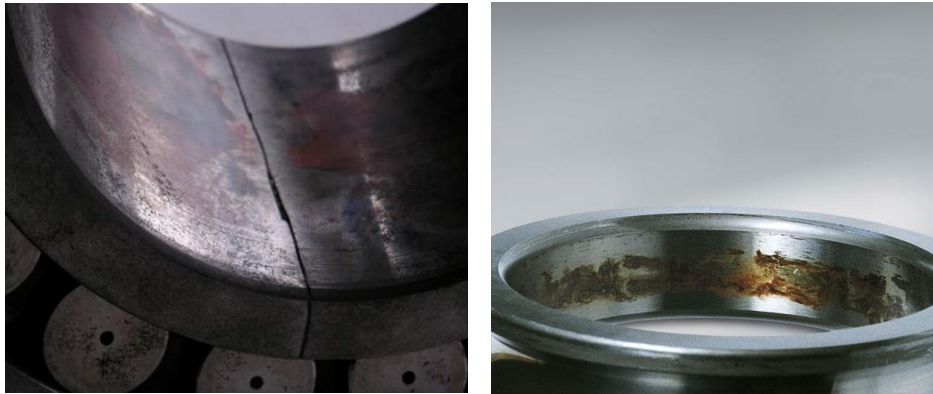


Figure II.16 : corrosion de contact. [7]

-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.

I/ Usure : Usure des pistes, modification de la précision géométrique, présence de rayures, rodages des différents éléments roulants.



Figure II.17: usure (modification de la précision géométrique). [7]

-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.

J/ Passage de courants électriques à travers le roulement : Présence de cratères ainsi que de cannelures sur les pistes du roulement.

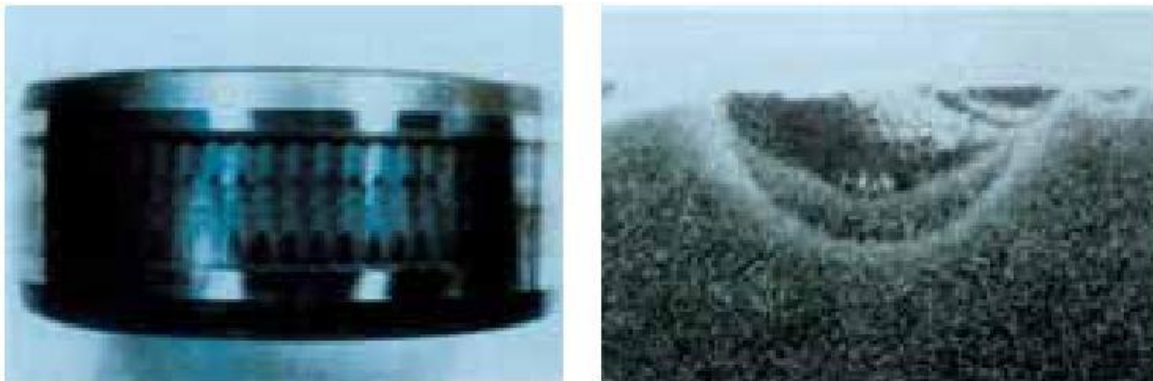


Figure II.18: effet de passage du courant sur les roulements. [7]

-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.

K/ 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.

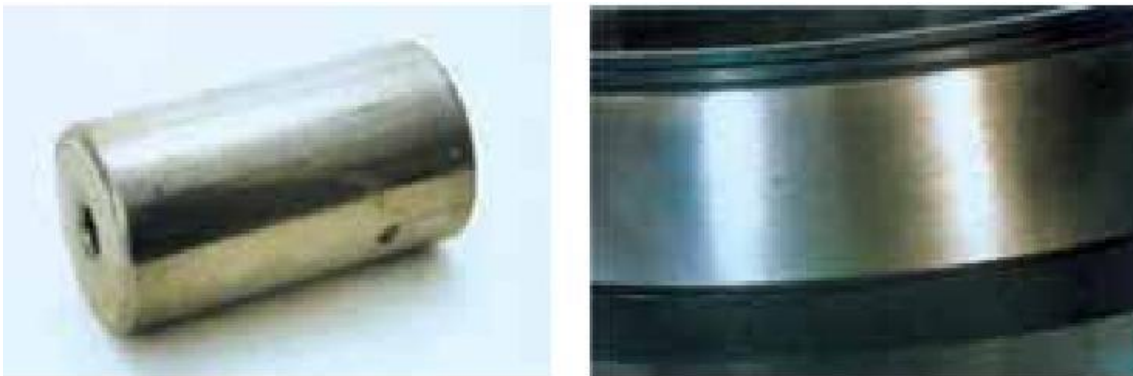


Figure II.19: rayures et empreintes. [7]

-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.

L/ Rotation de bagues : Etat de surface du logement d'aspect poli ou coloration.

Traces de frottement visible.

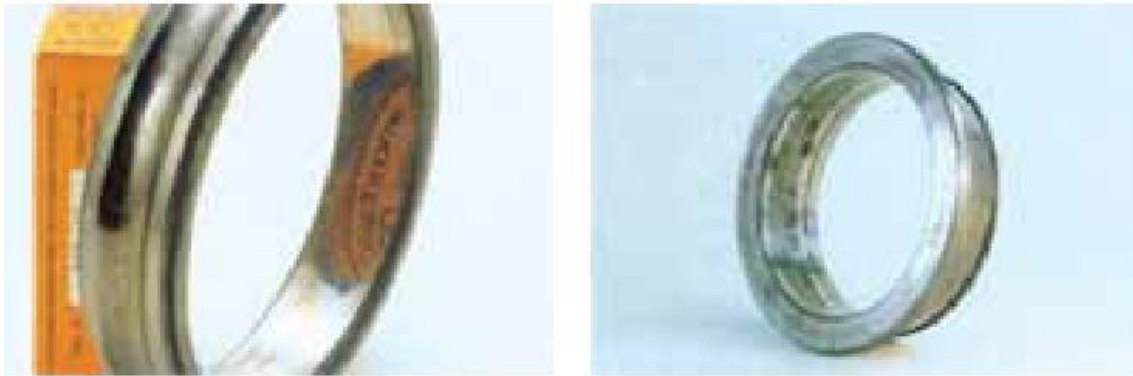


Figure II.20: rotation de bagues. [7]

-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.

M/ Taches et décoloration : Disparition du lustre des surfaces de chemin de roulement.

Surfaces mates, rugueuses, et/ou trouées, couvertes de petits bossés.



Figure II.21: taches et décoloration. [7]

-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.).

N/ Ecaillage en peau d'organe (peeling) : Petites traces d'écaillage (environ 10 μ m), présence de nombreuses rayures très fines.



Figure II.22: écaillage en peau d'organe (peeling). [7]

-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.4.4.2. Classification de défaut

Les défauts de roulement sont souvent classés en fonction de la localisation du défaut (Par exemple, une bague intérieure ou un défaut de bague extérieure). Car La plupart des techniques de détection de défaut de palier par l'analyse du courant concentrent sur les quatre fréquences caractéristiques de défaut. Cependant, les quatre fréquences caractéristiques de défaut n'existent pas dans de nombreux défauts de palier réalistes. Le problème avec ce groupe, c'est qu'il ne traite pas un groupe important de défauts.

Cela a conduit à l'idée de classer les défauts de palier selon des signatures de défaut qui sont produites [9]. De cette notion, Les défauts de roulement peuvent être classifiés en deux groupes [9-10] :

- Les défauts distribués.

- Les défauts localisés.

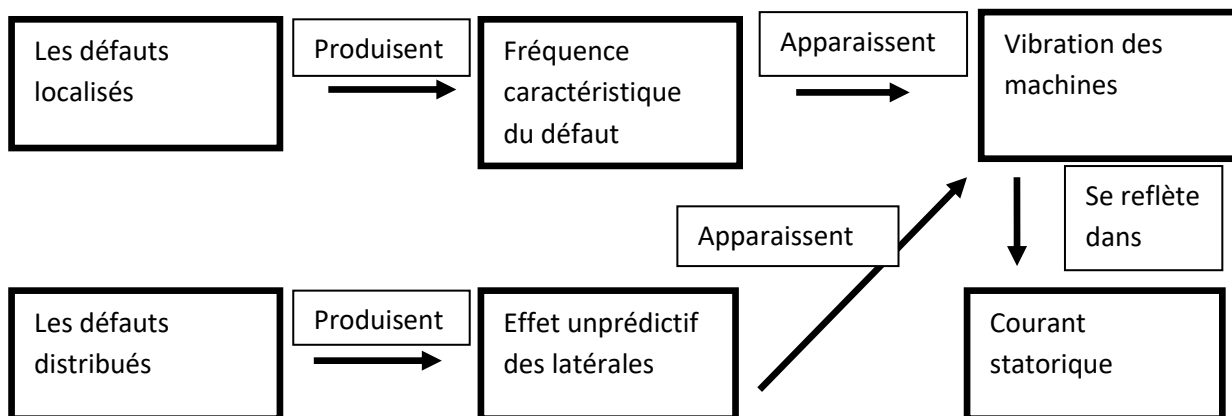


Figure II.23: Schéma synoptique illustrant les effets des deux types de défauts et leurs manifestations. [9-10]

Un défaut localisé est défini comme un défaut dans un seul point, la surface n'est pas endommagée. Ce type de défaut produit une des quatre fréquences caractéristiques de défaut ; dépend de quelle surface défectueuse de roulement ; ce qui existe dans le signal Vibratoire ainsi que dans le signal du courant stator

Un défaut distribué est un type de défaut où la surface est dégradée sur une grande partie, et devient rugueuse, irrégulière, ou déformée invisible par l'œil. Les effets produits par ce type de défaut sont difficiles à prédire puisque qu'il n'y a pas de défaut localisé. Les fréquences

caractéristiques n’existent pas et ce type de défaut n’apparaît pas dans le spectre du courant stator ou vibratoire.

II.5. Caractéristiques du signal engendré par le roulement endommagé

II.5.1. Défaut de la bague interne

Il est caractérisé par la présence d’une raie à la fréquence caractéristique du défaut ($f d_{bi}$). Cette fréquence est modulée par la fréquence de rotation (bandes latérales autour de la raie de défaut).

$$f d_{bi} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 + \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

Avec : f_r : fréquence de rotation α : angle de contact

L’image théorique de ce défaut (charge radial et charge axial) est donnée dans les figures Suivantes :

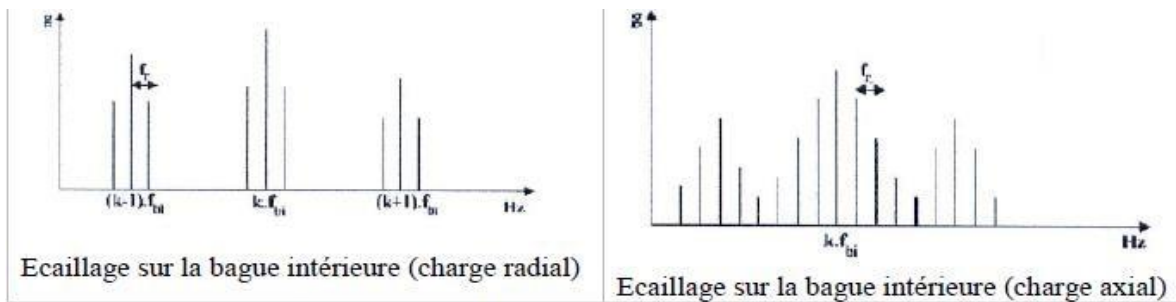


Figure II.24: Ecaillage sur la bague intérieure. [11]

II.5.2. Défaut sur la bague externe

Ce défaut est caractérisé par la présence d’une raie à la fréquence ($f d_{be}$). Bien que la charge appliquée sur la bague externe soit constante, on peut remarquer une modulation d’amplitude à la fréquence de rotation de l’arbre autour de la fréquence de défaut.

$$f d_{be} = \frac{f_r \cdot N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right) \dots\dots\dots(2.6)$$

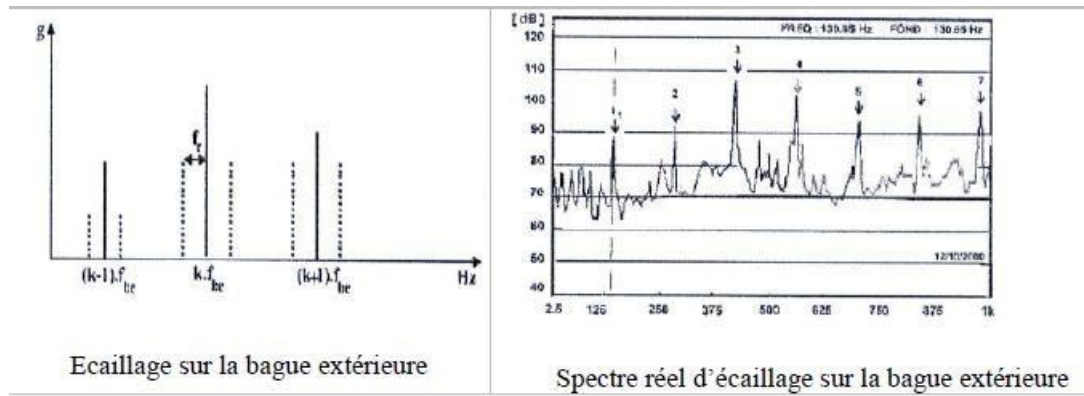


Figure II.25: Ecaillage sur la bague extérieure. [11]

II.5.3. Défaut de l'élément roulant

La première fréquence caractéristique de défaut correspond à la fréquence de rotation de l'élément roulant sur lui-même. De plus, cet élément roulant rencontre une fois la bague interne et une fois la bague externe par tour, il génère donc des chocs à 2 fois cette fréquence.

$$f_{bille} = \frac{f_r \cdot D_m}{2 \cdot D_b} \left(1 - \left(\frac{D_b}{D_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \dots\dots\dots(2.7)$$

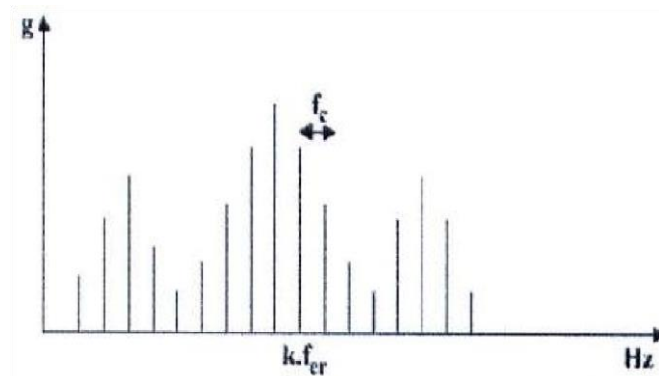


Figure II.26 : Ecaillage sur l'élément roulant. [11]

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté quelques généralités sur les machines tournantes et leurs défauts ainsi les défauts de roulements, leurs conceptions, et leurs caractéristiques.

Les roulements sont des éléments très essentiel dans les machines tournantes, mais sont à l'origine d'une grande part des problèmes industrielle à cause de plusieurs facteurs, les avaries affectant les roulements et les remèdes ont été cité, pour améliorer la fiabilité, des systèmes de méthodes de diagnostic dans le cadre de la maintenance conditionnelle ont été mises en place pour la détection précoce des défauts de roulement, en spécifiant les réseaux de neurones et la méthode SVM.

CHAPITRE III

Réseaux de neurones et classifieurs SVM

III.A. Réseaux de neurones

III.A.1. Introduction

Le rêve de créer une machine dotée d'une forme d'intelligence est présent depuis longtemps dans l'imagination humaine. Alors comment l'homme fait-il pour raisonner, calculer, parler, apprendre, ... ? C'est ces questions-là qui mènent les chercheurs à essayer de comprendre le fonctionnement du cerveau humain et essayer de s'y inspirer pour pouvoir trouver de nouvelles techniques de résolutions de problèmes concernant le fonctionnement du cerveau et des neurones, des mathématiciens ont essayé de modéliser le fonctionnement du cerveau en intégrant ces connaissances en biologie dans des programmes informatiques pour leur donner la possibilité d'apprendre : c'est la naissance des réseaux de neurones. Dans le monde informatique.

L'intelligence artificielle a apparue et ne cesse de progresser, il existe de nombreux programmes capables de diriger un robot, résoudre des problèmes etc. Néanmoins ils ne sont pas capables de rivaliser avec un cerveau humain. Outre la capacité de calcul incroyable des ordinateurs, mais ces derniers n'ont pas la faculté d'apprendre. Ils ne progressent pas si personne ne les modifie. Voilà ce à quoi les chercheurs ont essayé de remédier.

Avec l'avancée dans le domaine de la neurobiologie.

III.A.2. Historique

- 1943 : Les premiers à proposer un modèle sont deux bio-physiciens de Chicago, McCulloch et Pitts, qui inventent le premier neurone formel qui portera leurs noms (neurone de McCulloch-Pitts). [19]
- 1949 : Les travaux de McCulloch et Pitts n'ont pas donné d'indication sur une méthode pour adapter les coefficients synaptiques. Cette question au cœur des réflexions sur l'apprentissage a connu un début de réponse grâce aux travaux du physiologiste américain Donald Hebb qui décrit l'apprentissage dans son ouvrage (*The Organization of Behaviour*). Hebb a proposé une règle simple qui permet de modifier la valeur des coefficients synaptiques en fonction de l'activité des unités qu'ils relient. Cette règle aujourd'hui connue sous le nom de « règle de Hebb ». [19]
- 1958 : Le perceptron de *Frank Rosenblatt* : Il constitue donc le premier système artificiel présentant une faculté jusque-là réservée aux êtres vivants : la capacité d'apprendre par l'expérience. [19]

- 1969 : critique violente du Perceptron par *Minsky* et *Papert*. Ils montrent dans un livre « *Perceptrons* » toutes les limites de ce modèle, et soulèvent particulièrement l'incapacité du Perceptron à résoudre les problèmes non linéaires tels que le célèbre problème du XOR (OU exclusif). Paraissant alors une impasse, la recherche sur les réseaux de neurones perdit une grande partie de ses financements publics, et le secteur industriel s'en détourna aussi. Il s'en suivra alors, face à la déception, une période noire d'une quinzaine d'années dans le domaine des réseaux de neurones artificiels.[19]
- 1982 : John Joseph Hopfield, physicien reconnu, donna un nouveau souffle au neuronal en publiant un article introduisant un nouveau modèle de réseau de neurones (complètement récurrent). Le modèle de Hopfield souffrait néanmoins des principales limitations des modèles des années 1960, notamment l'impossibilité de traiter les problèmes non-linéaires.[19]
- 1986 : Rumelhart introduit le Perceptron Multicouche : une nouvelle génération de réseaux de neurones, capables de traiter avec succès des phénomènes nonlinéaires. Le perceptron multicouche ne possède pas les défauts mis en évidence par Minsky.[19]

III.A.3. Neurone biologique

Le système nerveux compte plus de 1000 milliards de neurones interconnectés. Les neurones ne sont pas tous identiques, ni dans leurs formes ni dans leurs caractéristiques. En effet les neurones n'ont pas tous un comportement similaire en fonction de leur position dans le cerveau. La figure III.1 montre le schéma d'un neurone biologique.

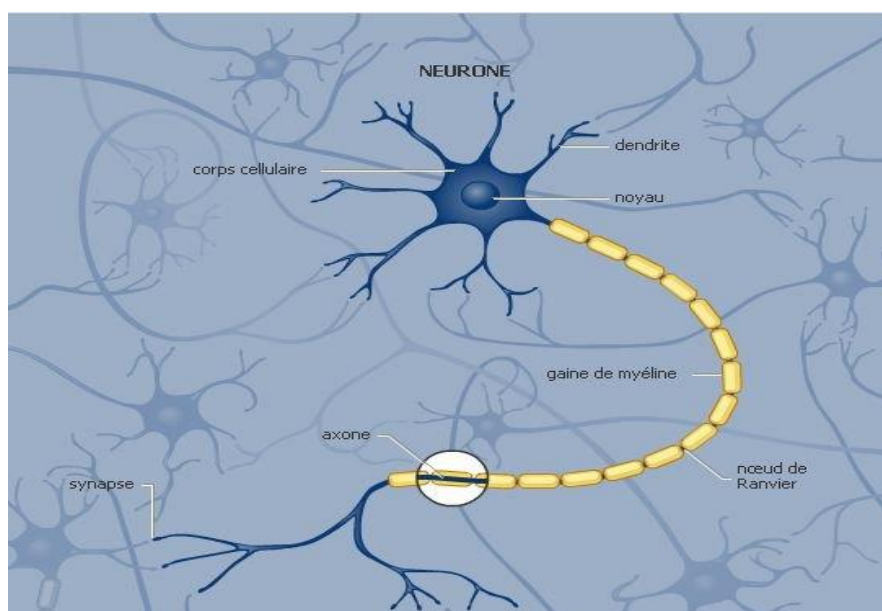


Figure III.1 : neurone biologique.

III.A.4. Principe de fonctionnement

L'information ne se transmet que dans un seul sens : des dendrites vers l'axone. Le neurone va donc recevoir des informations, venant d'autres neurones, grâce à ses dendrites. Il va ensuite y avoir une sommation, au niveau du corps cellulaire, de toutes ces informations et via un signal électrique. Le résultat de l'analyse va transiter le long de l'axone jusqu'aux terminaisons synaptiques. Il va y avoir libération des neurotransmetteurs (médiateurs chimiques) dans la fente synaptique. Le signal électrique ne pouvant pas passer la synapse, les neurotransmetteurs permettent donc le passage des informations, d'un neurone à un autre. Les neurotransmetteurs excitent ou inhibent le neurone suivant et peuvent ainsi générer ou interdire la propagation d'un nouvel influx nerveux. Les synapses possèdent une sorte de « mémoire » qui leur permet d'ajuster leur fonctionnement. En fonction de leur « histoire », c'est-à-dire de leur activation répétée ou non entre deux neurones, les connexions synaptiques vont se modifier : mécanisme d'apprentissage.

III.A.4.1. Qu'est-ce qu'un réseau de neurones ?

Tout d'abord, ce que l'on désigne habituellement par réseau de neurones. Est en fait un réseau de neurones artificiels basé sur un modèle simplifié de neurone. Ce modèle permet certaines fonctions du cerveau, comme la mémorisation associative,

L'apprentissage par l'exemple, le travail en parallèle, mais le neurone artificiel est loin de posséder toutes les capacités du neurone biologique. Les réseaux de neurones biologiques sont ainsi beaucoup plus compliqués que les modèles mathématiques et informatiques.

Il n'y a pas de définition universellement acceptée de « réseau de neurones ». On considère généralement qu'un réseau de neurones est constitué d'un grand ensemble d'unités (ou neurones), ayant chacune une petite mémoire locale. Ces unités sont reliées par des canaux de communication (les connexions, aussi appelées synapses d'après le terme biologique correspondant), qui transportent des données numériques. Les unités peuvent uniquement agir sur leurs données locales et sur les entrées qu'elles reçoivent par leurs connexions.

Certains réseaux de neurones sont des modèles de réseaux biologiques, mais d'autres ne le sont pas. Historiquement l'inspiration pour les réseaux de neurones provient cependant de la volonté de créer des systèmes artificiels sophistiqués, voire intelligents, capables d'effectuer des opérations semblables à celles que le cerveau humain effectue de manière routinière, et d'essayer par-là d'améliorer la compréhension du cerveau.

La plupart des réseaux de neurones ont une certaine capacité d'apprentissage, cela signifie qu'ils apprennent à partir d'exemples. Le réseau peut ensuite dans une certaine mesure être capable de généraliser, c'est-à-dire de produire des résultats corrects sur des nouveaux cas qui ne lui avaient pas été présentés au cours de l'apprentissage.

III.A.5. Neurone formel

Les réseaux de neurone formels ou artificiels sont des réseaux dont l'architecture est inspirée de celle des réseaux de neurones biologiques (naturels), ils sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique. Leur modélisation revient à décrire le modèle du neurone (unité de base) et le modèle des connexions entre les neurones. Le premier neurone formel est apparu en 1943, introduits par

MacCulloch et Pitts (unité à seuil). La figure (III.2) ci-dessous montre un schéma d'un neurone formel.

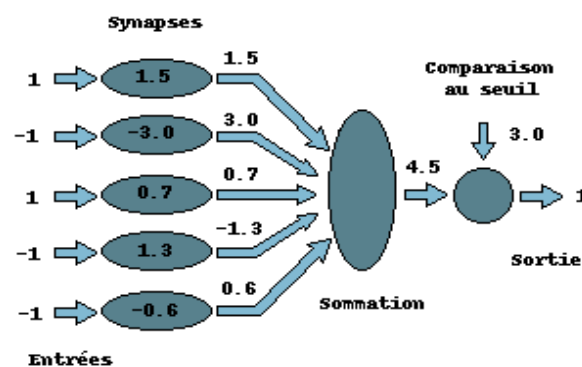


Figure III.2 : neurone formel (artificiel).

Le neurone formel est donc une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même valeur (les connexions entre les neurones étant plus ou moins fortes), les auteurs ont donc créé un algorithme qui pondère la somme de ses entrées par des poids synaptiques (sommation des multiplications des valeurs d'entrées par les coefficients de pondération). De plus sur le schéma, les 1 et les -1 en entrée sont pour différencier entre une synapse excitatrice ou inhibitrice, la sortie est obtenue après la comparaison de la sommation pondérée des entrées avec un seuil (si le résultat est supérieur au seuil, alors la valeur renvoyée est 1, sinon 0), d'où une fonction d'activation se présente (ici c'est une fonction à seuil).

Le choix d'une fonction d'activation se révèle être un élément constitutif important dans des réseaux de neurones. A titre illustratif voici quelques fonctions couramment utilisées comme

fonctions d'activation : le sigmoïde standard (encore appelé fonction logistique), la tangente hyperbolique, la fonction gaussienne, une fonction à seuil.

III.A.5.1 Architecture

Les réseaux de neurones sont souvent classifiés en deux architectures : les réseaux de neurone avec un seul niveau et multi-niveaux. Le nombre de niveaux est calculé sans prendre en considération les unités.

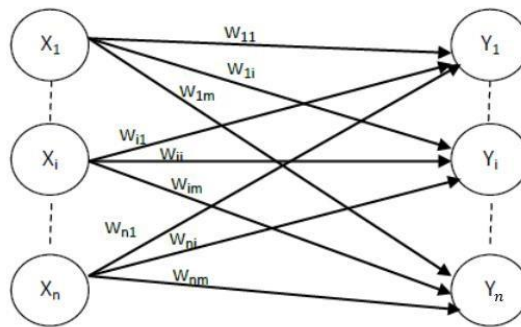


Figure III.3 : Le réseau de neurones à un seul niveau.

Les neurones de la couche d'entrée doivent uniquement passer et distribuer les entrées et ne pas effectuer de calcul. Ainsi, la seule vraie couche de neurones est celle de droite. Chacune des entrées $X_1, X_2 \dots X_n$ est connectée à chaque neurone de la couche de sortie à travers le poids de lien. Comme chaque valeur des sorties $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ est calculée à partir du même ensemble de valeurs d'entrée, chaque sortie est modifiée en fonction des poids de liens.

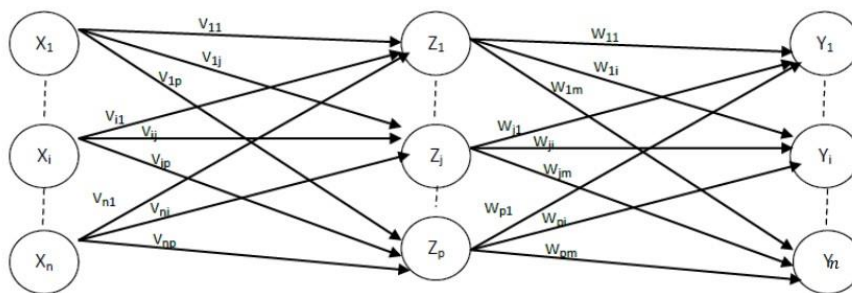


Figure III.4 : Le réseau de neurones multi-niveaux.

La figure III.4 montre le réseau de neurones multi-niveaux ce dernier se distingue du réseau d'un seul niveau en ayant une ou plusieurs couches masquées. Dans cette structure, les nœuds d'entrée transmettent les informations aux unités dans la première couche masquée, puis les sorties de la première couche masquée sont passées à la couche suivante, et ainsi de suite.

Le réseau multi-niveau peut également être considéré comme une cascade de groupes de réseaux d'un seul niveau. Le niveau de complexité se traduit par le nombre de réseaux monocouche qui sont combinés dans ce type de réseau. Le concepteur d'un réseau de neurones devrait considérer combien de couches cachées sont requises, selon la complexité du calcul souhaité.

III.A.5.2 L'apprentissage

La méthode de paramétrage des poids (apprentissage) est une caractéristique importante pour distinguer différents types de réseaux de neurones. Deux modes d'apprentissage existent : l'apprentissage supervisé, et l'apprentissage non supervisé.

III.A.5.3. Apprentissage supervisé et non supervisé

Une caractéristique des réseaux de neurones est leur capacité à apprendre (à reconnaître une lettre, un son...). Mais cette connaissance n'est pas acquise dès le départ. La plupart des réseaux de neurones apprennent par l'exemple en suivant un algorithme d'apprentissage. Il y a deux algorithmes principaux : l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé.

Lors d'un apprentissage supervisé, les classes sont prédéterminées et les exemples connus, le système apprend à classer selon un modèle de classement, c-à-d : on dispose d'un comportement de référence précis que l'on désire faire apprendre au réseau.

L'apprentissage doit mesurer l'écart entre le comportement du réseau et celui de référence et ajuster les poids synaptiques du réseau de façon à réduire cet écart.

Lors d'un apprentissage non supervisé, on ne fournit pas au réseau les sorties que l'on désire obtenir. On le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise.

III.A.5.4. Fonction d'activation

La fonction basique d'un neurone artificiel est d'effectuer une somme de toutes les données d'entrées afin de produire une fonction de sortie. Cette fonction est la fonction d'identité.

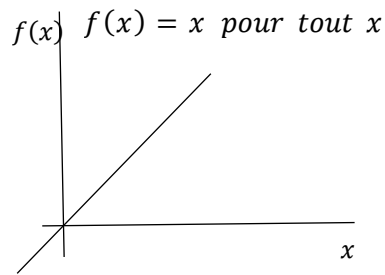


Figure III.5 : Fonction d'identité.

Une autre fonction d'activation est la fonction d'un seuil. La valeur de sortie est 1 lorsque la somme pondérée des valeurs d'entrée est supérieure ou égale à θ , sinon la valeur est 0. [12]

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq \theta \\ 0 & \text{si } x < \theta \end{cases}$$

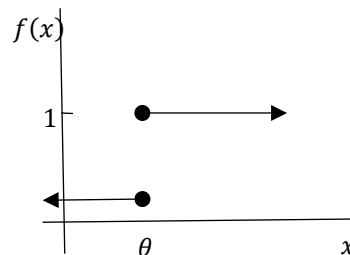


Figure III.6 : Fonction d'un seuil θ .

La fonction sigmoïde de 0 à 1 est souvent utilisée comme fonction d'activation pour les réseaux de neurones dans lesquels les valeurs de sortie désirées sont soit binaires soit dans un intervalle compris entre 0 et 1.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\sigma x)}$$

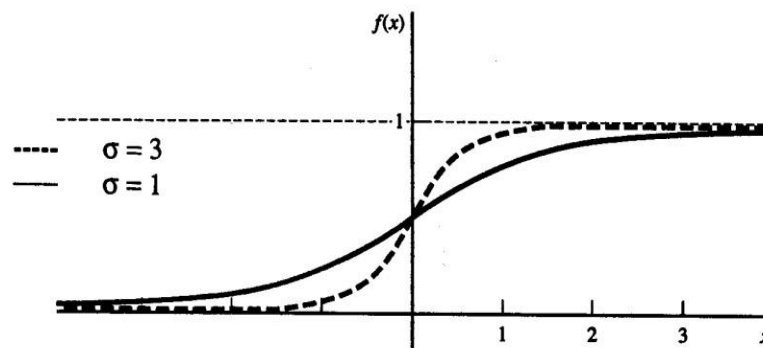


Figure III.7 : Fonction sigmoïde.

III.A.5.5. Utilisation des réseaux de neurones

Se trouvant à l'intersection de différents domaines (informatique, électronique robotique, science cognitive, neurobiologie et même philosophie), l'étude des réseaux de neurones est une voie prometteuse de l'Intelligence Artificielle (IA) en tant que système capable d'apprendre, mettent en œuvre le principe de l'induction, c-à-d l'apprentissage par expérience et grâce à leur capacité de classification et de généralisation, ils servent aujourd'hui à toutes sortes d'applications et dans de nombreux domaines.

III.A.5.6. Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

III.A.5.6.1 Avantages

Les réseaux de neurones représentent des avantages, tels que :

1-Les réseaux de neurones sont souples et génériques. Ils peuvent résoudre différents types de problèmes dont le résultat peut être : une classification, analyse de données ...etc.

2-Ils traitent des problèmes non structurés sur lesquels aucune information n'est disponible à l'avance.

3-Les réseaux neuronaux se comportent bien parce que même dans des domaines très complexes, ils fonctionnent mieux que les arbres de statistique ou de décision.

4-Les réseaux de neurones fonctionnent sur des données incomplètes ou bruitées. Cette lacune d'information peut être complétée par l'ajout d'autres neurones à la couche cachée.

III.A.5.6.2 Inconvénients

Les réseaux de neurones ont aussi des inconvénients, tels que :

1-La lenteur d'apprentissage.

2-La difficulté de choisir des valeurs initiales des poids de connexion ainsi que l'adaptation du pas d'apprentissage.

3-L'apprentissage au détriment de la généralisation.

En cas d'erreur dans les résultats de sorties, l'utilisateur n'a aucune information sur le fonctionnement interne.

III.B. Classifieur SVM (Support Vecteur Machines)

III.B.1. Historique

Les séparateurs à vastes marges reposent sur deux idées clés : la notion de marge maximale et la notion de fonction noyau. Ces deux notions existaient depuis plusieurs années avant qu'elles ne soient mises en commun pour construire les SVM.

L'idée des hyperplans à marge maximale a été explorée dès 1963 par Vladimir Vapnik et A. Lerner, et en 1973 par Richard Duda et Peter Hart dans leur livre *Pattern Classification*. Les fondations théoriques des SVM ont été explorées par Vapnik et ses collègues dans les années 70 avec le développement de la théorie de Vapnik-Chervonenkis, et par Valiant et la théorie de l'apprentissage PAC.[19]

L'idée des fonctions noyaux n'est pas non plus nouvelle : le théorème de Mercer date de 1909, et l'utilité des fonctions noyaux dans le contexte de l'apprentissage artificiel a été montré dès 1964 par Aizermann, Bravermann et Rozenner.

Ce n'est toutefois qu'en 1992 que ces idées seront bien comprises et rassemblées par Boser, Guyon et Vapnik dans un article, qui est l'article fondateur des séparateurs à vaste marge. L'idée des variables ressorts, qui permet de résoudre certaines limitations pratiques importantes, ne sera introduite qu'en 1995. À partir de cette date, qui correspond à la publication du livre de Vapnik, les SVM gagnent en popularité et sont utilisés dans de nombreuses applications.[19]

Un brevet américain sur les SVM est déposé en 1997 par les inventeurs originels.[19]

III.B.2. Présentation de SVM

Les SVMs qui sont aussi appelés : séparateurs à vaste marge (support Vector Machine) présentent une technique de classification dont l'apprentissage est supervisé. Cette technique a été introduite par le russe Vladimir Vapnik en 1995.

Les SVMs reposent sur une théorie mathématique solide. Elles ont été à l'origine utilisées pour la classification binaire et la régression. Aujourd'hui, elles sont utilisées par de nombreux chercheurs et dans différents domaines tels que l'aide au diagnostic médical qui fait l'objet de notre étude, le marketing, la biologie, etc. La raison du succès de cette technique est son adaptation rapide aux BDD à grandes dimensions (big data), son nombre réduit de paramètre à régler, et ses bons résultats en pratique.

La technique SVM, permet de résoudre des problèmes linéairement et non linéairement séparable. Elle repose sur deux notions clés : celle de la maximisation de la marge et celle de la fonction noyau. Dans la section suivante, les principes de fonctionnement général des deux cas (linéairement et non linéairement séparable) vont être présentés.

III.B.3. Principes de fonctionnement général de la technique SVM

Le but de l'approche SVM est de trouver une bonne reconnaissance ainsi qu'une bonne séparation entre différentes classes. Le classifieur linéaire qui effectue une séparation de données entre les classes est appelé hyperplan.

Sur la figure III.8, on détermine un hyperplan séparant deux classes (cercle bleu, et carré rouge).

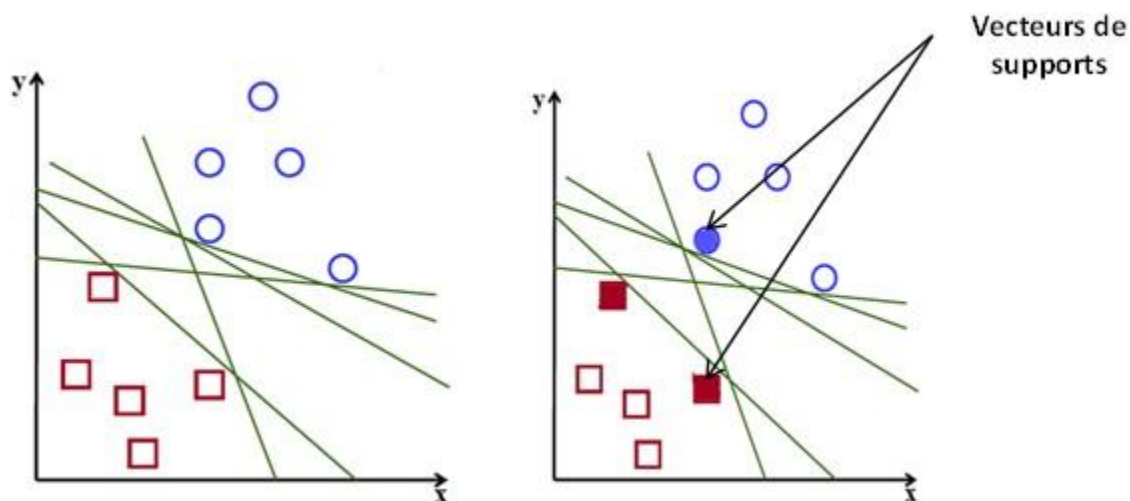


Figure III.8: Différents hyperplans possibles ainsi que les vecteurs de supports.

Les échantillons les plus proches des deux classes sont appelés les vecteurs de support. Ces derniers sont utilisés pour la détermination de l'hyperplan (partie droite de la figure). Comme la montre la figure ci-dessus, il existe une multitude d'hyperplans valides, c'est-à-dire qui assurent une séparation entre les deux classes.

La principale particularité des SVMs est que l'hyperplan choisi doit être optimal. Nous allons donc en plus chercher parmi les hyperplans valides, celui qui passe au milieu des deux classes. Intuitivement, cela revient à chercher l'hyperplan le plus sûr, c'est-à-dire celui qui passe au milieu des deux classes et qui offre le maximum de

précision pour une bonne classification. Formellement, cela revient à chercher un hyperplan dont la distance minimale aux exemples d'apprentissage est maximale. On appelle cette distance « marge » entre l'hyperplan et les exemples. L'hyperplan séparateur optimal est celui qui maximise la marge d'où le nom des séparateurs à vaste marge (Voir figure III.9).

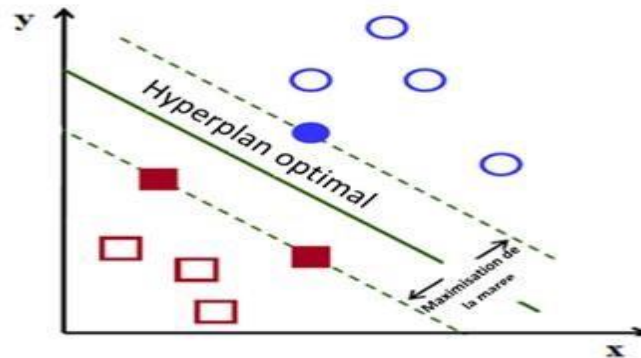


Figure III.9: Maximisation de la marge.

La maximisation de la marge est réalisée dans le but d'obtenir une précision maximale lorsqu'on classe un nouvel exemple (période de test). Dans la figure III.10 la partie gauche nous montre qu'avec un hyperplan optimal, un nouvel exemple (cercle en jaune) reste bien classé, par contre dans la partie droite où il y a une marge plus petite, le nouvel exemple se voit mal classé.

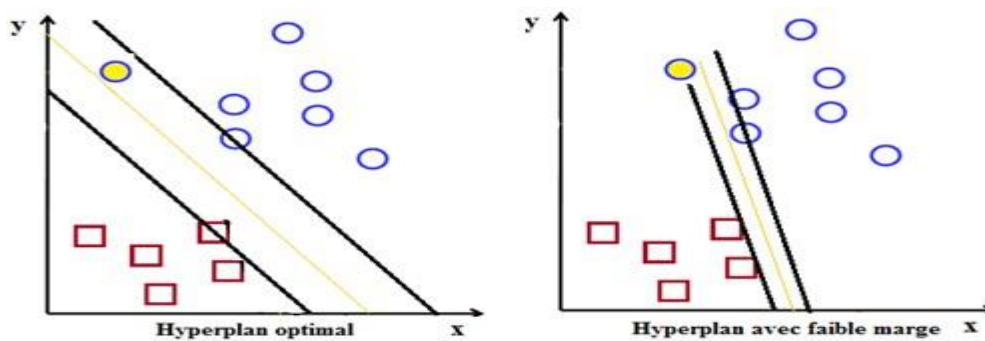


Figure III.10: Choix de l'hyperplan optimal.

III.B.3.1. Séparation linéaire et non linéaire

Il existe deux cas de séparation, les cas linéairement séparables et les cas non linéairement séparables. Le premier cas est le plus simple à réaliser mais dans la majorité des cas pratiques, très peu de problèmes peuvent être séparés d'une manière linéaire. Pour surmonter les inconvénients du deuxième cas, l'idée des SVMs est de

changer l'espace des données (figure III.11). La transformation non-linéaire des données peut permettre une séparation linéaire des exemples dans un nouvel espace. On va donc procéder à un changement de dimension. Cette nouvelle dimension est appelée « espace de redescription ». En effet, plus la dimension de l'espace de redescription est grande, plus la probabilité de pouvoir trouver un hyperplan séparateur entre les exemples est élevée.

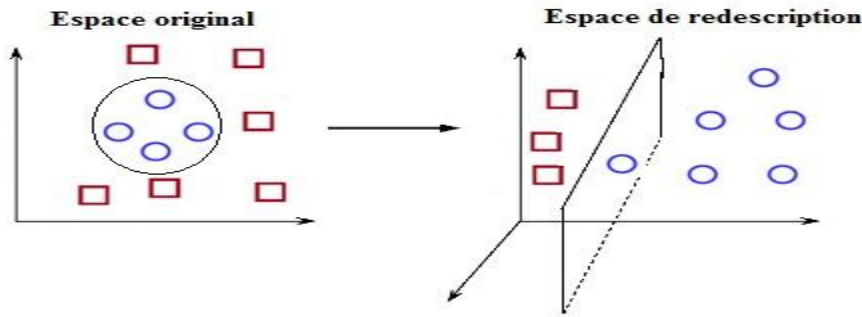


Figure III.11: Transformation d'espace.

Nous avons donc transformé un problème non linéairement séparable dans l'espace de représentation à deux dimensions à un cas linéairement séparable dans un espace de plus grande dimension qui est l'espace de redescription (Featurespace). Cette transformation est réalisée via une fonction noyau (fonction Kernel). En pratique, quelques familles de fonctions noyaux paramétrables sont connues et il revient à l'utilisateur d'effectuer des tests pour déterminer celle qui convient le mieux à son application. Nous pouvons citer les exemples de noyaux suivants : Linéaire, Polynomiale, Gaussien.

-Le noyau linéaire : $K(x_i, x_j) = x_i^T \cdot x_j$ (5)

-Le noyau polynomial : $K(x_i, x_j) = (x_i^T \cdot x_j + 1)^d$ (6)

-Le noyau gaussien : $k(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right)$ (7)

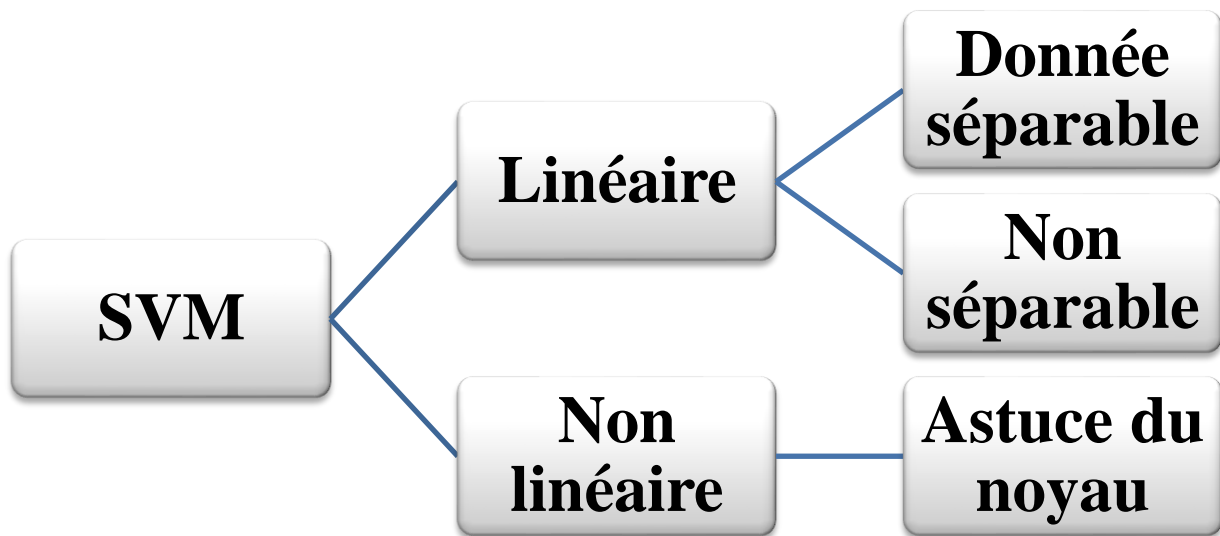


Figure III.12: Les cas de séparation de la méthode SVM.

III.B.4. Domaines d'application de SVM

Grâce à ces avantages, les SVMs ont montré leur efficacité dans plusieurs domaines et applications, surtout dans les problèmes de grande taille grâce à leur solide fondement théorique qui cherche à minimiser la borne supérieure de l'erreur de généralisation permettant de récupérer juste l'information utile à partir des données d'apprentissage. Parmi ces applications, on peut citer :

- Reconnaissance de chiffres manuscrits (Vapnik, 1998, Cortes and Vapnik, 1995, Boser et al., 1992)
- Reconnaissance et classification d'image
- Catégorisation du texte (Dumais et al., 1998, Basu et al., 2003)
- Classification de la couverture des terres (Huang et al., 2002)
- Classification des données audio (Aggarwal and Aggarwal, 2011)
- Applications en chimie (Li et al., 2009, Ivanciuc, 2007),
- Estimation de densité (Mukherjee and Vapnik, 1999)
- Prédiction : séries temporelles financières (Gestel et al., 2001), capacité thermique (Xue et al., 2004)

- Surveillance des variations des procédés (Cheng and Cheng, 2008, Camci et al., 2008)
- Classification des défauts : ex. analyse du transformateur de gaz dissous (Tang and Wu, 2011), où l'algorithme génétique extrait les caractéristiques des défauts et la méthode Bootstrap aide à améliorer le prétraitement par l'égalisation des nombres d'échantillons pour différents types de défauts. Ensuite, un classifieur comme le SVM est utilisé pour le diagnostic de défauts.

(Widodo and Yang, 2007) présente une revue de la littérature utilisant les SVM dans la surveillance et le diagnostic des machines roulements, moteur à induction, HVAC, machine, boîte à vitesse, pompe, vanne, compresseurs. Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'utilisation de SVM pour résoudre le problème de diagnostic de défauts :

- Boîte à vitesse (Saravanan et al., 2010, Saravanan and Ramachandran, 2009, Saravanan et al., 2008, Davy et al., 2006, Samanta, 2004, Samanta et al., 2003)
- Roulement (Sugumaran et al., 2008, Abbasion et al., 2007)
- Turbo compresseur et pompe à rotor (Yuan and Chu, 2007)
- Les machines (Yang and Widodo, 2008)
- Moteur à induction (Baccarini et al., 2011, Pöyhönen et al., 2005)
- Turbine à vapeur (Salahshoor et al., 2010)
- Transmission de puissance (Samantaray et al., 2007, Ravikumar et al., 2008, Ganyunet al., 2005)
- Procédé de traitement des eaux usées (Laouti et al., 2011b, Zeng et al., 2006)

Procédé Tennessee Eastman (Monroy et al., 2010, Zhang, 2009, Yélamos et al., 2007)

- Traitement de minéraux (Jemwa and Aldrich, 2006)
- Moteur à induction (Baccarini et al., 2011)
- Turbine à vapeur (Salahshoor et al., 2010)
- Ligne de transmission de puissance (Samantaray et al., 2007)
- Les systèmes de chauffage, ventilation et de conditionnement (Liang and Du, 2007)

- Système réfrigérateur (Ren et al., 2008)
- Les accidents de la circulation (Chen et al., 2009)

Il existe plusieurs programmes et progiciels qui implémentent les SVMs avec plusieurs langages de programmation comprenant des routines d'optimisation numériques très efficaces. Parmi ces logiciels on trouve :

- **SVM^{light}** : l'implémentation des SVMs la plus connue réalisée par Thorsten Joachims (Joachims, 1999)
- **La boîte à outils SV** : Écrite complètement dans Matlab® par Stéphane Canu et al. (2005), elle est une implémentation facile à manipuler pour les gens familiarisés avec Matlab.
- **LIBSVM** : représente une bibliothèque complète des SVMs présentée par Chang et Lin (Chang and Lin, 2011 (Chang and Lin, 2001) écrite dans le langage C/C++ et Java utilisant la même méthode de décomposition du problème quadratique que celle de l'algorithme SMO. Ce package effectue à la fois les tâches de classification et de régression, et propose plusieurs interfaces pour les autres langages tel que : Python®, Matlab®.

III.B.5. Avantages et inconvénients des SVMs

III.B.5.1. Avantages

Les SVMs ont un nombre d'avantages sur les autres méthodes statistiques ou les réseaux de neurones :

- Capacité de généralisation induite par la théorie statistique d'apprentissage et le concept de minimisation du risque structurel.
- Pas de problème avec une grande dimension des données. Faire face à des situations complexes lorsque le nombre de variables est plus grand que celui d'observations.
- La solution est parcimonieuse, unique et l'optimum est global.
- Peu de paramètres de réglage.

- Implémentation facile, pas de problème d'instabilité numérique et la rapidité de calcul.
- Capacité d'obtenir un résultat précis même dans le cas de taille réduite de l'ensemble d'apprentissage.
- Manipulation des valeurs aberrantes, et du bruit.
- Elimination des données non significatives par la concentration de l'information utile sur les vecteurs supports.
- Robustesse face aux variations des paramètres du système.
- Construction de modèle non linéaire grâce aux fonctions noyaux.

III.B.5.2. Inconvénients

Malgré leurs performances, les SVM représentent aussi des faiblesses, notamment celles-ci :

- Elles utilisent des fonctions mathématiques complexes pour la classification.
- Les machines à support de vecteurs demandent un temps énorme durant les phases de test.
- Classification binaire d'où la nécessité d'utiliser l'approche un-contre-un.
- Grande quantité d'exemples en entrées implique un calcul matriciel important.
- Temps de calcul élevé lors d'une régularisation des paramètres de la fonction noyau.

III. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière simple et complète le concept de réseaux de neurones et le système d'apprentissage introduite par Vladimir Vapnik, les SVM (Support Vector Machine).

Nous avons donné une vision générale et une vision mathématique des SVM. Cette méthode de classification est basée sur la recherche d'un hyperplan qui permet de séparer au mieux des ensemble de données. Nous avons exposé les cas linéairement séparables et les cas non linéairement séparable qui nécessitent l'utilisation de fonction noyau (Kernel) pour changer d'espace.

CHAPITRE IV

**Classification des défauts de
roulement par la méthode SVM
(Simulation et résultats)**

IV.1. Introduction :

Les statistiques concernant les causes de défaillances et la localisation des défauts dans les machines tournantes, permettent de conclure que les organes les plus sensibles sont les engrenages et les roulements. Pour cette raison, nous nous intéressons, plus particulièrement, dans ce travail au diagnostic et classification des défauts de roulements par la méthode SVM sur Matlab.

Dans notre application, nous nous disposons de plusieurs signaux représentant différents états de roulements.

IV.2. Présentation du langage Matlab :

MATLAB (« matrix laboratory ») est un langage de script émulé par un environnement de développement du même nom ; il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran.

Les utilisateurs de MATLAB (environ 4 millions en 20193) sont de milieux très différents tels que l'ingénierie, les sciences et l'économie, dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche.[17]

Le langage MATLAB a été conçu par Cleve Moler à la fin des années 1970 à partir de deux bibliothèques écrites en Fortran : LINPACK et EISPACK4.

Alors professeur de mathématiques à l'université du Nouveau-Mexique, il souhaitait permettre à ses étudiants de pouvoir utiliser ces deux bibliothèques sans connaître le Fortran. Cleve Moler l'utilisa ensuite pour des cours donnés à l'université Stanford où il reçut un accueil mitigé de la part des étudiants en mathématiques, habitués au Fortran.

Par contre, les étudiants en technologie, en particulier en traitement du signal, furent beaucoup plus intéressés. Un ingénieur, Jack Little (en) en comprend rapidement les capacités et entreprend avec un collègue, Steve Bangert, de le recoder en langage C. Jack Little, Cleve Moler et Steve Bangert créèrent la société The MathWorks en 1984 afin de commercialiser la version 1.0 de MATLAB5,6.

MATLAB a ensuite évolué, en intégrant par exemple la bibliothèque LAPACK en 20007, en se dotant de nombreuses boîtes à outils (Toolbox) et en incluant les possibilités données par d'autres langages de programmation comme C++ ou Java.[17]

IV.3. Base des données

Les données vibratoires utilisées dans cette partie, proviennent du banc d'essai de roulements de l'université : " *The Case Western Reserve University - Bearing Data Center. Cleveland, Ohio. USA.* " (Loparo, 2013). Le banc d'essai (figure IV.1) se compose principalement d'un moteur (à gauche), d'un accouplement (centre), d'un dynamomètre (droit) et des circuits de commande (non montrés). Cette base de données a été utilisée dans plusieurs études pour valider l'efficacité des nouveaux algorithmes de diagnostic des défauts de roulements. (Gryllias & Antoniadis, 2012; Ziani et al., 2012 ; Zhang et al., 2013a; Shen et al., 2013).

IV.4. Description des signaux étudiés :

Les données de vibration que nous avons utilisées dans notre application ont été extraites du site 'bearing data center', ce site web '<http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/cwruflash.htm>' nous a permis d'accéder à la base de données des essais de roulements à billes de machines tournantes en fonctionnement normal ou défectueux.

La figure ci-dessous représente le banc d'essai qui se compose principalement d'un moteur (à gauche) d'un accouplement (centre), d'un dynamomètre (droite) et des circuits de commande.[18]

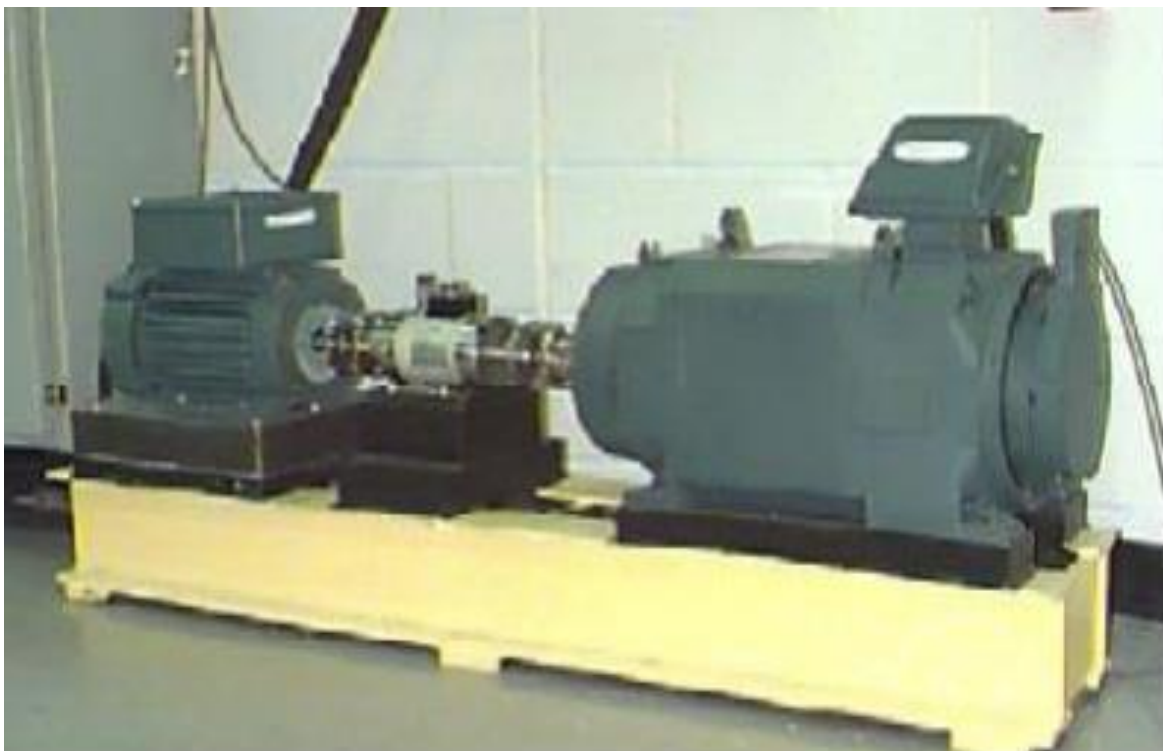


Figure IV.1 : Banc d'essai de roulements [18]

Des petits défauts sous forme de points de diamètre allant de **0.007 à 0.040** Pouces (**1Pouce=25.4mm**), ont été créés sur les roulements du moteur en utilisant l'usinage par électroérosion. Ces défauts ont été créés séparément sur la bague extérieure, la bague intérieure, ainsi que l'élément roulant (bille). Ensuite, les roulements défectueux ont été remontés sur le moteur, et les signaux vibratoires ont été enregistrés sur une gamme de **4** couples résistants (**0, 1, 2, et 3HP**) soit quatre vitesses de rotation différentes (**1797, 1772, 1750,1730 rpm**). Les signaux sont enregistrés à l'aide des accéléromètres, qui ont été fixés à la cage du moteur par aimant avec une fréquence d'échantillonnage $f_e = 12 \text{ kHz}$ et un nombre total de points **NT= 243938 pts**.

La phase la plus importante dans l'étude de ce système est le choix des variables ou bien des paramètres d'entrée qui correspondent, en général, à l'information délivrée par un capteur mesurant une grandeur physique (vibration dans notre cas).

Dans notre cas ils ont choisi de calculer la densité spectrale de puissance pour chaque signal pour extraire les trois indicateurs fréquentiels suivant : l'amplitude, la fréquence du pic central et la bande passante du signal caractérisant les différents états de la machine (fonctionnement normal ou défaut).

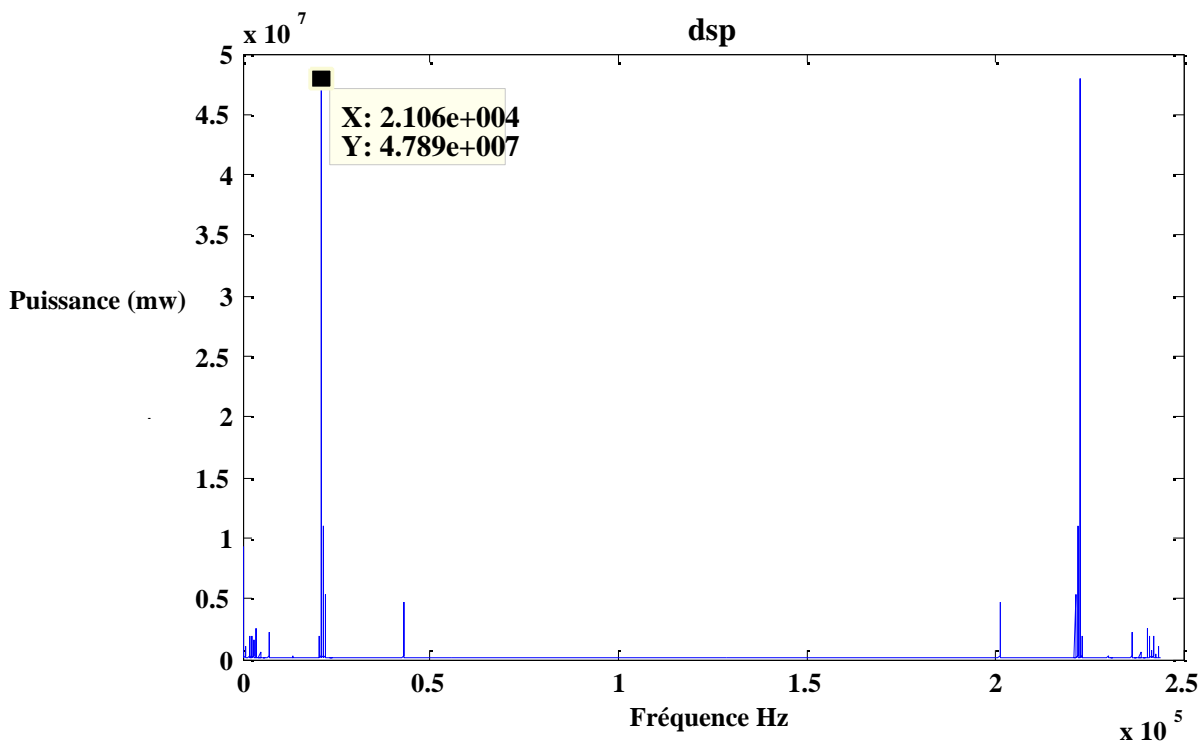


Figure IV.2 : Densité spectrale de puissance

La figure (IV.2) ci-dessus représente la densité spectrale de puissance calculée dans le cas du signal prélevé d'un roulement sain roulant à une vitesse de **1797 tr/min**.

A partir de cette allure nous pouvons déduire, à chaque fois, la fréquence du pic principal, la bande de fréquence de ce signal et l'amplitude (donc la puissance) maximale correspondant au pic central.

IV.4.1. Signaux prélevés d'un roulement en fonctionnement normal :

On dispose de quatre signaux prélevés d'un roulement sain (sans défaut), ces signaux sont enregistrés sur une gamme de vitesses différentes du moteur comme le montre le tableau suivant :

Les vitesses (tr /min)	Normale
1797	Normal (0)
1772	Normal (1)
1750	Normal (2)
1730	Normal (3)

Remarque : L'indice (0) correspond à la vitesse **1797 tr/min**.

IV.4.2. Signaux prélevés des roulements défectueux :

Les roulements comptent parmi les parties les plus actives dans une machine tournante et sont soumis à différentes contraintes lors de fonctionnement. Ils sont composés d'éléments pouvant être fragilisés tels que la bague intérieure et la bague extérieure, qui sont soumises à des fissures, des déchirures...etc. Pour contrôler ce phénomène, des défauts sous forme de points ont été créés sur les roulements d'essais, en utilisant l'usinage électro décharge.

Dans ce travail nous nous intéressons à la classification des défauts créés sur la bague intérieure et sur les billes avec des diamètres différents (**0.007, 0.014, 0.021** et **0.028** pouces) enregistrés sur différentes gammes de vitesse (**1797, 1772, 1750** et **1730 tr/min**).[18]

En résumé, **36** signaux échantillonnés répartis comme suit :

- * **4** signaux normaux.
- * **16** signaux avec défaut sur les billes.
- * **16** signaux avec défaut sur la bague intérieure.

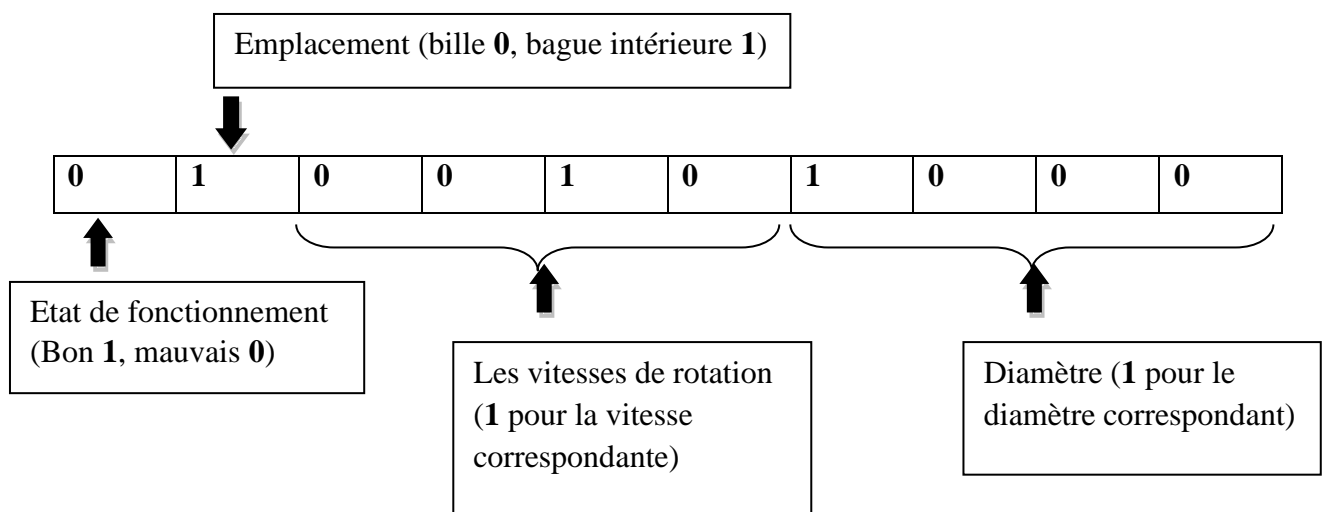
A chaque état de fonctionnement nous avons attribué une classe en tenant compte de :

- l'état de fonctionnement (bon ou mauvais).
- l'emplacement du défaut du roulement (bague intérieure, ou billes).
- le diamètre du défaut.
- les vitesses sur lesquelles les mesures ont été prises.

D'une façon plus claire nous avons associé à chaque classe un code à la sortie sous forme d'un vecteur.

Nous avons utilisé dix (10) neurones dans la couche de sortie afin de pouvoir coder les 36 signaux.

Ainsi, le codage des signaux de sorties est le suivant :



Le tableau suivant représente les sorties désirées en absence des défauts :

Signaux normaux	1797 tr/min	1 0	0 0 0 1	0 0 0 0
	1772 tr/min	1 0	0 0 1 0	0 0 0 0
	1750 tr/min	1 0	0 1 0 0	0 0 0 0
	1730 tr/min	1 0	1 0 0 0	0 0 0 0

Ce tableau résume toutes les sorties désirées que nous pouvons obtenir, dans le cas de la présence d'un défaut, en précisant son diamètre et la vitesse de rotation.

Diamètre de défaut (Pouces)	Vitesse du moteur (tr/min)	Sorties désirées	
		Bague intérieure	Bille
0,007	1797	01 0001 0001	00 0001 0001
	1772	01 0010 0001	00 0010 0001
	1750	01 0100 0001	00 0100 0001
	1730	01 1000 0001	00 1000 0001
0,014	1797	01 0001 0010	00 0001 0010
	1772	01 0010 0010	00 0010 0010
	1750	01 0100 0010	00 0100 0010
	1730	01 1000 0010	00 1000 0010
0.021	1797	01 0001 0100	00 0001 0100
	1772	01 0010 0100	00 0010 0100
	1750	01 0100 0100	00 0100 0100
	1730	01 1000 0100	00 1000 0100
0.028	1797	01 0001 1000	00 0001 1000
	1772	01 0010 1000	00 0010 1000
	1750	01 0100 1000	00 0100 1000
	1730	01 1000 1000	00 1000 1000

IV.5. Lancement de la classification avec la méthode SVM sur Matlab

IV.5.1. Présentation des sorties désirées

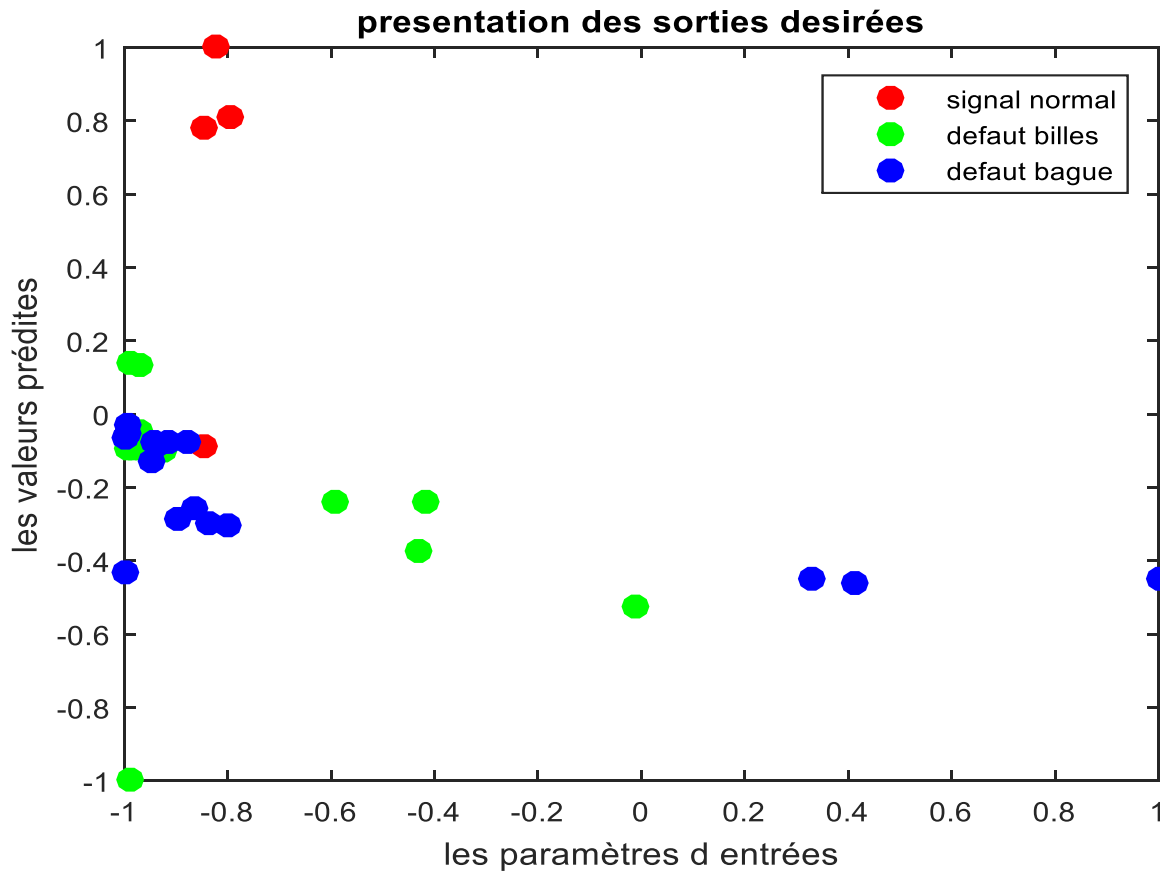


Figure IV.3 : Présentation des sorties désirées.

IV.5.2. Classification des défauts avec le noyau gaussien, polynomial et linéaire

Les figures suivantes représentent les visualisations de classification sur les données avec 3 fonctions noyaux SVM :

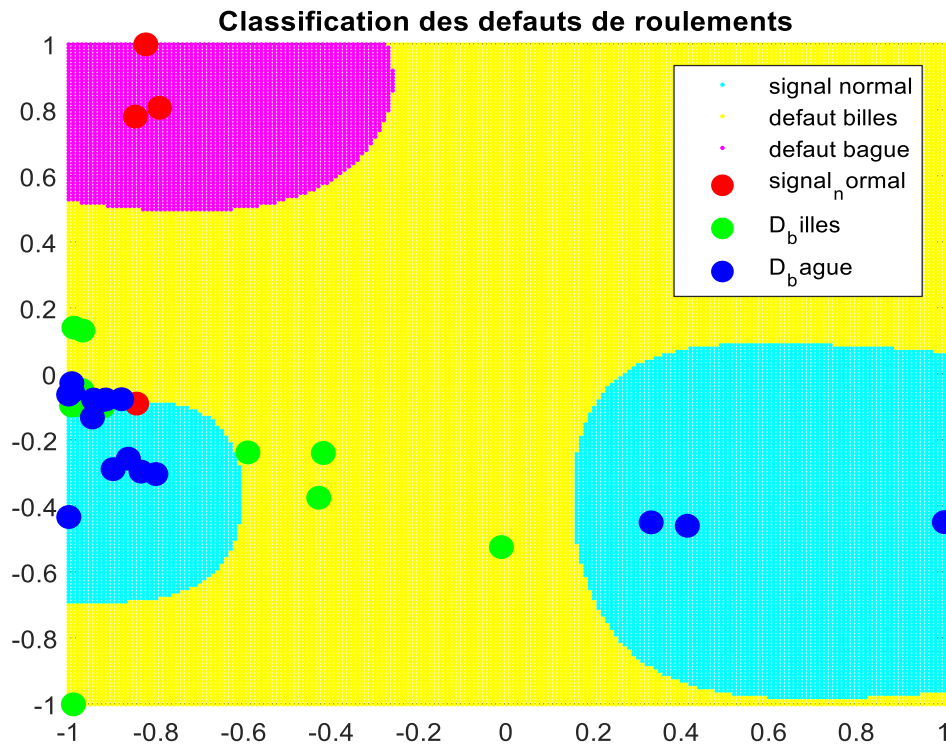


Figure IV.4 : le noyau gaussien.

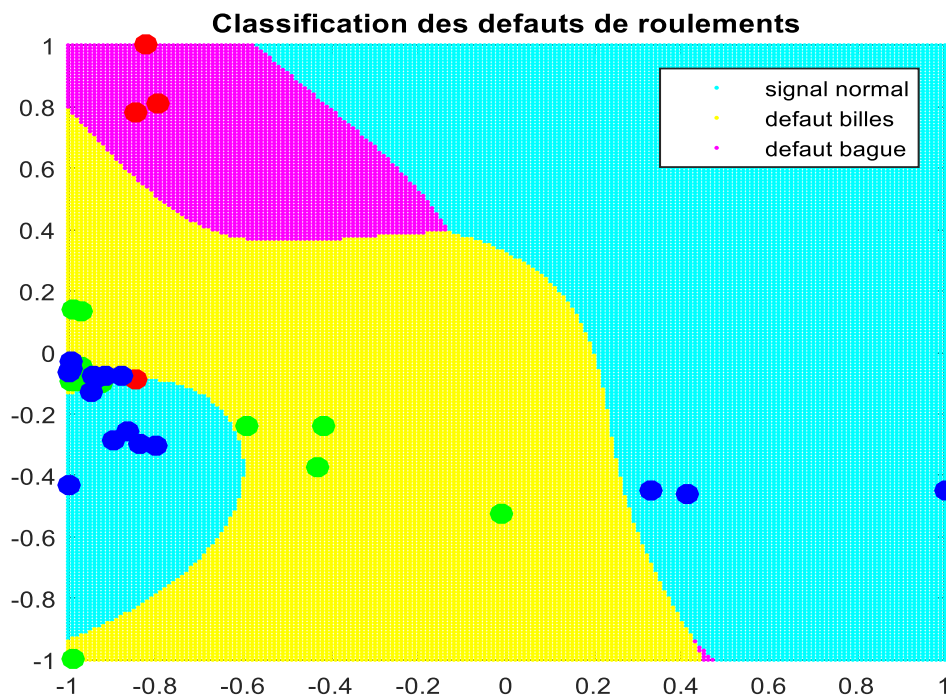


Figure IV.5 : le noyau polynomial.

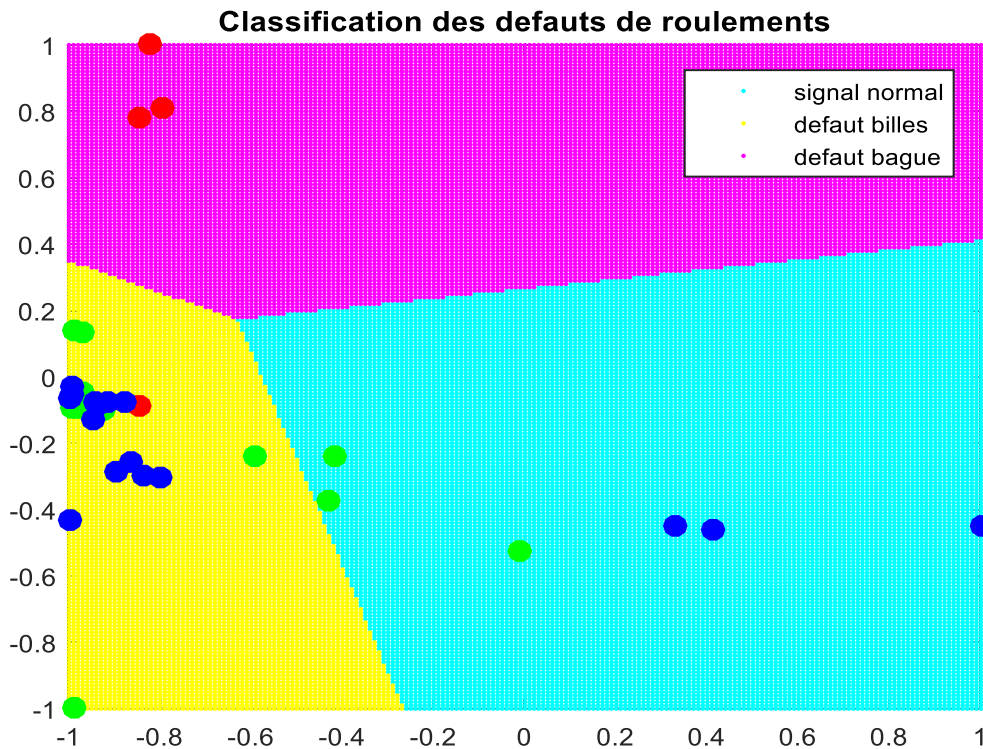


Figure IV.6 : le noyau linéaire.

D'après les résultats obtenus dans les représentations graphiques des figures (IV4, IV5, et IV6) les noyaux gaussien (RBF), polynomial et linéaire sont simplement différents en cas de pris de la frontière de décision hyperplan entre les 3 classes, les noyaux linéaire et polynomial offrent moins de précision que le noyau gaussien.

L'objectif de l'algorithme SVM est de trouver un hyperplan qui, du mieux possible, sépare les points de données de défauts de bille (**vert**) de ceux de défauts de bague (**bleu**) et ceux sans aucun défaut (**rouge**). Le meilleur cas est un hyperplan représentant la plus grande marge entre les 3 classes, indiquées par des points rouge, vert et bleu dans les figures (IV4, IV5 et IV6), l'algorithme ne peut pas trouver hyperplan qui sépare complètement les 3 classes car sont pas linéairement séparable alors il maximise la marge souple autorisant ainsi un petit nombre d'erreurs de classification.

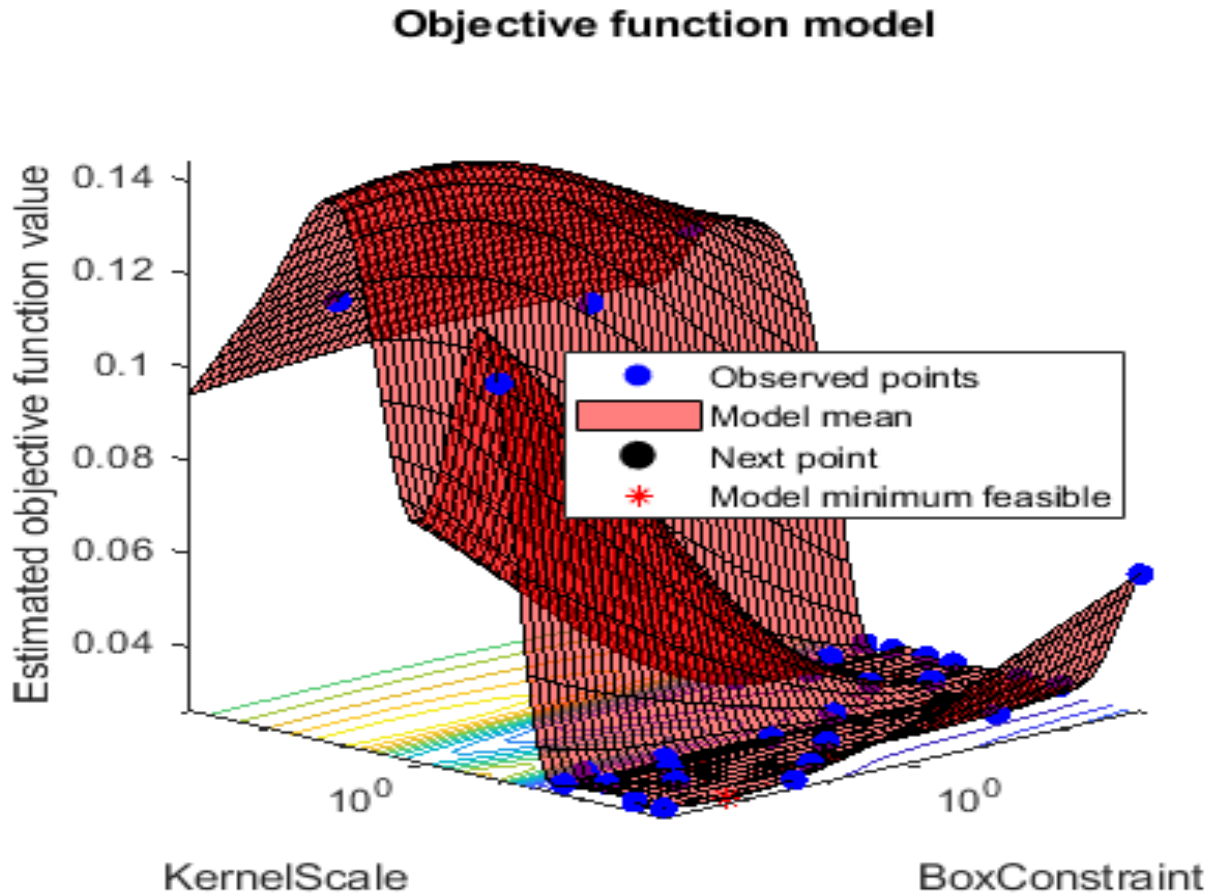


Figure IV.7 : Modèle de fonction objectif

Les paramètres SVM optimaux sont :

Le paramètre (C) est défini par l'utilisateur. Il peut être interprété comme une tolérance au bruit du classifieur : pour de grande valeur de (C), seules de très faible valeur de (σ) sont autorisées, et par conséquent, le nombre de points mal classés sera très faible (données faiblement bruitées).

Si (C) est petit (σ) peut devenir très grand, et on autorise alors bien plus d'erreurs de classification (données fortement bruitées).

$C = 231.52$ (contrainte de boîte _ BoxConstraint).

$\sigma = 1.8791$ (échelle du noyau_ KernelScale).

La fonction objective :

La fonction objective est un moyen de maximiser (ou de minimiser) une valeur numérique. Dans le monde réel, il peut s'agir du coût d'un projet, d'une quantité de production, d'une valeur de profit ou même de matériaux économisés grâce à un processus rationalisé. Avec la fonction objective, vous essayez d'arriver à une cible de production, de profit, d'utilisation des ressources

Nous avons utilisé la fonction de base radiale (RBF) comme fonction noyau du SVM, car elle surpasse les autres fonctions noyau. Les hyper paramètres du SVM sont la contrainte de boîte C et l'échelle du noyau σ . Les hyper paramètres optimaux doivent être déterminés avant de former le modèle pour obtenir les meilleures performances. La recherche des valeurs optimisées des hyper paramètres a été menée à l'aide de l'optimisation bayésienne, qui a été appliquée aux données enregistrées. Cela a fourni les valeurs optimales des hyper paramètres comme $C = 231.52$ et $\sigma = 1.8791$, qui sont illustrées dans la (Figure IV.7).

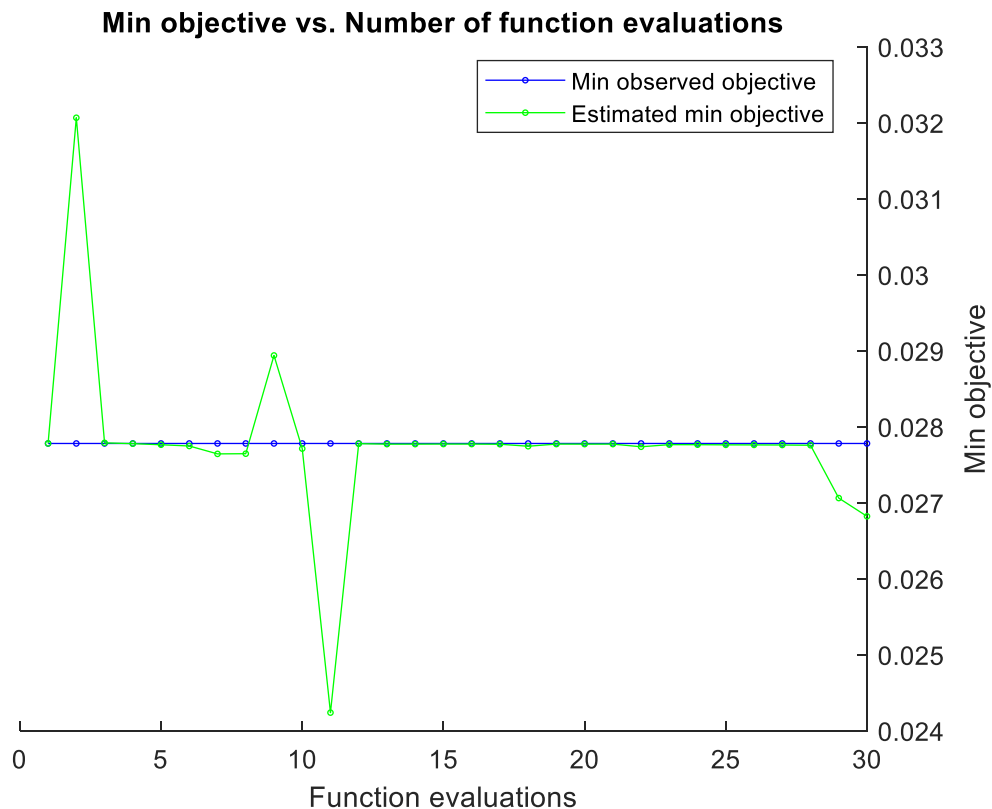


Figure IV.8 : Objectif min vs nombre d'évaluation de la fonction

La (**Figure IV.8**) représente le tracé de l'erreur avec le nombre d'itérations pour la classification des types de défauts. L'optimisation des hyperparamètres a donné une classification un contre tous avec une valeur de fonction objectif de **0.0278** à la 30ème itération.

On peut observer que lors de la formation des meilleurs modèles dans chaque niveau de classification, la version optimisée de l'algorithme d'apprentissage automatique récupère la précision maximale. Ces hyperparamètres peuvent être des fonctions de pondération, des fonctions de noyau, des fonctions de distance, le nombre de plus proches voisins, etc. selon le type d'algorithme utilisé. Le processus itératif essaie une combinaison différente de valeurs d'hyperparamètres et génère une valeur de modèle de fonction objectif qui converge à la fin de l'itération. L'erreur minimale de classification de validation doit être réduite à la fin du processus itératif et l'ensemble d'hyperparamètres qui conduit à l'erreur la plus faible est choisi comme paramètres optimisés. Le modèle optimisable ne donne pas toujours une plus grande précision que les modèles standards, mais le nombre d'itérations peut être augmenté pour obtenir de meilleurs résultats.

IV.5.3. Comparaison entre trois noyaux et interprétation des résultats

Gaussien	Polynomial
Total function evaluations: 30 Total elapsed time: <u>67.4137</u> seconds. Total objective function evaluation time: <u>21.755</u>	Total function evaluations: 30 Total elapsed time: <u>53.5756</u> seconds. Total objective function evaluation time: <u>16.3824</u>
Best observed feasible point: BoxConstraint KernelScale <hr/> 0.003619 0.03493	Best observed feasible point: BoxConstraint KernelScale <hr/> 0.003619 0.03493
Observed objective function value = 0.027778 Estimated objective function value = 0.026819 Function evaluation time = <u>1.2701</u>	Observed objective function value = 0.027778 Estimated objective function value = 0.026819 Function evaluation time = <u>0.86862</u>
Best estimated feasible point (according to models): BoxConstraint KernelScale <hr/> 231.52 1.8791	Best estimated feasible point (according to models): BoxConstraint KernelScale <hr/> 231.52 1.8791
Estimated objective function value = 0.026819 Estimated function evaluation time = <u>0.089734</u>	Estimated objective function value = 0.026819 Estimated function evaluation time = <u>0.072212</u>
error = 0.0278	error = 0.0278

Linéaire	
Total function evaluations: 30	
Total elapsed time: <u>52.9929</u> seconds.	
Total objective function evaluation time: <u>16.6121</u>	
Best observed feasible point:	
BoxConstraint	KernelScale
<u>0.003619</u>	<u>0.03493</u>
Observed objective function value = 0.027778	
Estimated objective function value = 0.026819	
Function evaluation time = <u>0.87426</u>	
Best estimated feasible point (according to models):	
BoxConstraint	KernelScale
<u>231.52</u>	<u>1.8791</u>
Estimated objective function value = 0.026819	
Estimated function evaluation time = <u>0.082069</u>	
error = 0.0278	

Les fonctions du noyau sont utilisées pour mapper l'ensemble de données d'origine (linéaire/non linéaire) dans un espace de dimension supérieure en vue d'en faire un ensemble de données linéaire.

Et d'après les résultats obtenus de la simulation et les représentations graphiques des figures (IV4, IV5, et IV6) les noyaux gaussien (RBF), polynomial et linéaire sont simplement différents en cas de pris de la frontière de décision hyperplan entre les 3 classes, les noyaux linéaire et polynomial prennent moins de temps (**52.9929 s /53.5756 s**) que le noyau gaussien (**67.4137 s**) mais offrent moins de précision.

L'objectif de l'algorithme SVM est de trouver un hyperplan qui, du mieux possible, sépare les points de données de défauts de bille de ceux de défauts de bague et ceux sans aucun défaut. Le meilleur cas est un hyperplan représentant la plus grande marge entre les 3 classes, indiquées par des points rouge, vert et bleu dans les figures (IV4, IV5 et IV6), l'algorithme ne peut pas trouver hyperplan qui sépare complètement les 3 classes car sont pas linéairement séparable alors il maximise la marge souple autorisant ainsi un petit nombre d'erreurs de classification (erreur = **0.0278**).

IV.5. Conclusion

Nous venons d'afficher les résultats de classification des défauts de roulement avec trois types de noyaux, en expliquant la différence entre les trois affichages, et d'après les résultats obtenus la différence est simplement en cas de pris de la frontière de décision hyperplan entre les classes, les noyaux linéaire et polynomial prennent moins de temps que le noyau gaussien mais offrent moins de précision. Alors pour bien classifier nos données les résultats nous a permis de conclure que le noyau gaussien (RBF) est le mieux adapté au SVMs.

Les résultats obtenus sont assez satisfaisants mais peuvent bien sûr être améliorés, à travers ces trois volets à savoir l'extraction des caractéristiques et le modèle de classifieur obtenu.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié la détection des défauts de roulements et de leur classification par la méthode SVM. Cette étude a pour objectif d'améliorer les performances des machines tournantes en assurant leur fonctionnement normal le plus longtemps possible. Pour aborder l'étude nous avons présenté, dans le premier chapitre des généralités sur la maintenance et le diagnostic industriels.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les classes des défauts des machines tournantes ainsi les défauts des roulements les plus fréquemment rencontrés dans les machines tournantes, et l'exposition des principaux défauts fréquemment rencontrés.

Le troisième chapitre est consacré aux réseaux de neurones et la présentation de la méthode SVM, ainsi il est basé sur leur principe d'apprentissage. Nous avons constaté que pour l'obtention d'une surveillance efficace, il nous faut un modèle neuronal permettant de représenter plusieurs situations de bon et de mauvais fonctionnement, Dans cette phase, nous avons opté pour les SVMs afin de classer les données en différentes classes correspondantes aux différents modes de fonctionnements connus. La deuxième partie du chapitre a été consacré aux bases théoriques et principe de classification par cette méthode. Le choix des SVM est justifié par le domaine d'application où il est, généralement, difficile d'obtenir un ensemble suffisant de données vibratoires, qui peuvent couvrir tous les modes de fonctionnement du système à surveillé. Les SVMs est l'une des méthodes de classification supervisée qui a une bonne capacité de généralisation même avec un nombre d'échantillons d'apprentissage réduit.

Le dernier chapitre est consacré aux résultats de simulation de la svm pour la classification des défauts de roulements des machines tournantes sur Matlab, l'utilisation de différents noyaux (Kernel), nous a permis de conclure que le noyau gaussien (RBF), et le mieux adapté au SVMs. En effet, Les meilleurs résultats ont été obtenus avec ce noyau dans les différents cas utilisé.

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire pourraient donner lieu à des études supplémentaires sur plusieurs points :

- Tester l'efficacité des autres méthodes de traitement de signal pour le diagnostic de défauts et leur classification, tel que l'EMD (Empirical Mode Decomposition), l'analyse cyclostationnaire ..., etc.
- De nombreux problèmes n'ont pas encore été résolus et restent des sujets de recherche d'actualité. On peut citer les problèmes posés par le mélange des vibrations de plusieurs organes, le pronostic, et la surveillance en régime variable. Ce dernier problème est crucial pour ce qui concerne la surveillance des éléments tournants sur les éoliennes, dans les véhicules automobiles (boîte de vitesse, moteur), en aéronautique (turboréacteur)... etc.

Annexe

Annexe 1 :

Inputs

P1= [2.106e+004 4.789e+007 4.274e+004] ;
P2= [4.298e+004 4.699e+007 8.352e+004] ;
P3= [0.3639e+004 6.398e+007 8.477e+004] ;
P4= [8.507e+004 5.439e+007 9.378e+004] ;
P5= [0.0001e+004 2.388e+007 4.228e+004] ;
P6= [3.519e+004 2.051e+006 4.248e+004] ;
P7= [3.477e+004 9.398e+006 4.253e+004] ;
P8= [1.401e+004 5.253e+006 4.253e+004] ;
P9= [1.459e+004 4.912e+006 4.339e+004] ;
P10= [0.3665e+004 8.693e+006 4.277e+004] ;
P11= [0.0036e+004 3.332e+006 4.339e+004] ;
P12= [0.3664e+004 4.54e+006 4.277e+004] ;
P13= [3.261e+004 9.175e+006 4.469e+004] ;
P14= [3.433e+004 2.612e+006 4.44e+004] ;
P15= [1.43e+004 3.7e+006 5.353e+004] ;
P16= [1.412e+004 9.917e+006 5.311e+004] ;
P17= [2.842e+004 1.263e+008 3.5805e+004] ;
P18= [2.833e+004 1.795e+008 3.5717e+004] ;
P19= [2.916e+004 3.05e+008 2.235e+004] ;
P20= [2.874e+004 1.763e+008 2.936e+004] ;
P21= [2.645e+004 2.13e+007 4.308e+004] ;
P22= [3.598e+004 2.607e+007 4.332e+004] ;
P23= [2.913e+004 3.73e+007 4.336e+004] ;

Annexe 2

L'électroérosion

L'usinage par électroérosion ou par étincelage, encore appelé EDM (Electric Discharge Machining), est un procédé d'usinage par enlèvement de matière.

L'avantage de cette technique réside dans le fait qu'elle permet un usinage d'une grande précision quel que soit la dureté du métal à usiner.

Ainsi, les machines d'électroérosion sont particulièrement adaptées à l'usinage de précision ou à la réalisation des empreintes des moules pour l'injection.

On retrouve ces machines dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'horlogerie, l'automobile, l'optique etc...



1) Principe de l'électroérosion

L'usinage par électroérosion est l'enlèvement de matière généré par une décharge électrique entre l'électrode pièce (la pièce doit donc être conductrice) et l'électrode outil.

Les 2 électrodes sont immergées dans un liquide isolant appelé le diélectrique :

- de l'eau dé-ionisée pour les machines de découpage EDM à fil.
- Du pétrole ou de l'huile pour les machines EDM d'enfonçage.

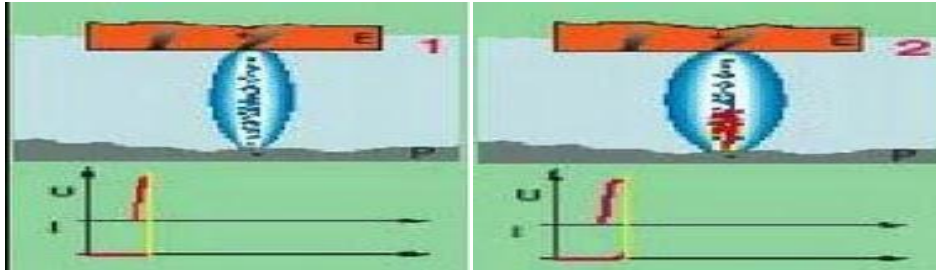
L'espace entre l'électrode et la pièce est appelé le GAP. La tension de claquage et l'efficacité de l'usinage vont dépendre de plusieurs facteurs :

- La distance pièce/électrode (le Gap).
- Pouvoir isolant du diélectrique.
- L'état de pollution du Gap.

2) Déroulements du processus d'usinage par étincelage :

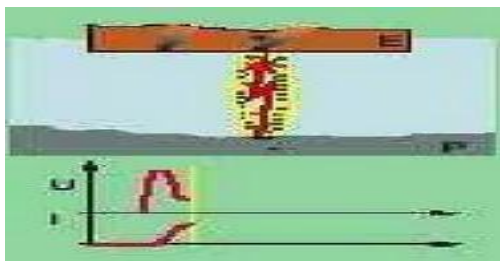
-1ère phase :

Du fait de la concentration des charges électriques (1-2), il y a une augmentation du champ électrique dans le GAP, et les ions et électrons sont donc fortement accélérés.



-2ème phase :

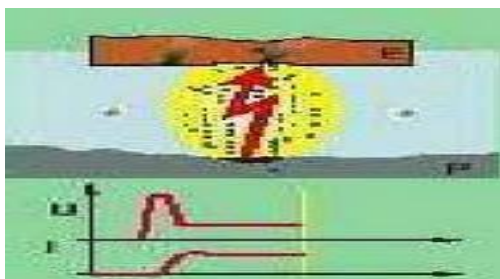
Les ions et électrons sous l'effet de l'accélération se concentrent et finissent par former un canal ionisé permettant la circulation du courant (3).



L'intensité du courant augmente alors très rapidement et il en résulte une augmentation importante de la pression et de la température.

- 3ème phase :

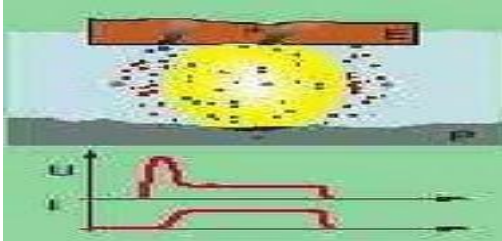
Une zone de plasma se forme, atteignant une température de 7000 à 8 000 degrés (4) et une pression d'environ 40 bars.



Le plasma provoque la fusion locale d'une certaine quantité de matière à la surface des électrodes, formant ainsi un petit cratère.

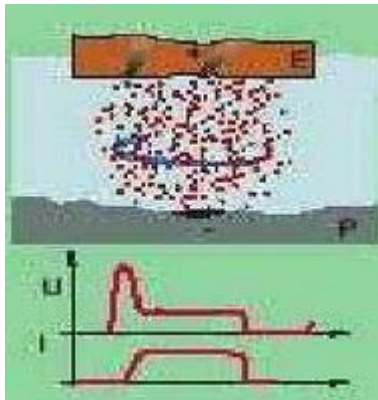
- **4ème phase :**

Lorsque le courant est ensuite interrompu, la chute brutale de la température entraîne l'implosion de la bulle de plasma (5) et la matière fondue est projetée.



- **5ème phase :**

La matière érodée se solidifie dans le diélectrique sous forme de petites billes (6).



3) Machines EDM fil et EDM enfonçage :

Il y a 2 types de machine d'usinage par électroérosion :

- **L'électroérosion par enfonçage :** dans laquelle une électrode de forme complémentaire à la forme à usiner s'enfonce dans la pièce.
- **L'électroérosion par fil :** où un fil conducteur animé d'un mouvement plan et angulaire découpe une pièce suivant une surface réglée.

Les caractéristiques communes aux machines EDM sont les suivantes :

- Usinage de matériaux conducteurs.
- Possibilité d'usinage de matériaux très durs – pas de limite de dureté.
- Pas d'effort mécanique à l'enlèvement de matière.
- Relativement lent.

Bibliographie

- [1] ALAIN BOULENGER « Maintenance Conditionnelle ». Edition Dunod, Paris, 2008.
- [2] J .M.MARTINEZ et DREYTUS.G « Réseaux de neurones : Méthodologie et applications ». Edition Eyrolles, 2000.
- [3] GILLES ZWINGELSTEIN « Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels ». Edition :Hermez ,Paris, 1995
- [4] BOUCHERK KAHINA et HAMDID NAIMA « Traitement des signaux vibratoires : Application au diagnostic des défaillances » Mémoire d'ingénieur d'électronique UMMTO 2009.
- [5] BELHADJ NORA et BELMAHDI FATIHA « Application des réseaux de neurones à la détection et la classification des défauts dans les machines tournantes » Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electronique UMMTO 2010.
- [6] Trajin, B. (2009). “Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entrainements asynchrones. Application à la surveillance des roulements à billes”, Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [7] “Roulement à bille et à rouleaux. (2007),document NTN (for new technologie network) corporation. CAT. NO. 2202-VIII/F.
- [8] MERAH KARIMA « Diagnostic des défauts de roulement d'un moteur par analyse vibratoire (Etude comparative avec l'analyse du courant statorique) » Mémoire de Magistère en électrotechnique USTOMB 2016.
- [9] Stack, J. R., Habetler, T. G., & Harley, R. G. (2004). “Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines”, Industry Applications, IEEE Transactions on, 40(3), 735-739.
- [10] Tandon, N., & Choudhury, A. (1997). “An analytical model for the prediction of the vibration response of rolling element bearings due to a localized defect”, Journal of sound and vibration, 205(3), 275-292.
- [11] Amar Chiter « Détection et diagnostic des défauts de roulement : contribution à la maintenance des machines tournantes». Thèse de Magistère en optique et mécanique de précision UFAS 2001
- [12] <http://www.dontveter.com/bpr/public.html>
- [13] <http://svmlight.joachims.org/>
- [14] <http://asi.insa-rouen.fr/enseignants/~arakotom/toolbox/index.html>
- [15] <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>
- [16] http://www.support-vector-machines.org/SVM_soft.html.
- [18] <http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/cwruf/flash.htm>