

N° Ordre...../DGM/FT/UMBB/2021

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



Faculté de Technologie  
Département Génie Mécanique

**Mémoire de Master**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en : Electromécanique

**Filière : Mécanique**

**Spécialité : Electromécanique**

**THEME**

**Contribution à la classification des défauts de roulement par  
l'utilisation des techniques d'apprentissage automatique**

Présenter par :

DATE :14/07/2021

BOURENNANI HANI

TABOUKOUYOUT NADJIB

Membre de jury :

- |                        |     |             |
|------------------------|-----|-------------|
| 1. IKHLEF BOUALEM      | MAA | PRESDENT    |
| 2. GOUGAM FAWZI        | MAB | EXAMINATEUR |
| 3. RAHMOUN CHEMSEDDINE | MCA | PROMOTTEUR  |

**Promotion 2020-2021**

## ***Dédicaces 1***

*A mon père et ma mère*

*Je dédie ce mémoire à ma petite famille (abdo ,fouad ,hamza), que mille dédicaces ne puissent exprimer mes sincères sentiment, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.*

*Samira la deuxième maman ma petite Lydia et Mes chers frères Merzak, Abdsalam, Rahim, Mehdi, Abdel Moumen, Redzo, Mouloud, Ghano, Ali, mes chers sœurs Amel, khadidja, pour garder mon sourire et pour leur encouragement.*

*Mon binôme bourennani hani, mes chers amis,l, Abdelkarim Benchiha, Abdelkarim Bouchlaghem, Eiichiro Oda, Nassim, akram,Ltx\_Xavi, Salah, fycal, fouad, siso ,chawki, Mahdiu, Dany, Nouh, Lokman, Ouahab, Billal, Kadiro, Chemsou, Fodil, Moh, Hicham, zaki-benz, Khaled, sabrina, riad ,adam hichem ramdani,ahmad halimi, brahim mouhamou,, qui sans encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Les dédicaces ne seraient rien sans mention particulière pour nous collègues de la promotion électromécanique.*

*Et a toute ma famille et à ceux que j'aime.*

## ***Dédicaces 2***

*A mon père*

*Je dédie ce mémoire à ma petite famille (Lina et Saliha bourennani Nacera et Saida Tageurcifi), que mille dédicaces ne puissent exprimer mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond amour et respect pour leurs grands sacrifices.*

*Samira la deuxième maman ma petite Lydia et Mes chers frères Merzak, Abdsalam, Rahim, Mehdi, Abdel Moumen, Redzo, Mouloud, Ghano, Ali, mes chers sœurs Amel, Selma, Yasmina, Selena pour garder mon sourire et pour leur encouragement.*

*Mon binôme Taboukouyout Nadjib, mes chers amis Moussa, Amine, Hicham, Kamel, Abdelkarim Benchiha, Abdelkarim Bouchlaghem, Eiichiro Oda, Nassim, akram, Ltx\_Xavi, Salah, Mounir, Mahyou, Dany, Nouh, Lokman, Ouahab, Bilal, Kadiro, Chemsou, Fodil, Moh, Hicham, zaki-benz, Khaled, Mounia, Amel, qui sans encouragement ce travail n'aura jamais vu le jour.*

*Les dédicaces ne seraient rien sans mention particulière pour nous collègues de la promotion électromécanique.*

*Et à toute ma famille et à ceux que j'aime.*

**Remercîments :**

*Nous remercions avant tout dieu de nous avoir donné le courage, et santé pour réaliser ce modeste travail.*

*Ce travail de projet de fin d'étude a été réalisé à la faculté des sciences de l'ingénieur de Boumerdès dirigé par **DOCTEUR RAHMOUNE CHEMSEDDINE**.*

*Nous tenons à remercier monsieur **D. RAHMOUNE CHEMSEDDINE** enseignant à l'université de Boumerdes, qui nous a encadrés durant ce Projet fin d'étude. Nous le remercions d'avoir accepté notre Project de nous avoir prodigué tous conseils indispensables. Nous le remercions aussi pour avoir suivi, dirigé et encouragé ce travail.*

*Je remercie messieurs les membres du jury pour ma caution qu'ils ont bien voulu apporter à ce travail.*

*Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière pour nos collègues de la promotion « **Electromécanique** » sans oublier nos chers enseignants du département génie mécanique a leurs tets monsieur le chef de département et le staff administratif.*

*Merci pour tout le moment qu'on a passé ensemble.*

*Nous remercîment toute personne ayant contribué, de près ou de loin, dans ce travail,*

***Merci infiniment.***

## Résumé

La maintenance des machines tournantes par l'analyse vibratoire a considérablement évolué ces dernières années grâce aux techniques avancées de l'intelligence artificielle. Ces techniques permettent maintenant de détecter à un stade précoce l'existence d'un défaut, d'identifier sa nature, localiser sa position et suivre son évolution.

Ce travail s'inscrit dans la thématique de la surveillance et diagnostic des défauts mécanique et plus particulièrement des défauts de roulement.

L'objectif de notre travail est de localiser l'emplacement du défaut au niveau de roulements (bille, cage, bague extérieur) et de localiser le roulement défaillant et utilisant une technique d'intelligence artificielle. Cette méthode est basée sur l'utilisation de ET (EXTRA TREE). Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode proposée.

## ملخص

تطورات صيانة الآلات الدوارة من خلال تحليل اهتزازات بشكل كبير في سنوات الأخيرة بفضل التقنيات المتقدمة للذكاء الاصطناعي. توتي حادث تقنيات الان اكتشاف وجود عيب في مرحله مبكرة وتحديد طبيعته وتحديد موقعي ومتابعه تطوره. هذا العمل جزء من موضوع مراقبة وتشخيص العيوب الميكانيكية. الهدف من اعمالنا هو تحديد موقع الخلل على مستوى المتدرجة (الكره القفص الحلقة الخارجية) وتحديد مكان العطب باستخدام تقنيه الذكاء الاصطناعي. تعتمد هذه الطريقة (الأشجار الإضافية) النتائج التي تم الحصول عليها تظهر فعالية الطريقة المقترحة على استخدام

# Sommaire

## Sommaire

<u>Dédicaces</u> .....	I
<u>Dédicaces</u> .....	II
<u>Remercîments</u> .....	III
<u>Résumé</u> .....	IV
<u>Liste des figures</u> .....	V
Introduction générale : .....	1
Organigramme représente la méthode utilisée pour réaliser une diagnostique par l'intelligence artificiel .....	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 les roulements :.....	4
I.2.1 définition :.....	4
I .2.2 Les différentes types de roulements : .....	4
I.2.3 Différentes composantes d'un roulement à billes.....	5
I.2.4 Les différents types de roulements à billes et leurs applications :.....	5
I.2.4.1 Roulements rigides à billes : .....	5
I.2.4.2 Roulements à billes à contact oblique :.....	6
I.2.4.3 Roulements à rotule sur billes .....	7
I.2.4.4 Roulements hybrides à billes de céramique .....	7
I.2.5 défauts des roulements : .....	8
I .2.5.1 Un défaut :.....	8
I.2.5.2 Dégradation.....	9
I.2.5.3 Défaillance .....	9
I.2.5.4 Panne .....	9
I.2.5.5 Mode de fonctionnement.....	9
I.2.5.6 Mode de fonctionnement nominal.....	10

I.2.5.7 Mode de fonctionnement dégradé.....	10
I.2.5.8 Mode de défaillance.....	10
<b>I.3 La maintenance :</b> .....	<b>10</b>
<b>I.3.1 Définition de la maintenance</b> .....	<b>10</b>
<b>I.3.2 but de maintenance :</b> .....	<b>10</b>
<b>I.3.3 Les différents types de maintenances</b> .....	<b>11</b>
I.3.3.1 La maintenance corrective.....	11
I.3.3.2 La maintenance palliative .....	11
I.3.3.3 La maintenance curative.....	11
I.3.3.4 Maintenance préventive .....	12
I.3.3.5 Maintenance préventive systématique.....	12
I.3.3.6 Maintenance préventive conditionnels .....	12
<b>I.4 La Surveillance : [14]</b> .....	<b>12</b>
I.4.1.2 Surveillance par indicateurs spectraux :.....	13
I.4.1.3 Surveillance par indicateurs typologiques ou comportementaux :.....	13
<b>I.5 diagnostic :</b> .....	<b>13</b>
<b>I.5.1 les différentes étapes techniques du diagnostic :</b> .....	<b>13</b>
<b>I.5.2 Méthodes du diagnostic</b> .....	<b>15</b>
I.5.2.1 Méthodes de diagnostic sans modèle : .....	15
I.5.2.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle :.....	16
<b>I.6 Conclusion</b> .....	<b>16</b>
<b>II.1 Introduction :</b> .....	<b>17</b>
<b>II .2. Définition d'un signal :</b> .....	<b>17</b>
<b>II.3. Le traitement de signal :</b> .....	<b>18</b>
<b>II.4. Les indicateurs :</b> .....	<b>18</b>
<b>II.4.1 Standard déviation (L'écart-type)</b> .....	<b>18</b>
<b>II.4.2 La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)</b> .....	<b>18</b>

II.4.3. La valeur crête VC : MAX.....	18
II.4.4. Le facteur de crête : MAX-MIN.....	19
II.4.5. Skewness .....	19
II.4.6. Le kurtosis .....	19
II.4.7 Entropie .....	20
II.5 Description du banc d'essai : .....	20
II.6. La base de données : .....	21
II.6.1. Spécifications des paramètres système : .....	21
II.6.2. Spécifications des paramètres de roulement : .....	21
II.6.3. Les signaux .....	21
II.7. Extraction des caractéristiques de signal : .....	23
II.8 Conclusion : .....	23
III.1 Introduction : .....	24
III.2 Définition d'intelligence artificiel [15] : .....	24
III.3 Domaine d'utilisation : .....	24
III.4 Diagnostic : .....	25
III.4.1 Diagnostic par l'intelligence artificielle : .....	25
III .5 L'apprentissage automatique : .....	25
III.6 La classification : .....	25
III.6.1 Classification non supervisée : .....	26
III.6.2 Classification supervisée : .....	26
III.7 Les classifieurs : .....	26
III.7.1 les différent classifieur : .....	26
III.7.1.1 classification par la méthode SVM : .....	26
III.7.1.1.1 Vecteurs de support.....	27
III.7.1.2 classification par la méthode de LS-SVM : .....	27
III.7.1.3 classification par la méthode knn : .....	27

<b>III.7.1.4 classifications par extrême machine Learning :</b> .....	<b>28</b>
<b>III.7.1.5 classifications par l'arbre de décision (DT) :</b> .....	<b>28</b>
<b>III.7.1.6 classifications par Random Forest :</b> .....	<b>28</b>
<b>III.7.1.7 classifications par extra tree :</b> .....	<b>28</b>
<b>III.8 Conclusion</b> .....	<b>32</b>
<b>Conclusion générale :</b> .....	<b>33</b>
<b><u>Bibliographie :</u></b> .....	<b>34</b>

# Liste des figures

## Liste des figures :

<b>Figure (I.1) Différentes composantes d'un roulement à billes .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I.2) Différentes composantes d'un roulement à billes .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I.3) Roulements rigides à billes.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure (I.4) Roulements à billes à contact oblique :.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure (I.5) Roulements à rotule sur billes.....</b>	<b>7</b>
<b>Figure (I.6) Roulements hybrides à billes de céramique.....</b>	<b>8</b>
<b>Figure (I.7) Défauts des roulements à billes. ....</b>	<b>9</b>
<b>Figure (I.8) diagramme des types maintenances. ....</b>	<b>11</b>
<b>Figure (I.9) Les différentes étapes techniques du diagnostic .....</b>	<b>14</b>
<b>Figure (I.10) Les méthodes du diagnostic.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure (I.11) Les méthodes du diagnostic à base de model .....</b>	<b>16</b>
<b>Figure (II.1) Classification phénoménologie des signaux aléatoire.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure (II.2) Le banc d'essai.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure (II.3) les vibrations de palier extérieur pour les quatre états .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure (II.4) Extraction des caractéristiques de signal .....</b>	<b>23</b>
<b>Figure (III .1) matrices de confusions avec 10 caractéristiques.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure (III.2) Les résultats de classification avec 10 caractéristiques .....</b>	<b>30</b>

# Introduction générale

## **Introduction générale :**

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, l'effet de ces forces capable de créer plusieurs défauts dans le système mécanique de la machine et particulièrement dans le système des roulements, L'un des problèmes les plus importants parmi ceux que pose est du diagnostic des roulements.

Le roulement est un élément essentiel dans chaque machine tournante. Son intérêt réside sur le fait que cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant la force de frottements entre eux. Le roulement dont on ne peut jamais négliger l'importance est l'élément le plus susceptible de tomber en panne dans une machine tournante, ce qui oblige une détection et un diagnostic précoce de ces pannes. Les défauts essentiels qui peuvent affecter un roulement sont : le grippage dû à l'absence de lubrification, la corrosion due à un mauvais choix du lubrifiant, la corrosion de contact due au mauvais choix d'ajustements entre les bagues.

Pour assurer un bon fonctionnement des machines et éviter la défaillance des roulements il faut faire un bon diagnostic basé sur le traitement de signal et l'intelligence artificielle à l'aide de ces deux derniers on va essayer de trouver une technique pour faciliter l'identification et la détection des défauts.

Dans le premier chapitre nous avons présenté un état de l'art sur les roulements et les différents défauts, la maintenance, les divers types existants, la surveillance, ainsi que la détection et l'identification et la localisation.

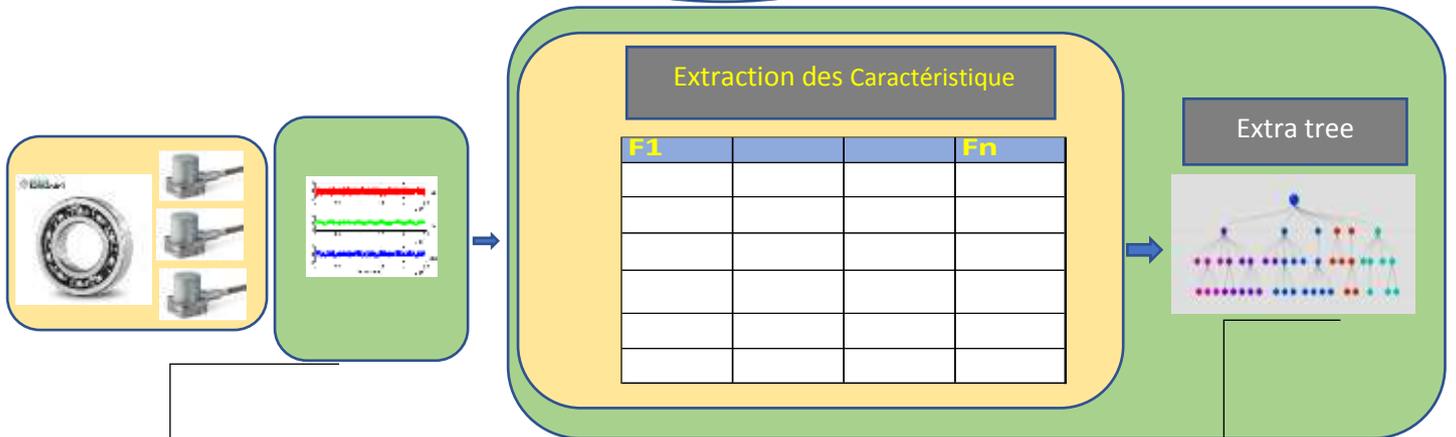
Dans le 2<sup>ème</sup> chapitre nous avons présenté la méthode de diagnostic par traitement de signal, et les différents indicateurs que nous avons appliqué pour faire une extraction des caractéristiques du notre signale que on a été pris du banc d'essai MAFAULDA (base de données de pannes des machines).

Le 3<sup>eme</sup> chapitre est consacré dans un premier temps l'intelligence artificielle et ces classifieurs, nous avons appliqué la méthode de extra tree pour identifier et localisé les défauts étudiés.

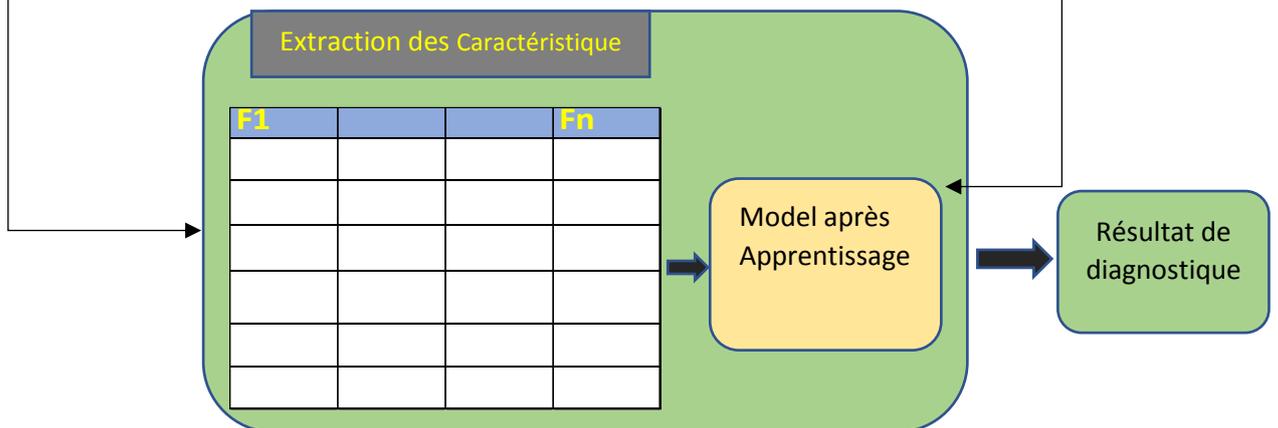
Cette méthode est basée sur le traitement de signal et l'intelligence artificiel, on a utilisé des signaux des roulements à l'état défaillant et on les compare avec celui de l'état sain afin de détecter et identifier les défauts liés aux roulements et suivre l'évolution de ce dernier.

Organigramme représente la méthode utilisée pour réaliser une diagnostique par l'intelligence artificiel

## Training



## Testing



*Chapitre 1*  
*Généralité sur la*  
*maintenance et le*  
*diagnostic*

## **I.1 Introduction**

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machine et d'installation de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des couts d'exploitation et la maitrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes, un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Nous nous intéressons principalement aux transmissions des puissances mécaniques utilisées dans différents domaines tel que l'industrie, l'aéronautique, l'automobile et les transports ferroviaires et puisque nous parlons dans ce domaine nous considérons les roulements comme un élément critique et sensible de la machine .La maintenance de ce systèmes de transmission occupe un temps relativement important par rapport à leur temps d'utilisation, actuellement la recherche scientifique vise à développer les outils nécessaires à l'optimisation de la maintenance de tels Systèmes.

## **I.2 les roulements :**

### **I.2.1 définition :**

Un roulement est un élément mécanique qui s'interpose entre deux parties d'une machine dont l'un est tournant et l'autre est fixe. Le roulement a été utilisé depuis longtemps, mais sous une forme simpliste. Le premier à avoir établi un dessin pour le roulement à billes est *Léonard DE VINCI* (XVème siècle) qui fut ainsi considéré comme l'inventeur du roulement moderne. Aujourd'hui, les roulements prennent des formes plus développées et plus variées et leur utilisation au sein des machines tournantes devient une nécessité absolue. Ceci explique bien l'intérêt actuel qu'on leur accorde [1].

### **I .2.2 Les différentes types de roulements :**

- Roulement lisse.
- Roulement à rouleaux.
- Roulement à billes

### I.2.3 Différentes composantes d'un roulement à billes.

Un roulement est composé des bagues interne et externe, d'une cage et de billes (Figure I.1). Des vibrations sont produites quand les conditions de roulement ne sont pas parfaites, et qui peuvent être induites par des dommages extérieurs ou des forces agissant sur les roulements (déséquilibre, désalignement, etc.). Les dommages surfaciques sont dus à la fatigue en présence des efforts élevés aux points de contact. Plus spécifiquement, les vibrations sont produites par les impacts qui se produisent quand la surface d'une composante heurte une autre surface. Comme le roulement tourne, les impulsions résultantes se produisent périodiquement. Les fréquences de ces impulsions sont uniquement déterminées par l'emplacement où le défaut se produit, soit sur la bague interne, sur la bague externe, ou sur les éléments de billes. La géométrie du roulement est aussi un paramètre très important [1].

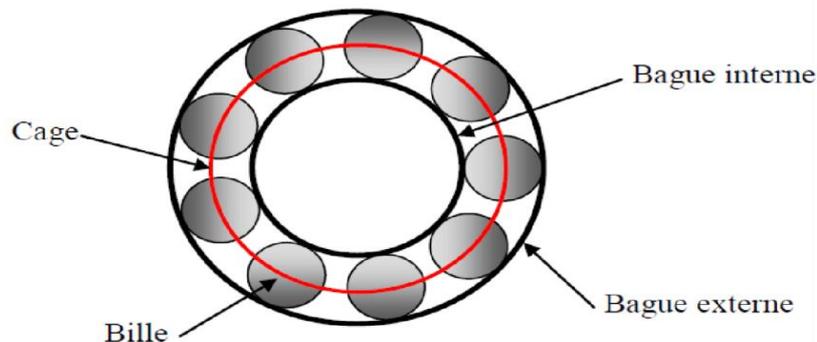


Figure (I.1) : Différentes composantes d'un roulement à billes

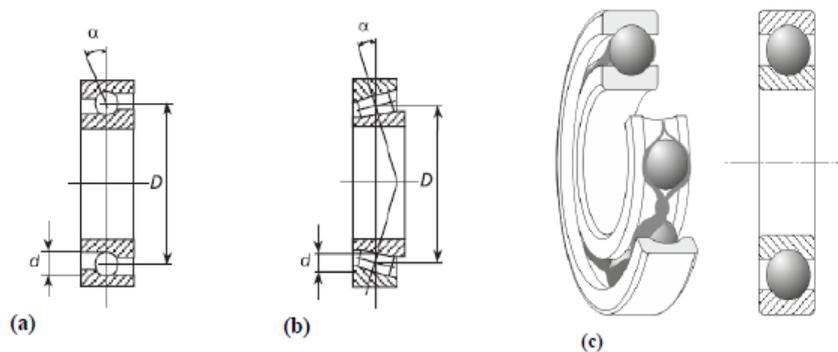


Figure (I.1) : Différentes composantes d'un roulement à billes

Figure (I.2) : Géométrie d'un roulement. (a) Une vue de coupe d'un roulement à billes ; (b) Une vue de coupe d'un roulement à billes coniques.  $D$  : diamètre moyen au centre de la bille ;  $d$  : diamètre de la bille ;  $\alpha$  : angle de contact ; (c) Roulement à une seule rangée de billes (Randall et al-2001).

## **I.2.4 Les différents types de roulements à billes et leurs applications :**

### **I.2.4.1 Roulements rigides à billes :**

Ils peuvent admettre un désalignement compris entre 2 et 16', mais ne tolèrent que des charges axiales modérées. Un roulement à billes est composé de deux bagues entre lesquelles sont placées des billes, légèrement lubrifiées, et maintenues espacées par une cage. Contrairement à une idée reçue, la lubrification n'a pas pour but principal de réduire les frottements entre les billes et les bagues ; le lubrifiant sert avant tout à éviter le grippage des divers éléments. D'ailleurs, un excès de lubrifiant rend le mouvement plus difficile et provoque un échauffement très préjudiciable à la durée de vie du roulement.[2]



**Figure (I.3) : Roulements rigides à billes**

### **I.2.4.2 Roulements à billes à contact oblique :**

Pour ce type de roulement, le contact entre la bille et les chemins se fait selon un axe incliné par rapport au plan normal de l'axe de rotation de l'arbre. Ce contact oblique permet de subir des efforts axiaux importants, mais dans un seul sens ; ils sont donc montés par paire, en opposition. Par contre, ils n'acceptent qu'un faible désalignement, de l'ordre de 1 à 2', ce qui implique un grand soin en termes d'usinage ou de réglage (alignement).

Les roulements à contact oblique à double rangée de billes, acceptant des charges axiales importantes dans les deux sens, peuvent être utilisés seuls, par exemple pour un arbre court. Ils n'acceptent aucun désalignement.[2]



**Figure (I.4) : Roulements à billes à contact oblique :**

### **I.2.4.3 Roulements à rotule sur billes**

Composé de deux rangées de billes, d'un chemin de roulement sphérique dans la bague extérieure et de deux chemins dans la bague intérieure, les roulements à rotule sur billes sont recommandés lorsque l'alignement de l'arbre est difficile et que celui-ci peut fléchir. Les roulements à rotule sur bille sont ceux qui génèrent le moins de frottement, résultant en d'excellentes performances et ce, même à vitesse élevée. Grâce à cette absence de frottement, d'entretien. Les roulements à rotule sur billes sont très efficaces pour réduire le niveau de les roulements à rotule sur billes possèdent une très longue durée de vie et nécessitent très peu bruit.[2]



**Figure (I.5) : Roulements à rotule sur billes**

#### **I.2.4.4 Roulements hybrides à billes de céramique**

Les billes de céramique sont plus légères que les billes en acier. Conséquemment, le roulement hybride à billes de céramique peut tourner jusqu'à 40 % plus rapidement qu'un roulement traditionnel. Puisqu'il tourne plus vite, une moins grande force est exercée sur les billes, réduisant considérablement la résistance au frottement. L'appellation « hybride » vient du fait que les bagues intérieures et extérieures sont composées d'acier inoxydable 440C. [2]



**Figure (I.6) : Roulements hybrides à billes de céramique**

#### **I.2.5 défauts des roulements :**

##### **I .2.5.1 Un défaut :**

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence de défauts. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même.[3]

- Les roulements sont exposés à dommages extérieurs ou des forces extrêmes exemple (excès de vibration sur l'arbre) ou une mauvaise lubrification du roulement, qui vont créer les défauts.

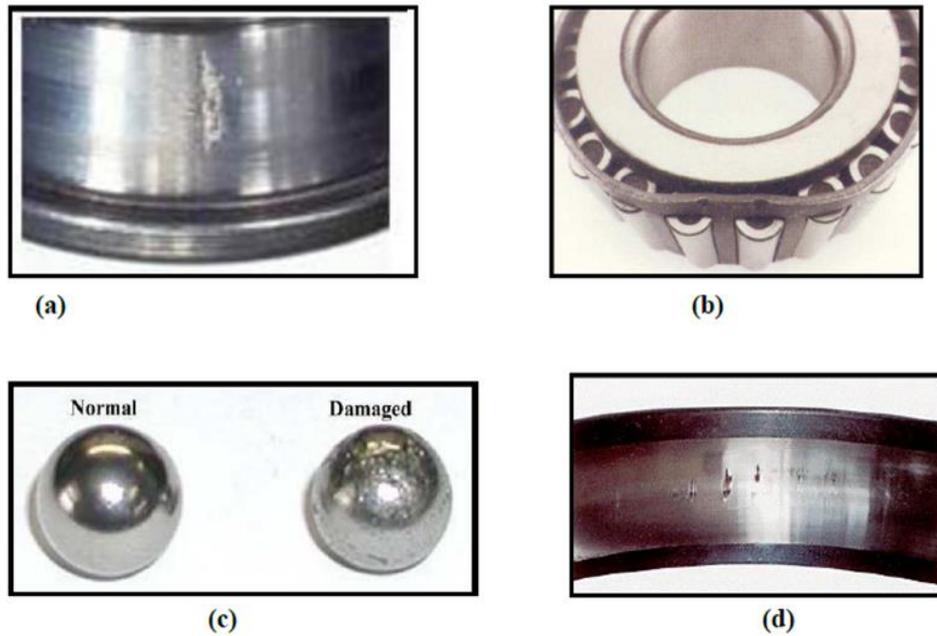


Figure (I.7) -Défauts des roulements à billes.

### I.2.5.2 Dégradation

Une dégradation représente une perte de performance d'une des fonctions assurées par un équipement. Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus de dégradation mais de défaillance.

### I.2.5.3 Défaillance

Événement engendrant une modification du fonctionnement du procédé. L'état du système ne correspond plus à un fonctionnement normal. Le système n'est plus apte à assurer totalement ses fonctions. Il est clair qu'une défaillance implique l'apparition d'un défaut puisqu'il existe un écart entre la caractéristique mesurée et la caractéristique théorique.

### I.2.5.4 Panne

Une panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. La différence entre la panne et la défaillance est que la défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

### I.2.5.5 Mode de fonctionnement

Un système présente généralement plusieurs modes de fonctionnement [3]. On peut observer des modes de plusieurs types parmi lesquels :

### **I.2.5.6 Mode de fonctionnement nominal**

C'est le mode où l'équipement ou le système industriel remplit sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur et avec les exigences attendues de l'exploitant.

### **I.2.5.7 Mode de fonctionnement dégradé**

Qui correspond soit à l'accomplissement partiel de la mission, soit à l'accomplissement de celle-ci avec des performances moindres

### **I.2.5.8 Mode de défaillance**

Qui correspond à des mauvais fonctionnements du système, c'est-à-dire qu'il y a eu défaillance soit après dégradation soit défaillance brusque.

## **I.3 La maintenance :**

### **I.3.1 Définition de la maintenance**

La maintenance est définie comme étant l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Maintenir c'est donc effectuer des opérations qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. [Norme AFNOR X60-010].

### **I.3.2 but de maintenance :**

Le principal objectif de la maintenance industrielle est d'assurer le bon fonctionnement des matériels de productions d'une entreprise industrielle. Ce type de suivi régulier a une fonction stratégique dans le secteur industriel. Explicitement liée à l'évolution de la technologie avec l'apparition des nouvelles techniques de gestion et la réduction des coûts de production pour des raisons concurrentielles.

En général, la maintenance industrielle est fixée à :

- Assurer les normes de qualité des produits fabriqués
- Atteindre la production prévue
- Éviter la durée de chaque production et des livraisons des produits finis auprès des distributeurs
- Réduire les pollutions et préserver l'environnement
- Protéger les personnels de son usine et améliorer les conditions de travail [8]

### I.3.3 Les différents types de maintenances

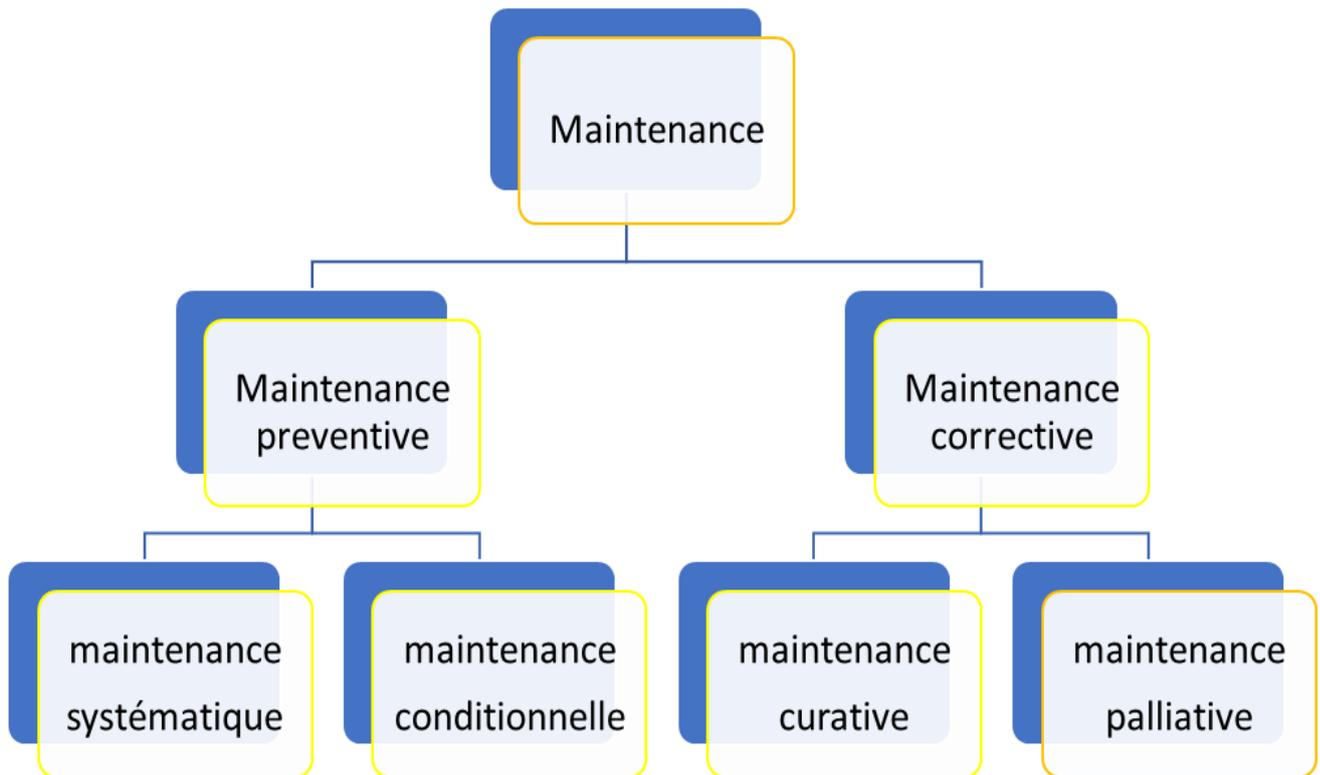


Figure (I.8) : diagramme des types maintenances.

#### I.3.3.1 La maintenance corrective

- Il s'agit d'une maintenance effectuée après défaillance. - C'est une politique de maintenance qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne.[4]

#### I.3.3.2 La maintenance palliative

Est un ensemble d'activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement une fonction ou partie d'une fonction, elle est appelée couramment dépannage. [4]

#### I.3.3.3 La maintenance curative

Est un ensemble d'activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. [4]

### **I.3.3.4 Maintenance préventive**

Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage. [4]

### **I.3.3.5 Maintenance préventive systématique**

D'après la norme (AFNOR X 60-10), la maintenance systématique se définit comme "une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien".

### **I.3.3.6 Maintenance préventive conditionnels**

D'après la norme (AFNOR X 60-10), la maintenance conditionnelle se définit comme "une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (Autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure) révélateur de l'état de dégradation du bien".

- Pour détecter les défaillances ou les défauts des systèmes il faut passer une étape nécessaire complété la maintenance et trouvé une solution idéale ou plus vite possible

## **I.4 La Surveillance : [14]**

La surveillance est un processus passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indications. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic.

**La détection** Pour détecter les défaillances du système. Il faut être capable de classer les situations Observables comme étant normales ou anormales.

**Diagnostic** « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la défaillance 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 en diagnostic :**

**Identifier** la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur des observations.

**Localisation** : elle permet de déterminer les sous-ensembles fonctionnels défaillants.

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

### **I.4.1 Les différents modes de surveillance :**

A partir de la nature des indicateurs et des familles dans lesquelles on les regroupe, on peut définir trois modes de surveillance :

#### **I.4.1.1 Surveillance par indicateurs scalaires énergétiques globaux ou large bande :**

Il s'agit d'une comparaison à un seuil d'une valeur caractéristique de l'amplitude et de l'énergie du signal, mesurée dans le domaine temporel dans une bande de fréquence plus au moins étendue.

#### **I.4.1.2 Surveillance par indicateurs spectraux :**

Il s'agit d'une comparaison d'une image spectrale du signal à un gabarit défini à partir de la même image spectrale obtenue lors de la mise en service de l'installation ou après remise en état. [5]

#### **I.4.1.3 Surveillance par indicateurs typologiques ou comportementaux :**

Ce mode s'attache à la détection de défauts particuliers à partir de leur manifestation vibratoire ou de leurs interactions avec d'autres grandeurs dynamiques.

### **I.5 diagnostic :**

#### **I.5.1 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.9)

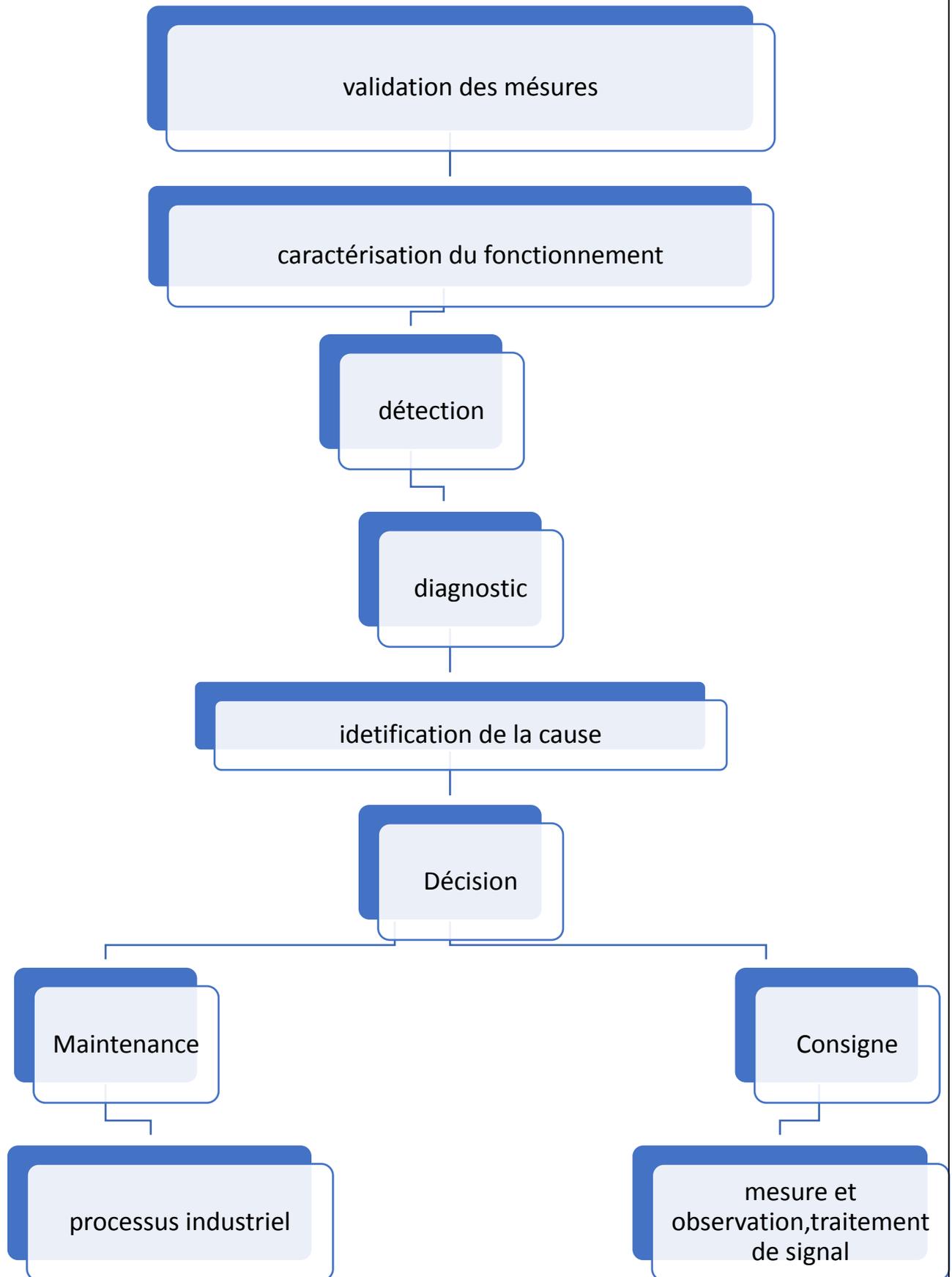
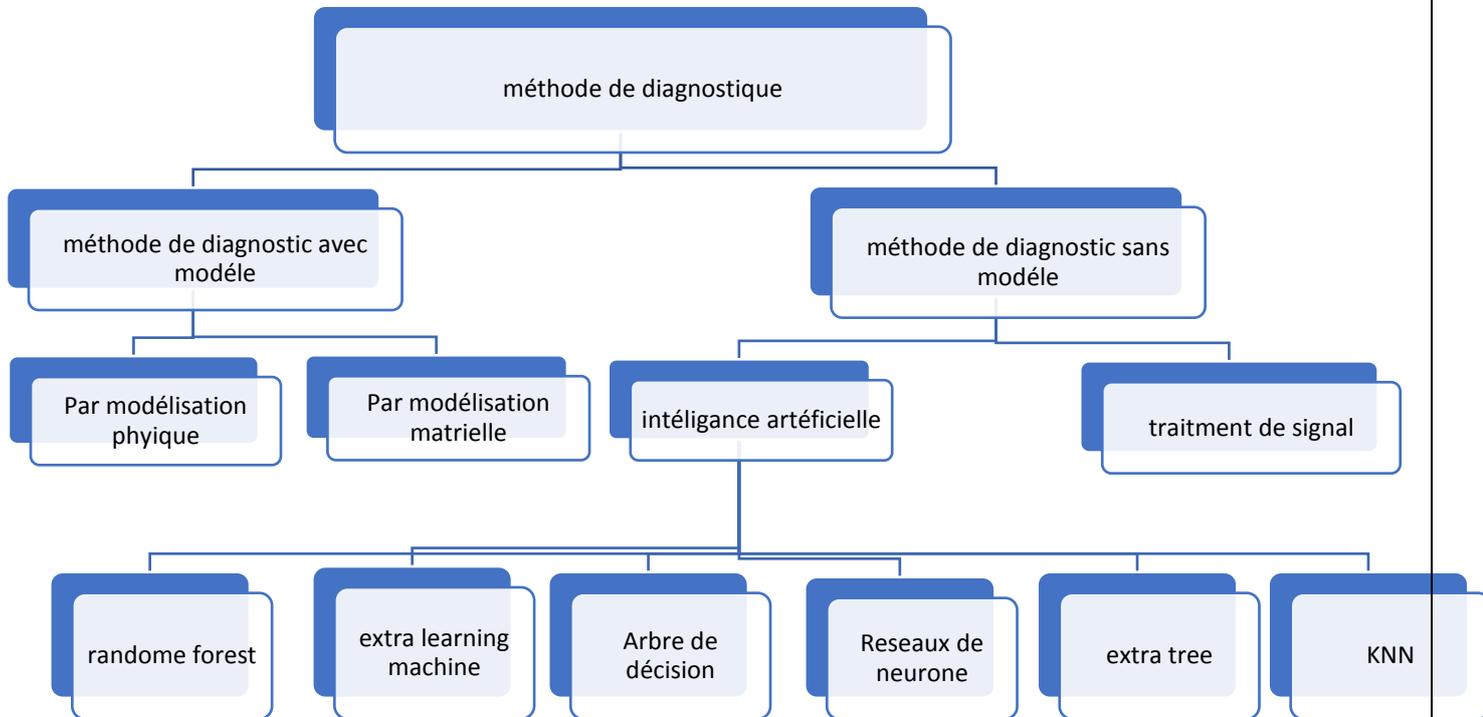


Figure (I.9) : Les différentes étapes techniques du diagnostic

## I.5.2 Méthodes du diagnostic

Les méthodes du diagnostic peuvent être résumées dans ce schéma suivant :



**Figure (I.10) Les méthodes du diagnostic**

### I.5.2.1 Méthodes de diagnostic sans modèle :

Dans certaines applications industrielles, il est difficile, voire impossible, d'obtenir le Modèle du système. Cette difficulté est justifiée par la complexité accrue ou à de nombreuses reconfigurations intervenantes durant le processus de production. En effet, seules les méthodes de surveillance sans modèles sont opérationnelles pour ce type d'applications industrielles. Le principe de fonctionnement de ces méthodes est divisé en trois phases :

- Les mesures.
- L'extraction des caractéristiques.
- La classification.

Ces méthodes ne nécessitent pas un modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet, la seule connaissance repose sur l'expertise humaine confrontée à un solide retour d'expérience [6], [7].

### I.5.2.2 Méthodes de diagnostic à base de modèle :

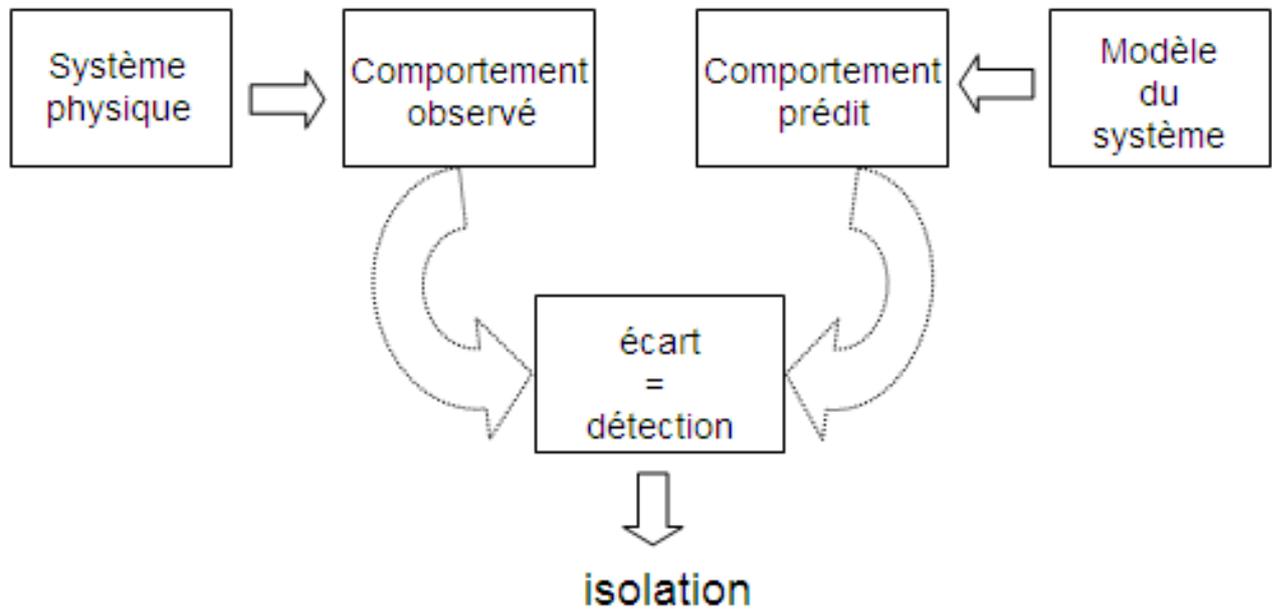


Figure (I.11) : Les méthodes du diagnostic à base de model

Ces méthodes reposent sur une comparaison du comportement du système avec le Comportement du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué dans le schéma de la Figure (I.11)

## I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général sur le système des roulements et leur utilisation au sein des machines tournantes. Donc la présence d'un dysfonctionnement peut entrainer des pertes importantes dans la machine .et pour cela nous avons parlé sur les méthode utilisé dons le domaine maintenance et diagnostic, parmi ces méthodes on a parlé sur le traitement de signal que représenté une méthode de diagnostic sans model.

# *Chapitre 2*

## *Extractions des caractéristiques par traitement de signal*

## II.1 Introduction :

Dans plusieurs Domaines et spécialement dans l'industriel il est nécessaire d'assurer un fonctionnement continu et parfait des machines, ce qui exige le développement des méthodes de maintenance performantes et efficaces pour augmenter leur durée d'utilisation et assurer un bon fonctionnement, et d'éviter, parfois, d'éventuelles catastrophes dues à certaines défaillances.

Notre objectif est la détection et l'identification des défauts des roulements. Le comportement vibratoire des roulements ça nous donne des informations pour réaliser un diagnostic et caractériser ainsi l'état de fonctionnement de la machine.

Le diagnostic composé de deux parties. Partie d'extraction des caractéristiques et une autre de classification dans ce chapitre nous parlons de l'utilisation du diagnostic par traitement de signal et comment faire l'extraction.

## II .2. Définition d'un signal :

C'est la Représentation graphique d'une grandeur physique, la figure 1, représente une classification du signal phénoménologie

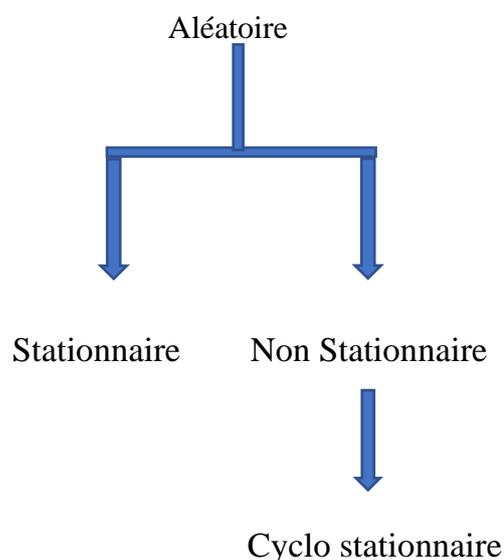


Figure II.1. Classification phénoménologie des signaux aléatoire

### II.3. Le traitement de signal :

C'est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations possibles sur ces signaux, on peut dénoter le contrôle, le filtrage, la compression et la transmission de données, la réduction du bruit, la déconvolution, la prédiction, l'identification, la classification, etc.

### II.4. Les indicateurs :

#### II.4.1 Standard déviation (L'écart-type)

L'écart-type sert à mesurer la dispersion, ou l'étalement, d'un ensemble de valeurs autour de leur moyenne. Plus l'écart-type est faible, plus la population est homogène. (UNISCIEL. Pédagothèque de l'Université numérique thématique unisciel. In *L'Université des sciences en ligne*. [Consulté le mars 2011].)

$$\text{Ecart-type} : \sqrt{\text{Variance}} = (\delta x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

#### II.4.2 La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients.

Il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace l'apparition de certains défauts et il s'écrit sous forme discrétisée :

$$V_{\text{efficace}} (\text{RMS}) = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{a=1}^{N_e} [x(n)]^2}$$

Où  $x(n)$  est le signal temporel mesuré,  $N_e$  représente le nombre d'échantillons prélevés dans le Signal. Permet de contrôler rapidement l'état de la machine et d'indiquer si les conditions de fonctionnement ont évolué de manière inquiétante depuis la dernière mesure. Ce critère n'évolue pas de manière significative au cours de la 1ère phase de dégradation, il ne commence à croître que pendant la 2ème phase de dégradation. Ceci est un point faible pour la maintenance conditionnelle et rend la détection précoce impossible.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de Fréquences d'analyse liées à la structure même des machines. [35]

#### II.4.3. La valeur crête VC : MAX

Représente la valeur maximale du signal. Pour un signal  $x(n)$  la valeur crête est donnée par :

$$\text{Valeur crête} = \text{Sup } x(n)$$

Est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction.

Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît

Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs (VRMS,  $V_c$ ) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un Inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance). [35]

#### II.4.4. Le facteur de crête : MAX-MIN

Le facteur crête est le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace du signal. Plus la vibration devient impulsive, plus la valeur de crête augmente, cependant ce facteur présente les mêmes valeurs pour les deux extrêmes de l'état d'une machine. (UNISCIEL. Pédagothèque de l'Université numérique thématique unisciel. In *L'Université des sciences en ligne*. [Consulté le mars 2011].)

$$\text{Facteur de crête} = \frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{a=1}^{Ne} [x(n)]^2}}$$

#### II.4.5. Skewness

C'est un invariants aux changements d'origine et d'échelle, est le moment d'ordre 3 il est donné par :

$$\text{Skewness} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\frac{1}{N \sum_{n=1}^N [(x_i - \bar{x})^2]^{\frac{3}{2}}}}$$

Le skewness caractérise le taux de dissymétrie de la distribution du signal par rapport à la valeur moyenne. (UNISCIEL. Pédagothèque de l'Université numérique thématique unisciel. In *L'Université des sciences en ligne*. [Consulté le mars 2011].)

#### II.4.6. Le kurtosis

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement. Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3 (Moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). Lorsqu'un défaut est détecté, sa valeur devient supérieure à 3. L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - \bar{x}]^4}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n) - \bar{x}]^2}$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,  $x(n)$  est le signal temporel,  $\bar{x}$  est la valeur moyenne des amplitudes,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le principale avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du l'engrenage.

Le Kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic. [35]

### **II.4.7 Entropie**

En physique, le mot entropie a des implications physiques importantes comme la quantité de 'Désordre' d'un système. En mathématiques, une définition plus abstraite est utilisée.

L'entropie (Shannon) d'une variable X est définie comme :

$$\text{Entropy} = - \sum_x \rho(x) \log_2 [p(x)]$$

Chaque signal contient 250,000 échantillons et pour crée une nouvelle base de données plus précis et extraire maximum des informations. On a décomposé le signal par des tranches.

### **II.5 Description du banc d'essai :**

Pour mieux comprendre les différentes signatures des défauts, des expérience contrôlées sur un simulateur des machines réelles sont nécessaires. Le banc d'essai est composé d'un moteur 700-3600 tr/min. les roulements supportent l'arbre du moteur dans ce cas on va traiter 3 défauts des roulements : la bille et la cage et la bague extérieur.



Figure II.2. Le banc d'essai

## II.6. La base de données :

Notre base de données contient des séries temporelles par trois captures industrielles sur le simulateur MFS.

Les Captures IMI industrielle de type 601A01 Bronché sur trois directions :

1-Radiale

2- Axiale

3- Tangentiel

### II.6.1. Spécifications des paramètres système :

Moteur : ¼ CV DC

Pois de système : 22kg

Diamètre de l'axe : 16 mm

Longueur de l'axe : 520 mm

Rotor : 15.24 cm

### II.6.2. Spécifications des paramètres de roulement :

Nombre de balles : 8

Diamètre des boules : 0.7145

Diamètre de la cage : 2.8519

### II.6.3. Les signaux

Chaque séquence a été générée à un taux d'échantillonnage de 50kHz. Pendant 5s, totalisant 250,000 échantillons.

Palier supérieur :

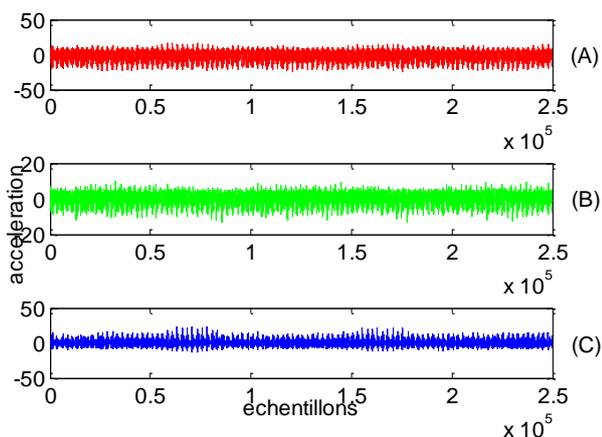
Etat sain            60 signaux

La cage            60

La bague           60

La bille (Ball fault) 60

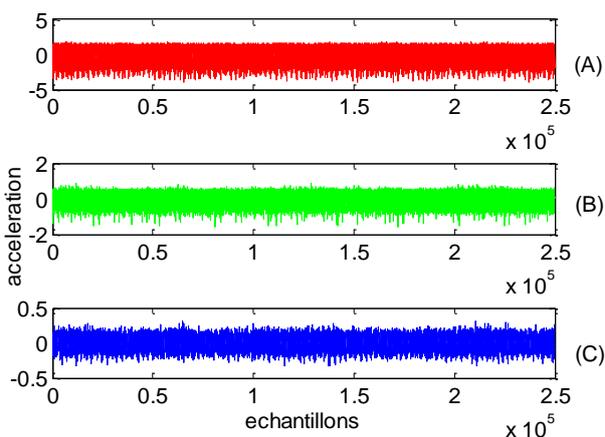
D'après cette expérience on a extrait les différents signaux des défauts pour les différents états (l'état sain, défaut sur la bille, défaut sur la bague, défaut sur la cage) comme représenté la figure 5.



Vibrations du palier à l'état sain :

(A) laxe x. (B) laxe y.(C) laxe

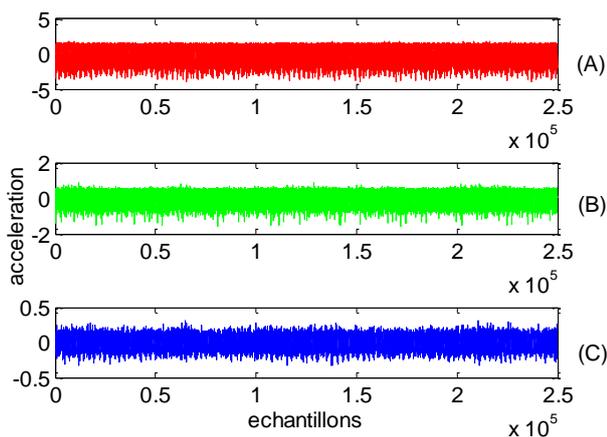
(a)



Vibrations du palier (la cage) :

(A) laxe x. (B) laxe y.(C) laxe z

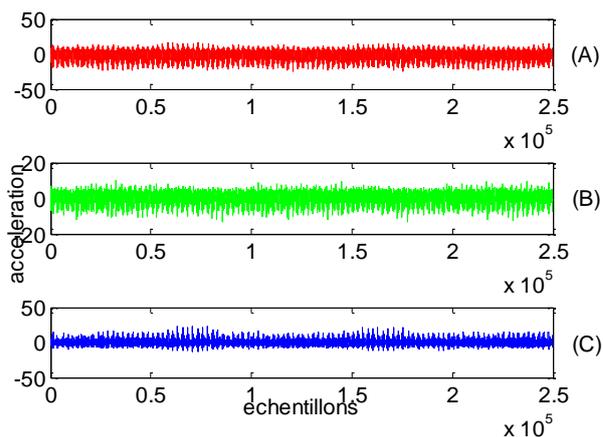
(b)



Vibrations du palier (la bille) :

(A) laxe x. (B) laxe y.(C) l'axe z

(c)



Vibrations du palier (la bague) :

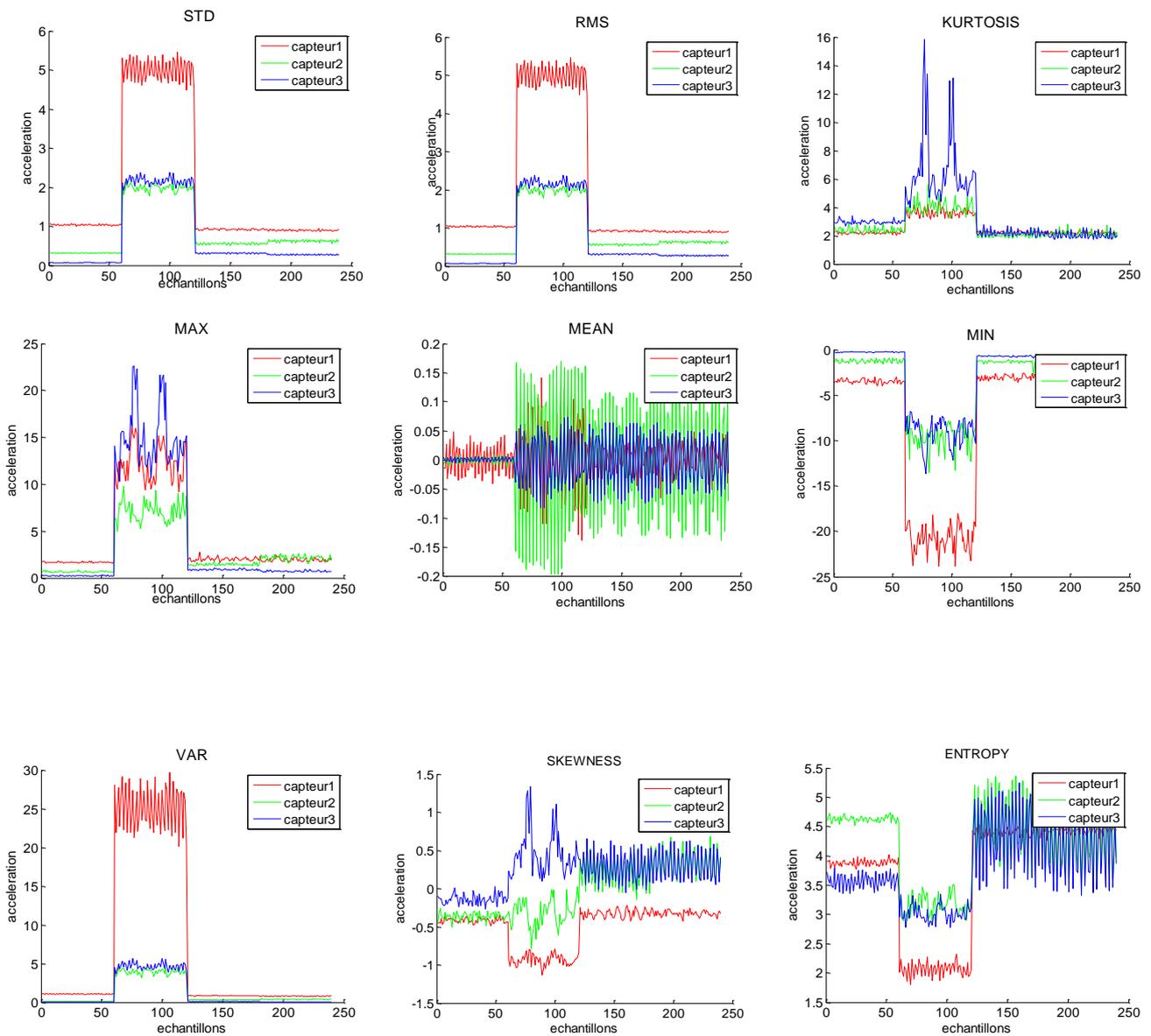
(A) l'axe x. (B) laxe y.(C) laxe z

(d)

**Figure II.5** : les vibrations de palier extérieur pour les quatre états

Pour traiter les signaux il faut extraire les caractéristiques des signaux comme suit à la figure 6

**II.7. Extraction des caractéristiques de signal :**



**Figure II.6** Extraction des caractéristiques de signal

La figure (II.6) représente les indicateurs qu'on a extraits du signal vibratoire ces caractéristiques vont être utilisées pour la classification des défauts des roulements.

D'après cette figure il est clair qu'il est presque impossible d'apprentissage automatique qui est l'objet du troisième chapitre

**II.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a trouvé que juste avec le traitement de signal n'est pas efficace pour la détection des défauts c'est pour cela on va introduire l'intelligence artificielle dans le prochain chapitre.

*Chapitre 3*

*Classification de*

*défauts des roulements*

*par l'intelligence*

*artificielle*

### **III.1 Introduction :**

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode efficace et stable pour la détection et l'identification des défauts de roulement . Notre méthode est basée sur les techniques de L'intelligence artificielle.

L'intelligence artificielle est une discipline de l'informatique qui a pour but de créer des machines intelligentes, Le terme a beaucoup évolué au fil du temps et Cette méthode contient plusieurs techniques, d'après l'évolution nous avons réussi à utiliser l'intelligence artificielle dans le diagnostic des roulements et la classification des défauts ,en parallèle l'utilisation d'intelligence artificiel dans le domaine de diagnostic des machines et surveillance dépend de traitement des donnée (signal).

Dans ce chapitre on va parler sur les différentes techniques d'intelligence artificielle et la classification des défauts.

### **III.2 Définition d'intelligence artificiel [15] :**

Qu'est-ce que l'intelligence ? Est-ce la capacité à percevoir le monde, à prédire le futur immédiat ou lointain, ou à planifier une série d'actions pour atteindre un but ? Est-ce la capacité d'apprendre, ou celle d'appliquer son savoir à bon escient ? La définition est difficile à cerner. On pourrait dire que l'intelligence artificielle (IA) est un ensemble de techniques permettant à des machines d'accomplir des tâches et de résoudre des problèmes normalement réservés aux humains et à certains animaux. Les tâches relevant de l'IA sont parfois très simples pour les humains, comme par exemple reconnaître et localiser les objets dans une image, planifier les mouvements d'un robot pour attraper un objet, ou conduire une voiture. Elles requièrent parfois de la planification complexe, comme par exemple diagnostic ou jouer aux échecs. Les tâches les plus compliquées requièrent beaucoup de connaissances et de sens commun, par exemple pour traduire un texte ou conduire un dialogue. [Yann LeCun]

- Cette méthode d'intelligence artificiel dépend les données des machines ou bien l'éléments concernés pour faire l'apprentissage sur les différents états des machines et détecter le changement de fonctionnement.

### **III.3 Domaine d'utilisation :**

L'intelligence artificielle a été utilisée (ou intervient) dans une variété de domaines tels que :

## **Chapitre III classification des défauts de roulement par les techniques d'intelligence artificielle**

-la banque, avec des systèmes Experts d'évaluation de risque lié à l'octroi d'un crédit (crédit-scoring).

- le militaire, avec les systèmes autonomes tels que les drones, les systèmes de commandement et l'aide à la décision.

- les jeux.

- la médecine avec les systèmes Experts d'aide au diagnostic.

- la logistique, au travers d'approches heuristique de type résolution de problème de satisfaction de contraintes.

### **III.4 Diagnostic :**

#### **III.4.1 Diagnostic par l'intelligence artificielle :**

L'intelligence artificielle est une discipline scientifique recherchant des méthodes de résolution de problèmes à forte complexité logique ou algorithmique. Son utilisation permet de pallier la complexité des systèmes à diagnostiquer. La classification des méthodes en l'absence de modèle du procédé est quelque peu réductrice. On retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle qui inclut la méthode EXTRA TREE les réseaux de neurones et la logique floue...etc.

### **III .5 L'apprentissage automatique :**

Est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité « apprendre » à partir de données, c'est-à-dire d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. Plus largement, il concerne la conception, l'analyse, l'optimisation, le développement et l'implémentation de telles méthodes. [16]

### **III.6 La classification :**

La classification a pour but de regrouper (partitionner, segmenter) observations en un certain nombre de groupes ou de classes homogènes. Il existe deux principaux types de classification :

- La classification supervisée, souvent appelée simplement classification.

- La classification non supervisée, parfois appelée partitionnement, segmentation ou regroupement (*Clustering* en anglais).

### **III.6.1 Classification supervisée :**

- On connaît déjà le nombre de groupes qui existent dans la population ;
- On connaît le groupe auquel appartient chaque observation de la population ;
- On veut classer les observations dans les bons groupes à partir de différentes variables.

### **III.6.2 Classification non supervisée :**

- On ne connaît souvent pas le nombre de groupes qui existent dans la population ;
- On ne connaît pas le groupe auquel appartient chaque observation de la population ;
- On veut classer les observations dans des groupes homogènes à partir de différentes variables.

### **III.7 Les classifieurs :**

Sont des algorithmes d'apprentissage automatique, utilisés en machine Learning pour résoudre des problèmes de classification, de régression ou de détection d'anomalie.

#### **III.7.1 les différents classifieurs :**

- SVM (support Vector machine).
- LsSvm (Least Squares Support Vector Machine).
- KNN (k-nearest neighbors).
- ELM (Extreme learning machine).
- DT (decision tree)
- RF (Random forest).
- ET (Extra trees).

##### **III.7.1.1 classification par la méthode SVM :**

Une machine à vecteurs de support, traduction littérale pour Support Vector Machine, est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé qui peut être utilisé à des fins de classification et de régression. Les SVM sont plus généralement utilisés dans les situations de

classification.

Les SVM reposent sur l'idée de trouver un hyperplan qui divise au mieux un jeu de données en deux classes.

### **III.7.1.1.1 Vecteurs de support**

Les vecteurs de support sont les points de données les plus proches de l'hyperplan.

Les points d'un ensemble de données, s'ils étaient supprimés, modifieraient la position de l'hyperplan en division. Pour cette raison, ils peuvent être considérés comme des éléments prépondérants d'un ensemble de données.

### **III.7.1.2 classification par la méthode de LS-SVM :**

Le nouvel algorithme de boosting de Least-Squares Support Vector Machine (LS-SVM) que nous présentons vise à la classification de très grands ensembles de données sur des machines standard. Les méthodes de SVM et de noyaux permettent d'obtenir de bons résultats en ce qui concerne la précision mais la tâche d'apprentissage pour de grands ensembles de données demande une grande capacité mémoire et un temps relativement long. Nous présentons une extension de l'algorithme de LS-SVM proposé par Suykens et Vandewalle pour le boosting de LS-SVM. A cette fin, nous avons ajouté un terme de régularisation de Tikhonov et utilisé la formule de Sherman-Morrison-Woodbury pour traiter des ensembles de données ayant un grand nombre de dimensions. Nous l'avons ensuite étendu par application du boosting de LS-SVM afin de traiter des données ayant simultanément un grand nombre d'individus et de dimensions. [17]

### **III.7.1.3 classification par la méthode knn :**

(K-Nearest-Neighbors) Les K plus proches voisins, connus en anglais sous le nom K-Nearest Neighbors (K-NN) est une méthode d'apprentissage non paramétrique qui ne nécessite pas de construction de modèle [12], c'est l'échantillon d'apprentissage, associé à une fonction de distance et d'une fonction de choix de la classe en fonction des classes des voisins les plus proches, qui constitue le modèle. Pour prédire la classe d'un exemple donné, l'algorithme cherche les K plus proches voisins de ce nouveau cas et prédit la réponse la plus fréquente de ces K plus proches voisins [13]. Le principe de décision consiste tout simplement donc à calculer la distance de l'exemple inconnu à tous les échantillons fournis. L'exemple est alors affecté à la classe majoritaire représenté parmi ces K échantillons. La méthode utilise deux

paramètres : le nombre  $K$  et la fonction de similarité pour comparer le nouvel exemple aux exemples déjà classés [14].

#### **III.7.1.4 classifications par extrême machine Learning :**

Le terme extreme learning machine fait référence à un type de réseau de neurones. Sa spécificité est de n'avoir qu'une seule couche de nœuds cachés, où les poids des entrées de connexion de nœuds cachés sont répartis au hasard et jamais mis à jour. Ces poids entre les nœuds cachés d'entrée et les sorties sont appris en une seule étape, ce qui revient essentiellement à l'apprentissage d'un modèle linéaire. Le nom "extreme learning machine" (ELM) a été donné à ces modèles par Guang-Bin Huang, mais le principe était déjà connu. [18]

#### **III.7.1.5 classifications par l'arbre de décision (DT) :**

L'apprentissage par arbre de décision consiste à construire un arbre depuis un ensemble d'apprentissage constitué de  $n$ -uplets étiquetés. Un arbre de décision peut être décrit comme un diagramme de flux de données (ou *flowchart*) où chaque nœud interne décrit un test sur une variable d'apprentissage, chaque branche représente un résultat du test, et chaque feuille contient la valeur de la variable cible (une étiquette de classe pour les arbres de classification, une valeur numérique pour les arbres de régression [19]

#### **III.7.1.6 classifications par Random Forest :**

Random Forest est un ensemble d'algorithmes d'apprentissage qui construit de nombreux arbres de décision au cours de la formation. Il prédit le mode des classes pour les tâches de classification et la prédiction moyenne des arbres pour les tâches de régression. Il utilise une méthode de sous-espace aléatoire et un ensachage lors de la construction de l'arbre. Il a une importance de fonctionnalité intégrée. [20].

#### **III.7.1.7 classifications par extra tree :**

L'algorithme Extra-Trees construit un ensemble de décisions élaguées ou des arbres de régression selon le mode opératoire classique de haut en bas. Ses grandes différences avec les autres méthodes de classification avec les arbres de décision sont qu'il divise en choisissant des nœuds seuils entièrement au hasard. [21]

Dans cette section on va utiliser les techniques de classification mentionnées précédemment pour la classification des features obtenu dans le chapitre 2.

### Chapitre III classification des défauts de roulement par les techniques d'intelligence artificielle

Le but est de sélectionner la technique qui nous donne une meilleure classification en termes de précision et de stabilité.

La figure (1) Représente la matrice de confusion pour différente technique de classification.

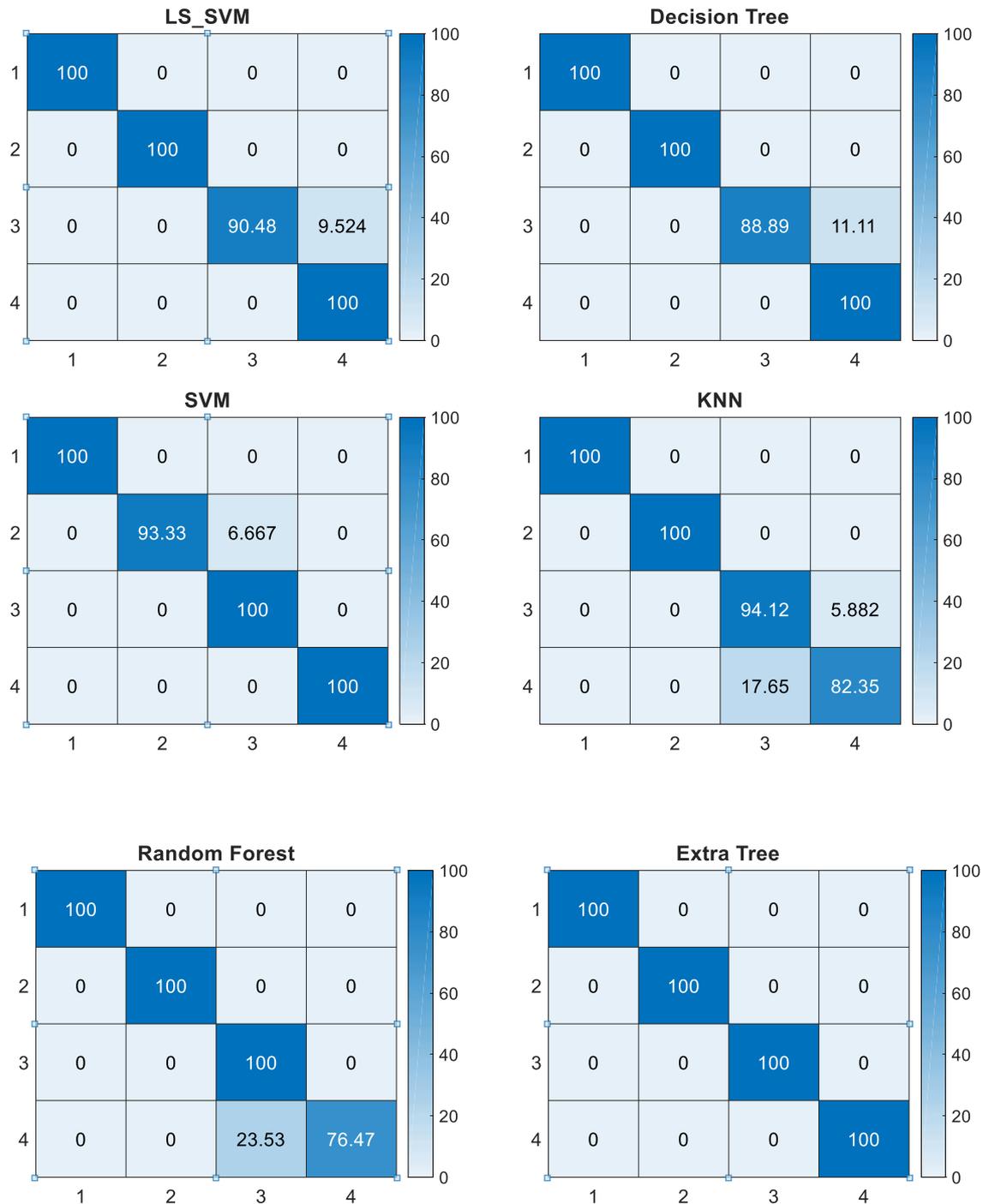


Figure III .1 : matrices de confusions avec 10 caractéristiques

la figure (1) représente Les matrices de confusion représenter l'accuracy de classification pour chaque classe.

### Chapitre III classification des défauts de roulement par les techniques d'intelligence artificielle

Afin d'étudier la stabilité et la précision de techniques de classification on a remarqué que le meilleur classifieur dans notre cas est l'extra tree. Elle nous donne résultat parfaite

La figure (2) Représente le graphe des résultats pour différente technique de classification.

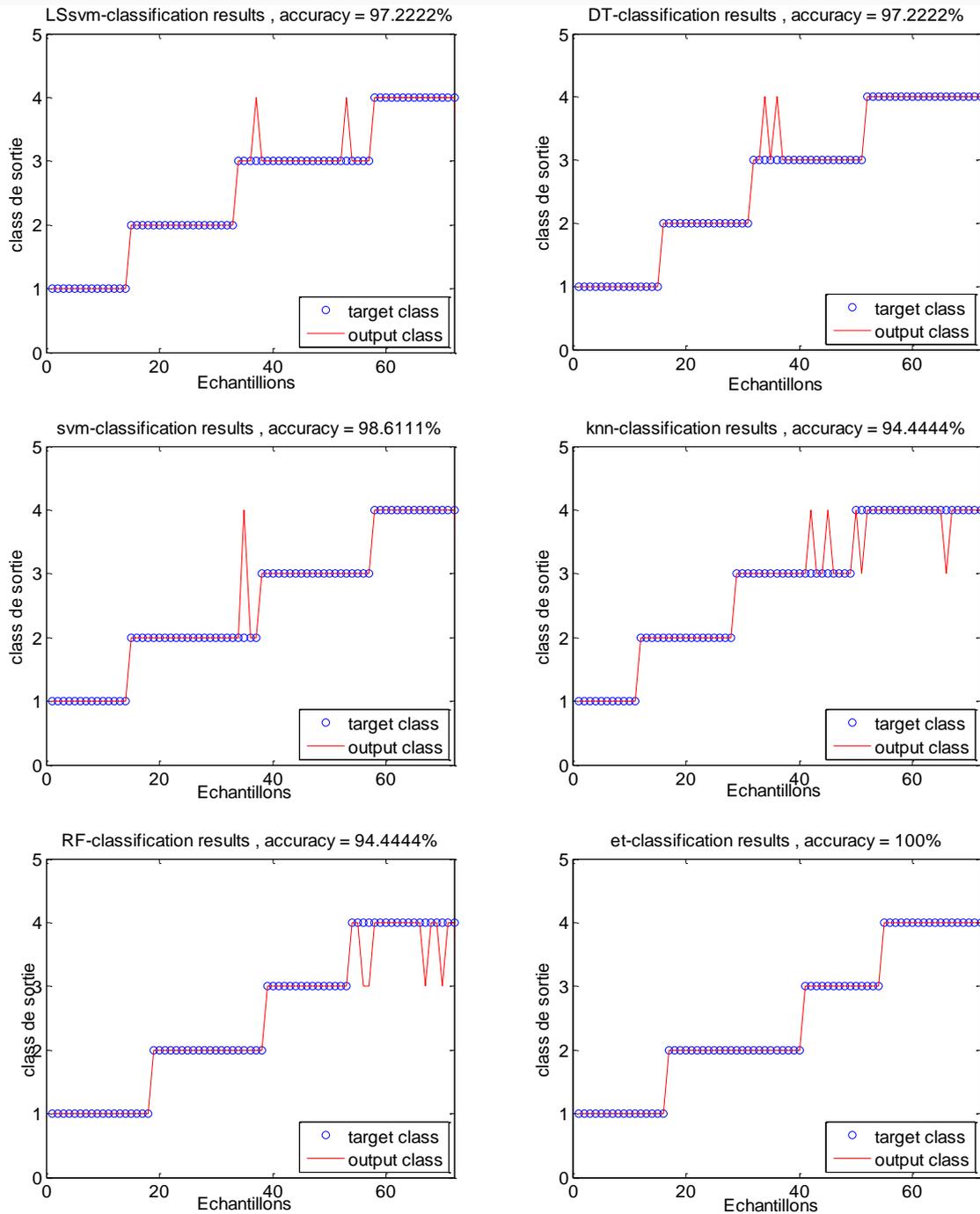


Figure III.2. Les résultats de classification avec 10 caractéristiques

### Chapitre III classification des défauts de roulement par les techniques d'intelligence artificielle

Figure (2) représente les résultats de classification pour les différents classifieurs l'aide de faire une comparaison entre (Target class) et les résultats obtenue (output class).

Afin d'étudier la stabilité de techniques de classification on a réalisé plusieurs tests. Les résultats obtenus sont donnés sur le tableau (1)

D_T	LSsvm	SVM	Knn	ET	R_F
100	100	98,61	97,22	100	98,61
97,22	98,61	98,61	97,22	100	100
100	100	100	98,61	100	100
93,05	100	100	98,61	100	100
98,61	100	100	93,05	100	100
98,61	100	100	97,22	100	95,83
98,61	100	100	94,44	100	100
100	100	100	94,44	100	100
98,61	100	98,61	94,44	100	100
97,22	100	98,61	89,61	100	100
Max	100	100	98,61	100	100
Min	93,05	98,61	98,61	93,05	95,83
Moy	98,19	99,86	99,44	96,38	99,44
Std	2,07	0,43	0,71	2,09	1,34

Tableau III.1 les résultats des classifieurs

- Tableau III.1 représenté les résultats des différentes méthodes : D\_T (discision tree), LSSVM (Least Squares Support Vector Machine), SVM (support Victor machine), KNN (k-nearest neighbors), ET (Extra trees), RF (Random Forest).

D'après le tableau suivant on a trouvé que le classifieur EXTRA TREE a une accuracy moyenne de 100% et un écart type de 0 ce qu'implique une bonne stabilité et une performance élevée.

### **III.10 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons utilisé les model d'intelligence artificiel pour détecter et identifier les défauts de roulement. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode proposée dans notre étude.

## **Conclusion générale :**

Le roulement est un élément essentiel dans chaque machine tournante. Son intérêt réside sur le fait que cet élément forme un support de lien entre deux structures tout en facilitant leur mouvement en réduisant la force de frottements entre eux.

Dans ce mémoire nous avons proposé une nouvelle méthode de diagnostic en utilisant des indicateurs statistiques et des techniques d'intelligence artificielle dans le but de détecter et d'identifier les défauts des roulements.

Nous avons comparé notre méthode avec plusieurs techniques de classification et les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la méthode proposée en termes de accuracy et de stabilité.

Le 1<sup>er</sup> chapitre a été consacré à une généralité sur les roulements et les différents types des roulements, on a vu les différents types de maintenances, puis on a présenté la surveillance et les tâches essentielles de diagnostic et les étapes pour le faire.

Le 2<sup>ème</sup> chapitre on a donné un état de l'art sur traitement de signal et ces indicateurs. On a parlé aussi à l'expérience et l'extraction des caractéristiques.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre a été divisé en deux parties, la 1<sup>ère</sup> c'était un rappel au classifieur que on a utilisé dans notre programme (Knn, Extra tree, Random forest, SVM, Lssvm, extra laning machine)

Dans la 2<sup>ème</sup> partie nous avons classifié les indicateurs de signaux et choisie le meilleur classifieur d'après les matrices de confusion est on a vu que l'extra tree nous donne des résultats parfaits.

**Bibliographies:**

[1] - Q. Meng, L. Qu, *Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, Mechanical Systems and Signal Processing*, pp 155-166, 1991.

[2] © 2017 - GRB Bearings. All right reserved.

[3] AMRANI Mohamed ; *Surveillance et diagnostic d'une ligne de production par les réseaux de neurones artificiels. Mémoire magister201*

[4] CA Paris, 14 décembre 1995, Tom Asi, *Expertises 1996*, p. 161.

[5] Touafek.I, *Extraction d'indicateurs robustes pour le diagnostic des défauts mécaniques, comparaison L4EMD et des ondelettes (WT), université ferhatabbes, Stif*

[6] J.N.Chatain, « *Diagnostic par système expert* », Ed, Hermés Paris, 1993.

[7] C.Faure, L.Miclet, « *Intelligence artificielle et reconnaissance des formes* », *technique de l'ingénieur, H1900*, 1990.

Yadolah Dodge, « *The Concise Encyclopaedia of Statistics* », New York, Springer, 2010,

[8] F.Filippetti, G.Franceschini, C.Tassoni, P.Vas, « *A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnosis based on stator current monitoring* » *IEEE-KTH, Stocholm, Sweden, pp.156-161, 1995.*

[9] (UNISCIEL.pédagothèque de l'Université numérique thématique unisciel.In *L'Université des science en ligne.[Consulté le mars 2011].*)

[10] Guy Binet : *Traitement numérique du signal - Signaux et systèmes discrets. Ellipses, 2013*

[11] Morel j.-*techniques de l'ingénieur, tritémesurs et contrôle, surveillance vibratoire et Maintenance prédictive, R6100.1999*

[12] Léon Brillouin, *La science et la théorie de l'information, Masson (1959), réédité par Gabay (1988)*

[13] [http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page\\_01.html#SEC2](http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page_01.html#SEC2)

[14] *Dr.RAHMOUNE CHemseddine- M.DRIF Aymen-M.BENTOUATI Fouad*

*[Classification des défauts d'engrenage par la méthode K plus proche voisins-KNN]2019-2020*

[15] <https://www.college-de-france.fr>

[16] (en) *Bishop, C. M. (1995). Neural Networks for Pattern Recognition, Oxford University Press. (ISBN 0-19853-864-2).*

[17] *Thanh-Nghi Do, François Poulet*  
*Régression logistique pour la classification d'images à grande échelle. In EGC 2016, pp.309-320*

[18] *Lipo P. Wang et Chunru R. Wan, « Comments on “The Extreme Learning Machine” », IEEE Trans. Neural Networks, 2008*

[19] *L. Breiman, J. Friedman, R. Olshen, C. Stone: CART: Classification and Regression Trees, Wadsworth International, 1984.*

[20] *Breiman Leo, Random Forests, Machine Learning vol.45, pp. 5–32, 2001*

[21] <http://www.montefiore.ulg.ac.be/services/stochastic/pubs/2005/MGPW05a/maree-icml-mlmm05.pdf>