

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf – M'sila

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° :.....



DOMAINE : SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE.

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : ELECTRONIQUE
D'INSTUMENTATION.

**MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE**

PAR :

**LEGMA MOHSEN
BERRIK YAHIA**

Intitulé

***CLASSIFICATION DES DEFAUTS D'UN
MOUTEUR PAR RESEAU DE NOURONE
ARTIFICIEL***

Soutenu devant le jury composé de:

Mr	Université de M'sila	Président
Mr Tabbakh Mostefa	Université de M'sila	Rapporteur
Mr.....	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Le travail développé dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Développement d'Electriques de l'université Mohamed Boudiaf -M'sila.

On tient en particulier à exprimer notre reconnaissance à Monsieur M. TABBAKHE pour avoir accepté de nous encadrer dans cette étude.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre projet en acceptant d'examiner notre travail.

Merci à vous

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chères

A mes chers parents qui m'ont toujours encouragé symbole de tendresse Pour leurs sacrifices
inestimables.

A mes frères ...

A mes sœurs

A toute ma famille

A mon encadreur Mr tabbakhe

Ahmed A mon binôme mohsen LEGMA

A tous les enseignants qui m'ont enseigné.

A tous mes amis

yahia BRIK

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère

A mon chère père

A tous mes frère et mes sueurs

A tout la famille et tous les amis...

Mohsen LEGMA

Sommaire

Introduction général :	1
Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des moteurs asynchrones.....	2
Introduction :	4
I. La machine asynchrone :.....	4
I.1. Constitution de la machine asynchrone.....	5
I.1.3 Organes mécaniques :	8
I.2-Principe de fonctionnement du moteur asynchrone :.....	10
A. Le glissement :.....	10
B. La vitesse du moteur :.....	11
C-cammende de moteur :.....	11
-Position du problème :	12
Conclusion :.....	13
Chapitre II : Diagnostic de la machine asynchrone	14
Introdiction :	15
I. Principaux défauts affectant le moteur asynchrone :	15
I.1. Principales causes des défauts :.....	15
I.3. Défaillance d'ordre mécanique :	18
I.4. Défaillance d'ordre électrique :.....	27
I.5. Impacts des défauts sur le fonctionnement des moteurs :.....	30
Conclusion :.....	30
Chapitre III :	31
Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone	31
Introduction :	32
I. Classification des méthodes de diagnostic :.....	32
I.1 Approche à base de modèle qualitatif :	33
I.1.2 Approche à base de modèle quantitatif :.....	34
I.1.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives :.....	34
I.1.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives :.....	35
I.2-Analyse de procédure du diagnostic :.....	35
I.3-Diagnostic d'un moteur asynchrone:	36
I.4. Techniques du diagnostic des défauts dans le moteur asynchrone :	37
I.5. Réseaux de neurones :.....	40

I. 5.1. Principe et définitions :	40
I.5.2. Perceptrons multicouches :	41
5. Conclusion	48
Chapitre IV : Diagnostic par RNA des défauts d'un moteur.....	50
I.Introduction :.....	51
II.Partie diagnostic du défaut :.....	53
II.1.Extraction des caractéristiques pour l'apprentissage du RNA :.....	53
Conclusion :.....	58
Conclusion générale :	59

Liste des Figures

Figure 1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	5
Figure 2 :vue schématique en perspective du stator(circuit magnétique, conducteurs d'encoches, tête de bobines).(enroulement statorique d'une machine a 4 pôles) [SCH99].	6
Figure 3 :vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit [SCH99].	7
Figure 4 :Eléments d'un roulement.	8
Figure 5 :Le palier	9
Figure 6 Schéma électrique du commande de moteur.....	12
Figure 7 :Répartition des défauts affectant le moteur asynchrone (1999) [].	17
Figure 8 Répartition des défauts affectant le moteur asynchrone Bonnet 2008 [].	18
Figure 9 :Flasque défectueux.	19
Figure 10 :Défauts au l'arbre.....	20
Figure 11 :Ventilateur défectueux	21
Figure 12 :Représentation d'un roulement à bille avec défauts.	22
Figure 13 :Types d'excentricité.....	23
Figure 14 : Types de désalignement d'arbres.....	25
Figure 15 :Désalignement angulaire []	26
Figure 16 :Désalignement parallèle.....	26
Figure 17 :Piqûres (pitting)	27
Figure 18 :Les méthodes de diagnostic	33
Figure 19 :Méthode de diagnostic par analyse de résidus	37
Figure 20 représentation d'un neurone.....	40
Figure 21 :Réseau de neurones de type perceptron à une couche cachée	42
Figure 22 :schéma synoptique du procédé d'apprentissage du réseau de neurones.....	43
Figure 23: Structure du système de diagnostic des défauts.....	52
Figure 24: Signal courant mesuré à partir du moteur état sain.	55
Figure 25: Signal courant mesuré à partir du moteur avec un défaut 01 barre.....	56
Figure 26: Signal courant mesuré à partir du moteur avec un défaut 02 barre.....	56
Figure 27: Représentation spectral du signal mesuré sain.....	57
Figure 28: Représentation spectral du signal mesuré avec défaut 01 barre.....	57
Figure 29: Représentation spectral du signal mesuré avec défaut 02 barre.....	58

Liste des tableaux :

Tableau 1 :Classification des défauts des machines électriques selon leurs origines	16
Tableau 2:Synthèse des défaillances du stator d'un moteur asynchrone [].....	29
Tableau 3:Synthèse des défaillances du rotor d'un moteur asynchrone.	30
Tableau 4:Synthèse des différentes techniques de diagnostic.....	40
Tableau 5: Architecture propose pour le RNA.....	54

Introduction général

Le diagnostic des machines électrique s'est fortement développé dans le monde industriel car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient, pour certaine application, indispensable. Les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiable car une quelconque défaillance, même la plus anodine, peut mener à un dommage matériel ou l'arrêt du moteur ce qui provoque des pertes financières significatives. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des méthodes de diagnostic. Celles-ci ont pour premier objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système.

Notre projet de fin d'études a pour but l'étude et diagnostic des défauts affectant les moteurs asynchrone triphasés à cage d'écureuil.

L'intérêt pour ce type de machine est dû à son utilisation croissante dans le secteur industriel vu sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et de fabrication, sa robustesse mécanique ou encore à sa quasi-absence d'entretien. Cependant, soumis à certaines contraintes de différentes natures (thermiques, électrique, mécanique et d'environnement), ce moteur peut être affecté par certains défauts .

Parmi ces défauts, les défaillances d'ordre mécanique sont statistiquement les plus importantes. Ces défauts, peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre du moteur. Des études statistiques montrent que les défauts de roulement représentent 40 à 60 % des défauts affectant les moteurs. Pour cela, la mise en œuvre de techniques de diagnostic sophistiquées et adéquates, est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement du moteur .

Parmi les techniques de diagnostic utilisées, on cite la réseau de neurone . Cette technique est la plus utilisée en industrie pour réaliser une surveillance et un diagnostic efficace afin de détecter l'apparition et l'évolution de la plupart des défauts mécaniques.

Notre projet de fin d'études est axé sur l'étude de diagnostic des moteurs asynchrones par réseau de neurone artificiel. Ce mémoire est organisé en 4 chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons les terminologies utilisées en diagnostic et en maintenance industrielle. Nous présentons, par la suite, les principales parties constituant le moteur asynchrone ainsi que les défauts pouvant les affecter. Ensuite, nous présentons quelques techniques de détection de ces défauts. Ce chapitre est clôturé par une synthèse des différentes techniques de diagnostic.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de faire un rappel sur la constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que sur les principaux défauts pouvant l'affecter tout en précisant leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement du moteur

Dans le troisième chapitre La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale portant sur les travaux effectués et par une présentation des perspectives de recherche pouvant être envisagées.

Chapitre I :

Généralités sur le

diagnostic des moteurs

asynchrones

Introduction :

Le diagnostic est une composante principale d'un module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Il s'appuie sur une connaissance a priori des modes de fonctionnement et sur une connaissance instantanée matérialisée par une nouvelle observation de l'état du système. Il existe plusieurs approches pour réaliser le diagnostic, le choix d'une approche est lié au mode de représentation de la connaissance.

La première partie de ce chapitre fait état des différentes origines (électriques, mécaniques,...) des défaillances qui peuvent se produire sur la machine asynchrone. Débute par un rappel sur la constitution des machines électriques, et plus particulièrement sur celle de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous évoquerons essentiellement des défauts qui peuvent survenir tant au stator qu'au rotor et d'enroulements de la machine.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous arborons sur les différentes approches de diagnostic est leurs domaines d'applications. A partir de ces considérations, nous proposons une classification non exhaustive des méthodes de diagnostic selon trois axes : les méthodes reposant sur une approche signal, les méthodes basées sur une approche système et les méthodes de prises de décision.

I. La machine asynchrone :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc...).

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies.

I.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence, on définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit. Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la Figure 1.

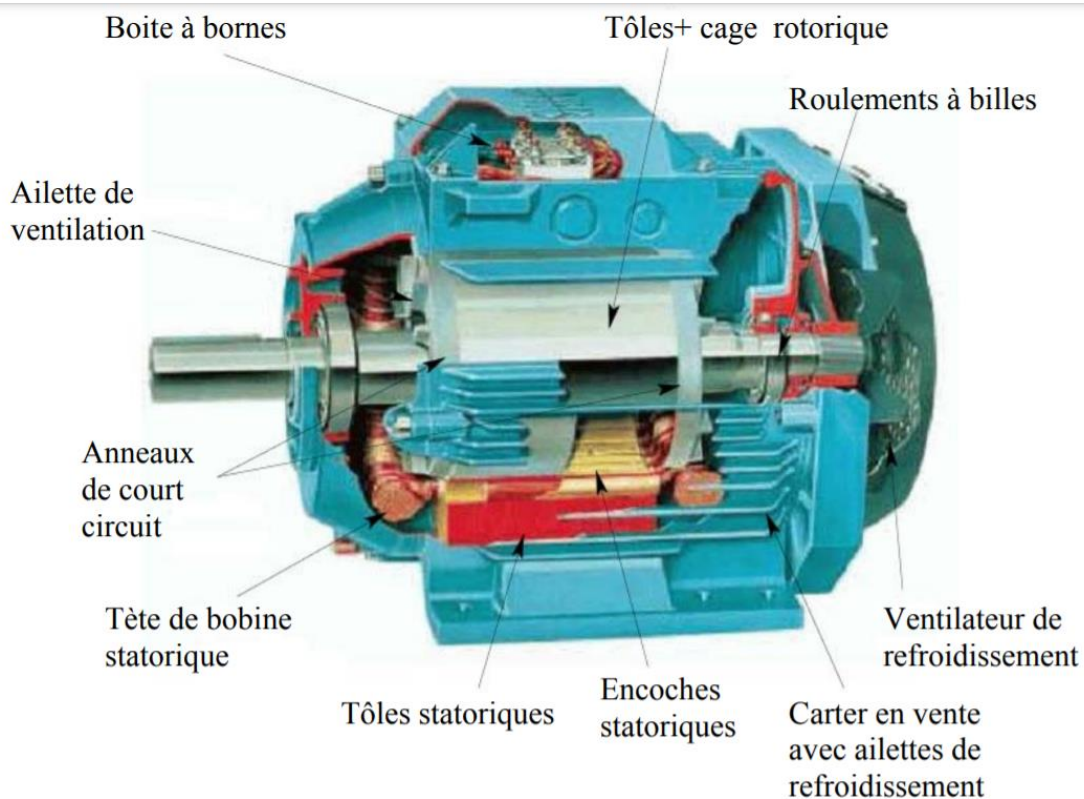


FIGURE 1 : ELEMENTS DE CONSTITUTION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE D'ECUREUIL

1.1.1. Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

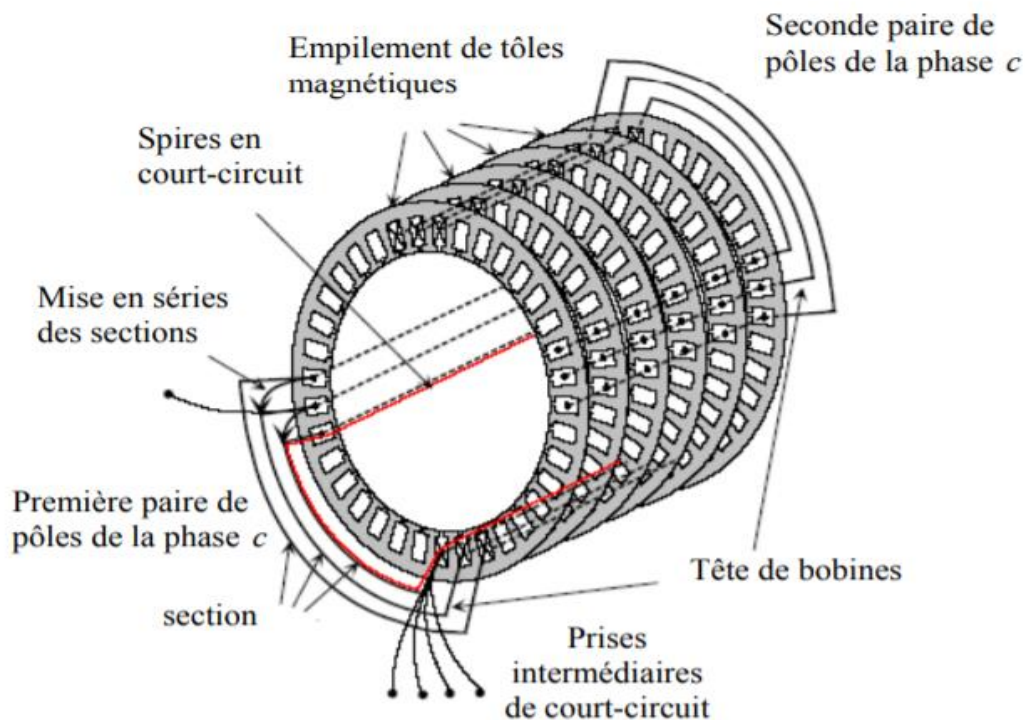


FIGURE 2 :VUE SCHEMATIQUE EN PERSPECTIVE DU STATOR(CIRCUIT MAGNETIQUE, CONDUCTEURS D'ENCOCHES, TETE DE BOBINES).(ENROULEMENT STATORIQUE D'UNE MACHINE A 4 POLES) [SCH99].

1.1.2 Le rotor à cage :

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barre rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure 1.3). Cette cage est insérée à

l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [Ker 84]ⁱii. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).

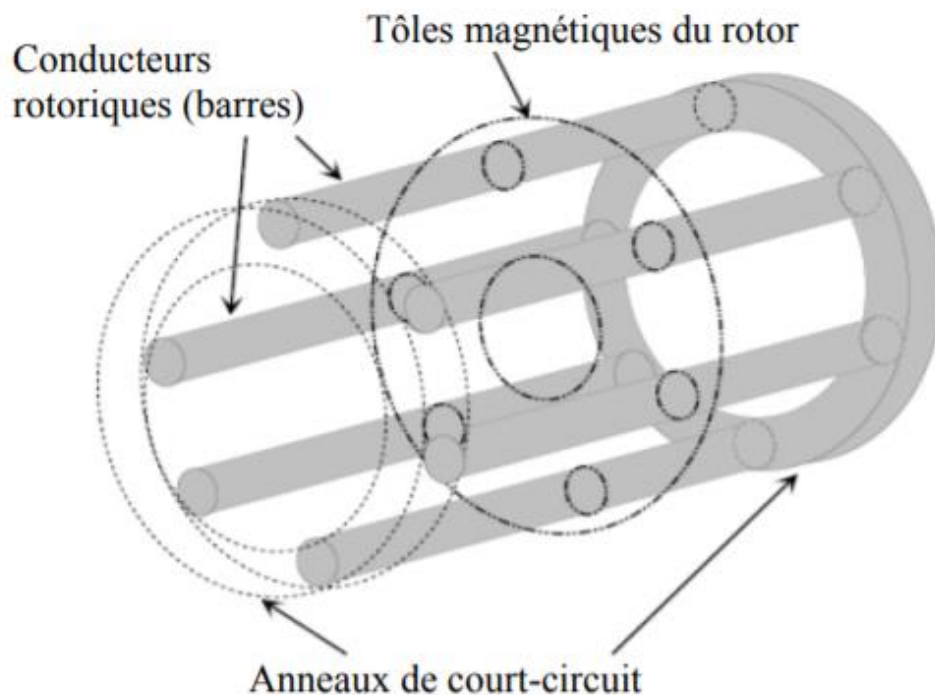


FIGURE 3 : VUE SCHEMATIQUE EN PERSPECTIVE DU ROTOR (TOLES MAGNETIQUES, CONDUCTRICES D'ENCOCHES (BARRES) ET ANNEAUX DE COURT-CIRCUIT [SCH99]ⁱⁱⁱ.

1.1.3 Organes mécaniques :

Parmi les principaux organes mécaniques du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil, on cite :

A-LES ROULEMENTS :

Le roulement est un organe mécanique, il permet la transmission des charges (efforts) entre deux pièces en rotation relative l'une par rapport à l'autre avec un frottement très réduit. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement est composé des éléments suivants ^{iv}:

- La bague extérieure.
- La bague intérieure.
- Les éléments roulants.
- La cage

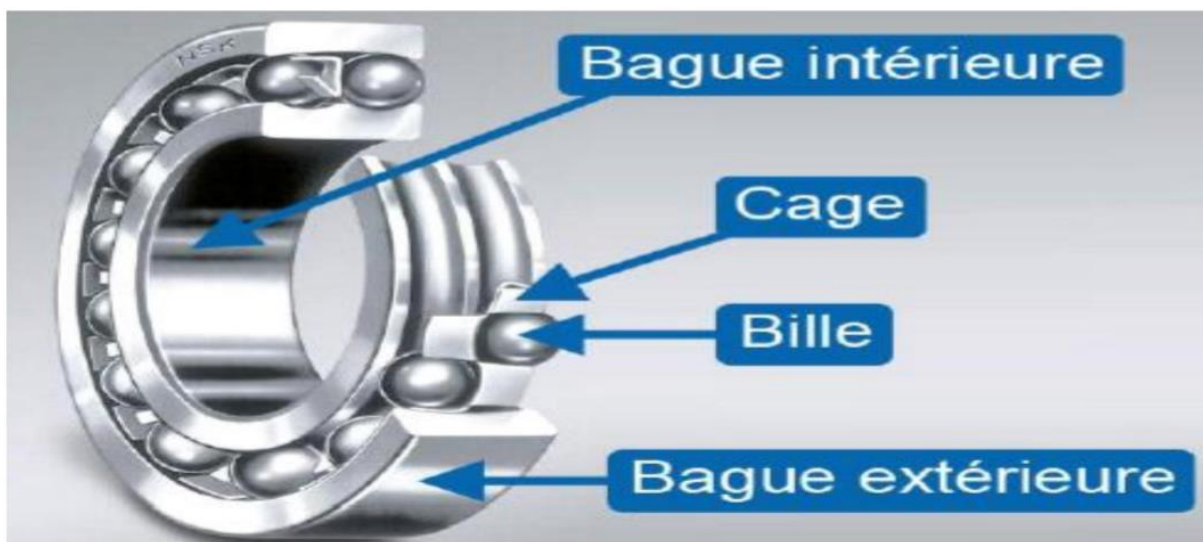


FIGURE 4 :ELEMENTS D'UN ROULEMENT.

B-LES PALIERS :

Le palier est un organe mécanique dont le rôle est de supporter et de guider en rotation des arbres de transmission. Suivant l'usage utilisé, ces paliers peuvent être :

- Lisses : Dans le cas où les arbres qui reposent sur les coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- A roulement : Dans le cas où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux dans de cage.

Le palier supporte l'arbre de la machine via la bague intérieure qui est fixée par une vis de blocage ou par un collier excentrique. 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 [V] :

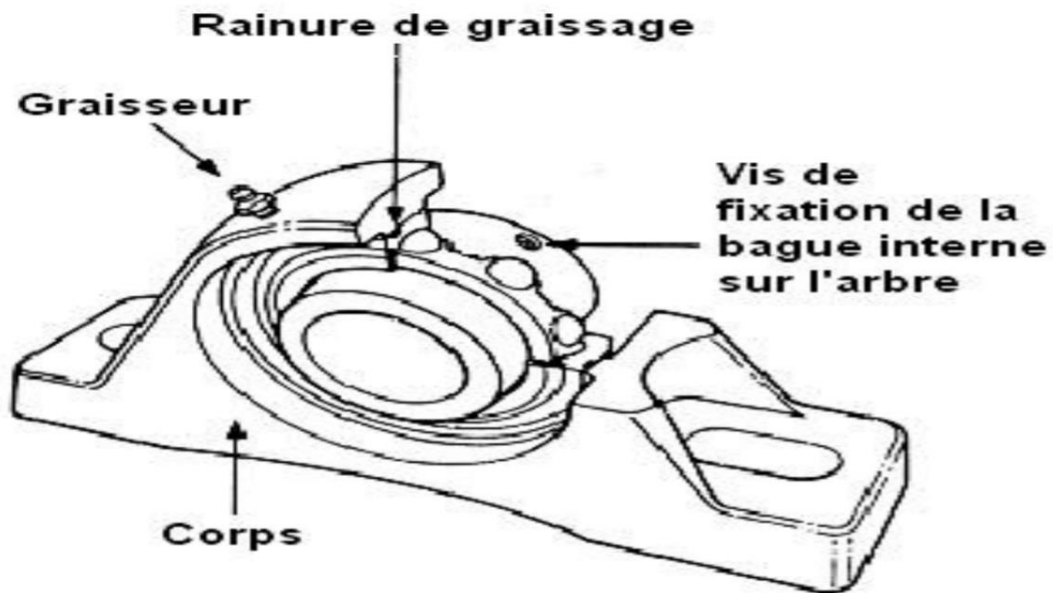


FIGURE 5 :LE PALIER

C-L'ARBRE :

C'est un organe de transmission. Il est généralement fabriqué en acier moulé ou forgé. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor. A une de ses extrémité est monté le ventilateur et éventuellement le frein, à l'autre extrémité on trouve l'arbre de sortie avec une rainure de clavetage pour le montage du pignon d'entraînement ou relié à la charge via un accouplement. L'arbre est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation.

D-LA CARCASSE (OU CARTER) :

Elle est fabriquée en fonte grise pour les gros moteurs et en aluminium injecté pour les petits moteurs. Elle sert de support et joue le rôle d'enveloppe pour assurer une protection contre l'environnement extérieur. La boîte à bornes sur laquelle s'effectuent les branchements est fixée sur le dessus ou sur le côté de la carcasse.

E-LES FLASQUES (OU CALOTTES) :

Ils ferment le carter du moteur à ces deux extrémités et sont réalisés en fonte grise ou en aluminium injecté. Les flasques sont centrés sur le carter et réunis entre eux par des tirants ou tiges d'assemblage ils permettent aussi d'orienter le flux d'air vers les ailettes du carter.

F-LE VENTILATEUR :

Il est placé à l'extrémité du moteur, et permet le refroidissement.

I.2-Principe de fonctionnement du moteur asynchrone :

Le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone repose entièrement sur l'interaction électromagnétique. En effet, l'enroulement statorique étant alimenté par un courant symétriques triphasé de pulsation ω_s , crée un champ tournant de vitesse synchronisme $n_s = \frac{60f_s}{p}$, étant le nombre de paires de pôles. Ce champ tournant engendre une f.é.m. dans le rotor, le rotor étant en court-circuit va produire un courant rotorique. La présence d'un champ magnétique et d'un courant électrique crée une force mécanique appelée force de Laplace qui va générer un couple qui fait tourner le moteur [^{vi}].

A. Le glissement :

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse n_r (Tours par minute), soit Ω_r (radians par seconde). La force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme n_s . La vitesse Ω_r est généralement inférieure Ω_s à . On définit alors le glissement 's' comme le rapport entre les vitesses par la formule suivante :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (1.1)$$

- n_r : Vitesse de rotation du rotor [tr/min] .
- n_s : Vitesse de rotation de synchronisme [tr/min] .
- Ω_r : Vitesse angulaire réel de la machine [rad/s].
- Ω_s : Vitesse de synchronisme [rad/s] .
- p : Nombre de paires de pôles.

B. La vitesse du moteur :

D'après la relation précédente (I.1), il est évident que la vitesse mécanique peut être donnée par la relation suivante :

$$n_r = \frac{60f_s(1-s)}{p} \quad (\text{I.2})$$

Ainsi en considérant la relation (I.2) , nous pouvons dire que le contrôle de la vitesse d'un moteur asynchrone peut se faire par les actions suivantes [vii] :

a. Action sur le nombre de paires de pôles (p) :

Pour faire varier le nombre de paires de pôles 'p' et donc la vitesse n_r , il suffit de concevoir l'armature avec un ensemble de demi-bobines, placées en série ou en parallèle pour agir sur ce nombre de paires de pôles (moteur à deux vitesses).

b. Action sur le glissement (s):

Pour faire varier le glissement 's' et donc la vitesse n_r , il suffit de modifier la résistance rotorique. On agit donc par ce procédé sur le glissement tout en conservant un couple maximal constant, cela n'est possible que si la machine est à rotor bobiné.

c. Action sur la fréquence (fs) :

Pour faire varier la vitesse n_r du moteur, il suffit de faire varier la fréquence d'alimentation 'fs'. Cette action est possible grâce à l'utilisation des variateurs de vitesse (onduleurs) qui permettent de régler la vitesse de synchronisme du champ tournant, ce qui permet d'avoir une grande plage de variation de la vitesse du moteur.

C-cammende de moteur :

Le variateur de vitesse est une structure regroupant trois étages comme le montre la Figure 6:

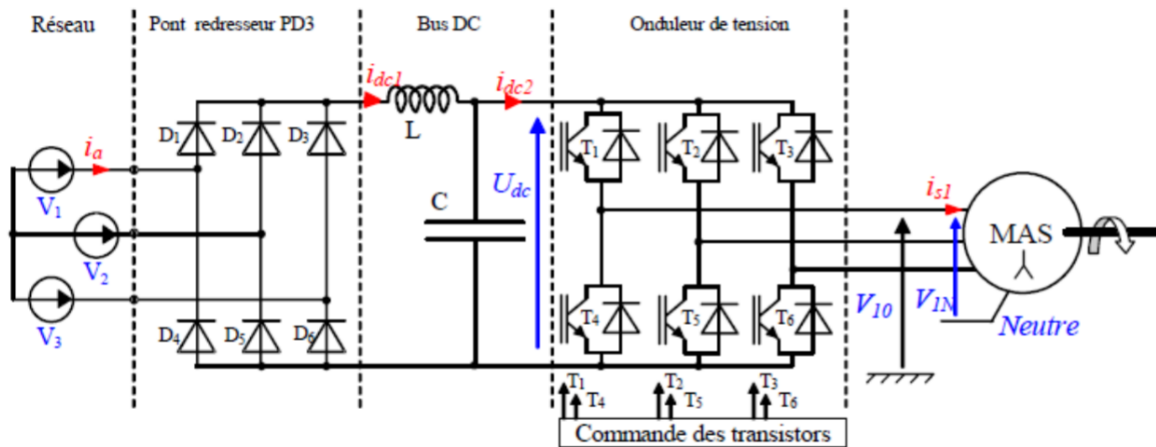


FIGURE 6 SCHEMA ELECTRIQUE DU COMMANDE DE MOTEUR

1^{er} étage : Le redresseur ou convertisseur AC/DC. Il Permet de transformer la tension alternative triphasée du réseau en une tension continue. C'est un redresseur triphasé non commandé à double alternance.

2^{ème} étage : Le bloc de filtrage. Ce système est composé le plus souvent par des éléments passifs (inductance de lissage L et d'un condensateur C de filtrage) et a pour but :

- d'obtenir à l'entrée de l'onduleur une tension sensiblement constante.
- d'absorber le courant négatif restitué par la charge.
- de lisser et ainsi ou rendre le courant sensiblement constant.

3^{ème} étage : L'onduleur ou convertisseur DC/AC. C'est un convertisseur statique qui permet de transformer la tension d'une source continue en une tension alternative. Ce bloc permet donc d'obtenir une alimentation à tension et à fréquence variables grâce à une commande judicieuse de ces interrupteurs. La commande la plus utilisée pour générer les ordres des interrupteurs est la MLI. Le principe consiste à comparer un signal de référence sinusoïdal à une porteuse triangulaire de haute fréquence. Cette stratégie de commande permet d'ajuster la fréquence fondamentale de la tension d'alimentation délivrée par l'onduleur en modifiant la fréquence du signal de référence.

3-Position du problème :

Une analyse du tableau précédent montre que les deux techniques permettant la détection de la plupart des défauts électriques et mécaniques sont celles du courant statorique

et de la vibration. Cette dernière technique sera développée dans le prochain chapitre vu son importance dans le monde industriel.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre, après avoir rappelé les terminologies utilisées en diagnostic, nous nous sommes intéressés à la constitution du moteur asynchrone ainsi qu'aux principaux défauts pouvant affecter les différentes parties du moteur. À noter, que nous nous sommes surtout intéressés aux défauts mécaniques, vu que statistiquement c'est les défauts les plus récurrents.

Aussi, nous avons rappelé les causes mais surtout l'impact de ces défauts sur les grandeurs mesurables issues du moteur. Ainsi, un suivi efficace de ces grandeurs permettra un diagnostic fiable du moteur. Pour cela, différentes techniques de diagnostic se sont développées dépendamment de ces grandeurs physiques. Une synthèse de ces techniques a été réalisée dans ce chapitre pour montrer la raison pour laquelle nous avons choisi les deux techniques, du courant et de la vibration, dans ce travail. Le prochain chapitre sera donc consacré à l'étude de la technique vibratoire ainsi qu'aux méthodes d'analyse permettant la détection des signatures fréquentielles des défauts.

Chapitre II :

Diagnostic de la machine asynchrone

Introduction :

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est le convertisseur d'énergie électromécanique le plus utilisé dans différents domaines d'application tels que l'industrie ou le transport. L'intérêt pour ce type de moteur est dû surtout à sa grande robustesse et à son faible prix de revient. De plus, l'apparition et l'utilisation croissante des variateurs de vitesse ont énormément favorisé son développement dans différents domaines d'application. En effet, il est omniprésent dans l'industrie associant les machines électriques, exemple (traction électrique, laminoir, levage, pompage, etc...) . Seulement cette utilisation massive de variateurs de vitesse peut fragiliser ce type de moteur surtout en présence d'un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement). En effet, ces contraintes peuvent altérer son fonctionnement en provoquant différentes défaillances au niveau des différentes parties qui le constitue. Ce qui se répercute sur sa durée de vie tout en occasionnant des pertes financières considérables si le processus industriel est interrompu. Il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats basés sur des techniques de diagnostic afin d'éviter tout arrêt imprévu du moteur.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de faire un rappel sur la constitution du moteur asynchrone à cage d'écureuil, ainsi que sur les principaux défauts pouvant l'affecter tout en précisant leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement du moteur. Par la suite, une étude comparative est effectuée sur les différentes techniques couramment utilisées pour la détection de ces défauts. Mais avant d'entamer ce chapitre il est important de faire un rappel sur la terminologie utilisée en diagnostic.

I. Principaux défauts affectant le moteur asynchrone :

I.1. Principales causes des défauts :

La plupart des défauts dans les moteurs asynchrones sont dus à la coexistence de certaines contraintes nocives de types : électrique, magnétique, mécanique, thermique, ou dynamique. Leurs causes sont multiples et trouvent leurs origines (^{viii}):

- Dans la conception du moteur.
- Dans l'assemblage du moteur.
- Dans l'installation du moteur.
- Dans l'environnement de travail du moteur .

- Dans la nature de la charge du moteur. Par ailleurs, les défauts affectants les moteurs peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories [ix] :
 - ✓ Les défauts internes : sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotoriques, entrefer mécanique, etc...).
 - ✓ Les défauts externes : Ils sont causés par le type d'alimentation utilisée, la charge mécanique ainsi que l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est montrée dans le tableau (1).

	<i>Origines</i>	<i>Classification de défauts</i>
Interne	Mécaniques	<ul style="list-style-type: none"> • Contact entre le stator et rotor. • Défaut de roulements. • Excentricité. • Mouvement des enroulements et des tôles.
	Electrique	<ul style="list-style-type: none"> • Défaillance au niveau de l'isolation. • Rupture de barre. • Défaillance au niveau du circuit magnétique.
Externe	Mécanique	Charge oscillante. <ul style="list-style-type: none"> • Surcharge de la machine. • Défaut de montage.
	Mécanique	<ul style="list-style-type: none"> • Fluctuation de la tension. • Sources de tensions déséquilibrées. • Réseau bruité.
	Environnementale	<ul style="list-style-type: none"> • Humidité. • Température. • propreté.

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION DES DEFAUTS DES MACHINES ELECTRIQUES SELON LEURS ORIGINES

I.2.ETUDES STATISTIQUES :

Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil bien que sont réputés robuste, ils peuvent subir certaines défaillances au niveau de leurs systèmes électriques ou mécaniques. En effet, un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Ensuite, des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80. Toute cette statistique concerne les machines asynchrone de moyenne et grande puissance. Dans les années 90 les travaux élaborés par les chercheurs Thorsen et Thomson ont montré que les défauts le plus fréquent sont de types mécaniques, la majorité entre elle touche le roulement (41%) puis celles du stator (37 %). et les moins fréquent sont les défauts au niveau rotor (10 %), voir figure 7.

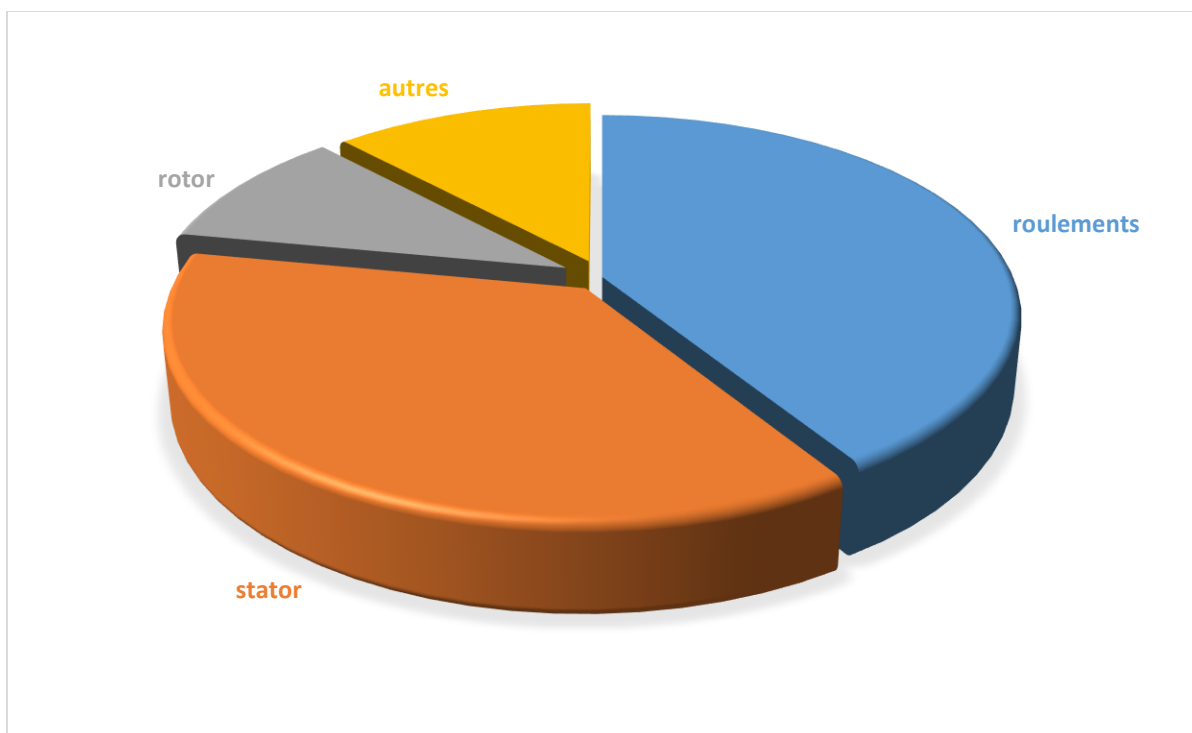


FIGURE 7 :REPARTITION DES DEFAUTS AFFECTANT LE MOTEUR ASYNCHROME (1999) [x].

Une étude statistique faite en 2008 par Bonnet sur les machines asynchrones de grande puissance dans l'industrie pétrochimique, montre que 69 % de pannes se situent au niveau des roulements, 21% au niveau du stator et 7% au niveau du rotor comme le montre la figure 8. Comparativement à l'étude précédente, on constate que le pourcentage des défauts affectants

le stator et le rotor a diminué. Cela est dû à l'amélioration de la technique de fabrication de machines électriques (par exemple, l'amélioration de la qualité des isolants).

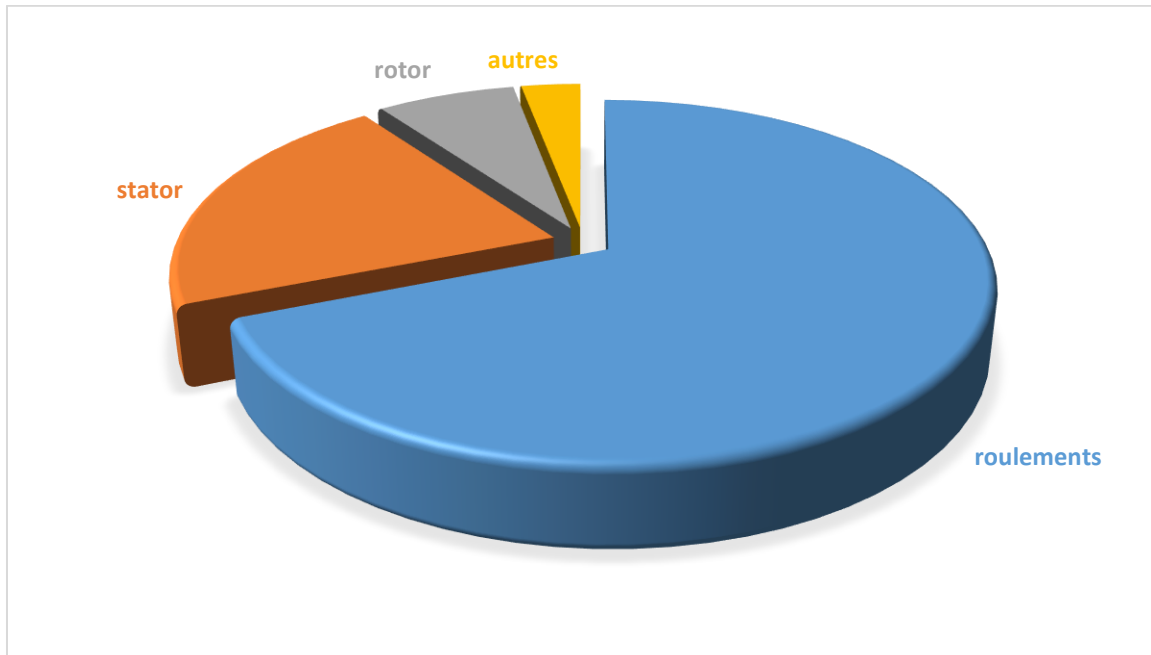


FIGURE 8 REPARTITION DES DEFAUTS AFFECTANT LE MOTEUR ASYNCHRONE BONNET 2008 [^{xi}].

On peut conclure que le roulement est l'élément le moins fiable du moteur et donc le plus susceptible d'être défaillant.

I.3. Défaillance d'ordre mécanique :

Comme nous l'avons vu précédemment, les défauts mécaniques sont les défauts les plus récurrents lors du diagnostic des moteurs asynchrones. Parmi ces défaillances nous pouvons citer les défauts affectants les flasques, l'arbre, les roulements ou encore les défauts d'excentricités.

I.3.1. Défauts du flasque :

Les défauts créés au niveau des flasques des moteurs asynchrones sont généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine [^{xii}].



FIGURE 9 :FLASQUE DEFECTUEUX.

1.3.2. Défaits de l'arbre :

L'utilisation d'un mauvais matériau lors de la fabrication de l'arbre peut créer certaines fissures. A court ou à long terme, ces fissures peuvent provoquer une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat du moteur. D'autres facteurs peuvent provoquer la défaillance de l'arbre. En effet, les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir sa résistance. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire [xiii].

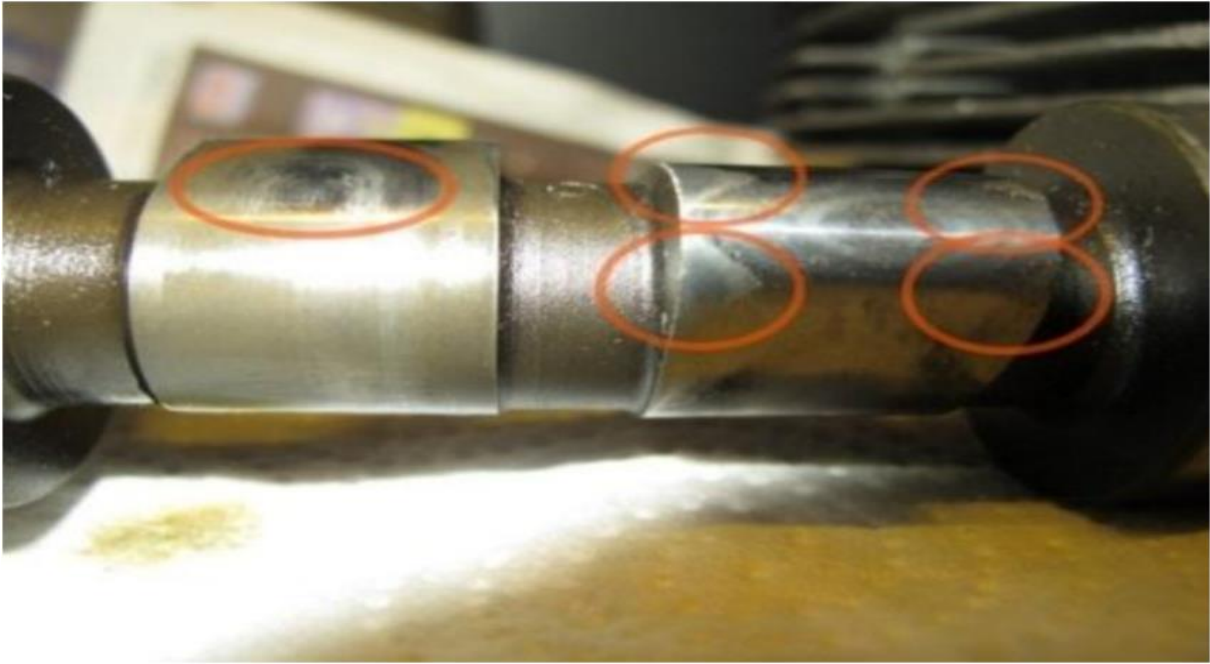


FIGURE 10 :DEFAUTS AU L'ARBRE.

1.3.3. Défaits de ventilateur :

Le moteur a besoin d'être refroidis par le ventilateur placé à l'arrière de ce dernier. L'air frais est aspiré à l'avant du moteur et soufflé au travers de la calotte pour assurer l'équilibre thermique du moteur. Dans certains cas, le ventilateur peut se détériorer à cause [xiv]:

- D'un mauvais positionnement par rapport à l'arbre du moteur.
- D'une mauvaise rotation.
- De cassure des ailettes.
- D'un emplacement peu aérer.

Ainsi le moteur en fonctionnement va chauffer car ne trouvant pas assez d'air pour se refroidir. Cela va augmenter la température à l'intérieur du moteur provoquant des court-circuités au niveau du bobinage.

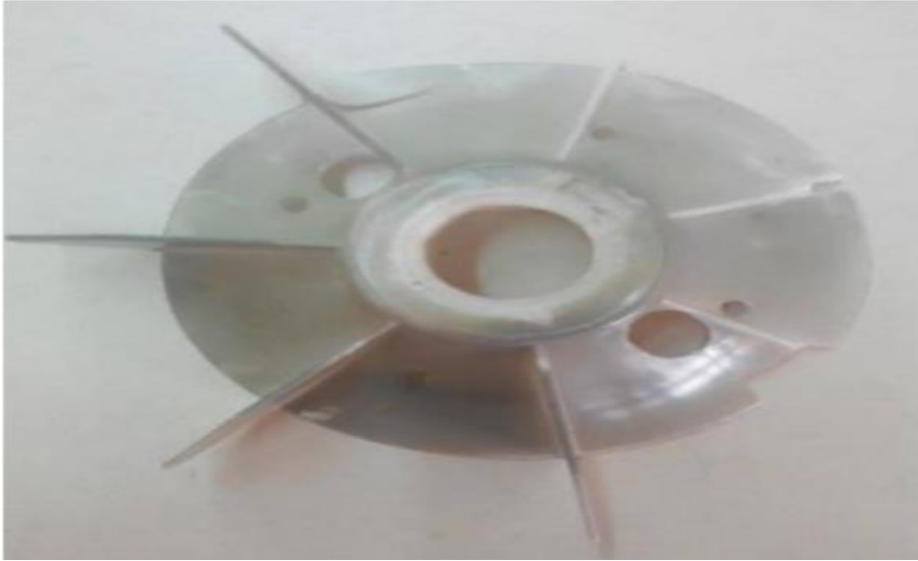


FIGURE 11 : VENTILATEUR DEFECTUEUX

1.3.4. Défauts de roulements :

Les roulements, sont sans doute les organes les plus sensibles à une défaillance. Cela est dû au rôle qu'ils jouent comme interface électromécanique entre le stator et le rotor. Ils représentent les éléments de maintien de l'axe du moteur permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Les principales causes de leurs défaillances sont dues aux problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abimé, écaillé ou fissuré. Ceci est dû aux causes suivantes [^{XV}].

- Contamination du roulement par des particules extérieures: poussière, grains de sable, etc...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, etc...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Courants qui traversent le roulement et qui causent des arcs électriques créant ainsi de micro trous sur les surfaces des roulements aux points de décharge, ou encore à l'apparition de stries perpendiculaires au sens de roulement dans les cas les plus sévères.

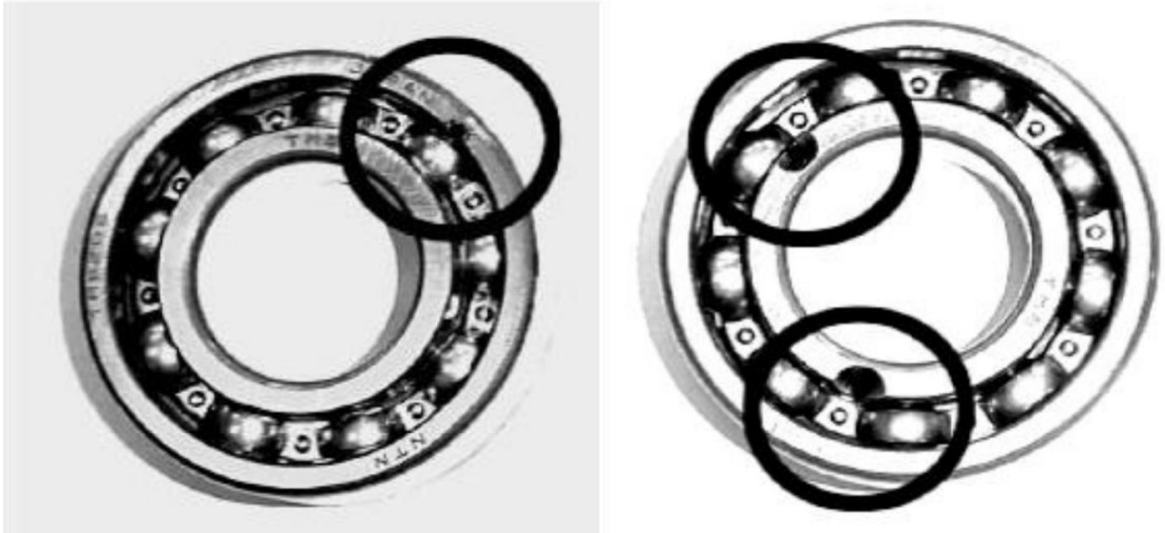


FIGURE 12 :REPRESENTATION D'UN ROULEMENT A BILLE AVEC DEFAUTS.

1.3.5.Défauts d'excentricité :

L'excentricité d'un moteur est le résultat de la non-uniformité de son entrefer. Ce type de défaut peut être la cause d'une flexion de l'arbre, d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, de l'usure du roulement ou encore d'un déplacement du noyau statorique. Il existe trois types de défauts d'excentricité [xvi]:

- L'excentricité statique: Ce défaut existe lorsque l'axe du rotor est décalé (non aligné) par rapport à l'axe du stator à l'arrêt de la machine. En fonctionnement, le rotor tourne autour de son axe. La cause principale de ce défaut est généralement due à l'opération de centrage des flasques (Figure 13.a).
- L'excentricité dynamique: Ce défaut apparaît lorsqu'en fonctionnement de la machine, le rotor ne tourne plus autour de son axe malgré qu'à l'arrêt de celle-ci, l'axe du rotor est positionné au centre de l'alésage du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes (Figure 13.b).
- L'excentricité mixte : Ce défaut est le plus fréquent, car c'est le résultat de l'association des deux cas précédents (Figure 13.c).

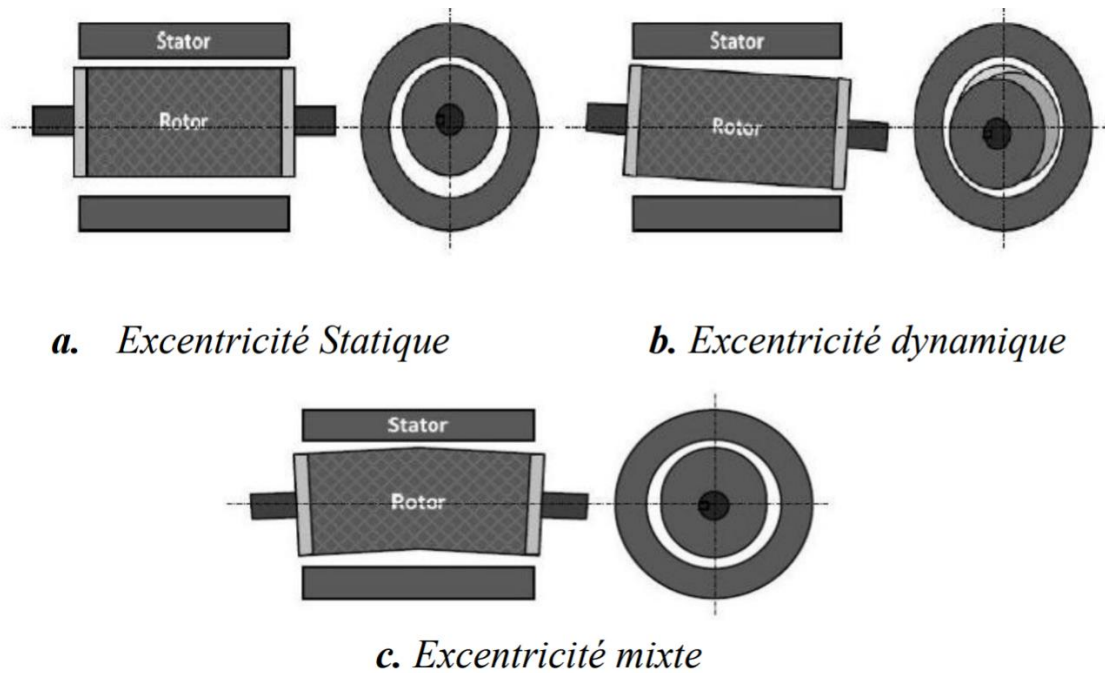


FIGURE 13 :TYPES D'EXCENTRICITE

A noter enfin que le défaut d'excentricité crée des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ce qui provoque des vibrations considérables au niveau des roulements.

1.3.6. Autres défauts du système mécanique :

Il existe d'autres défauts du système mécanique. Ils se présentent comme suit :

A-BALOURD :

Le balourd, comme il est défini par la norme internationale ISO 1925, est l'état dans lequel se trouve un rotor quand, à la suite de forces centrifuges, une force ou un mouvement vibratoire est communiqué à ses paliers. Cela est dû à l'effet d'une masse non parfaitement répartie sur un volume de révolution entraînant ce déséquilibre. Le balourd est un autre terme couramment employé comme synonyme de déséquilibre. D'ailleurs, le terme anglais unbalance traduit sans aucune distinction les termes français "déséquilibre" et "balourd".

Parmi les causes principales des déséquilibres (ou balourd) nous citons [^{xvii}]:

- Tolérenced' usinages.
- Tolérence de Montages.
- Déformation thermique en service. A noter qu'il existe trois types de balourd.

➤ **Balourd statique**

Il apparait dans le cas où le centre de la masse (centre de gravité) du rotor ne coïncide pas avec l'axe de rotation. Le système de rotor présente du balourd statique. L'axe d'inertie est parallèle à l'axe de rotation.

➤ **Balourd de couple**

L'axe d'inertie et l'axe de rotation sont sécants.

➤ **Balourd dynamique**

Le balourd dynamique est une combinaison des deux précédents cas. La valeur du balourd d'un rotor d'un moteur électrique est obtenue par la relation suivante :

$$B = M.R$$

Où M est la masse du déséquilibre, R la distance entre la masse de déséquilibre et l'axe de l'arbre (dans le cas de paliers rigides, l'axe de rotation est l'axe de l'arbre). L'unité du balourd est exprimé Grammes. Millimètres.

B-DESALIGNEMENT :

Un défaut d'alignement peut apparaître lorsqu'un arbre d'un moteur doit entraîner un autre arbre, souvent par l'intermédiaire d'un accouplement. Il y a 2 types de désalignements (Voir Figure 14):

- Désalignement angulaire : les axes ne sont pas parallèles (Figure 15).
- Désalignement parallèle : les axes sont parallèles mais non concentriques (Figure 16).

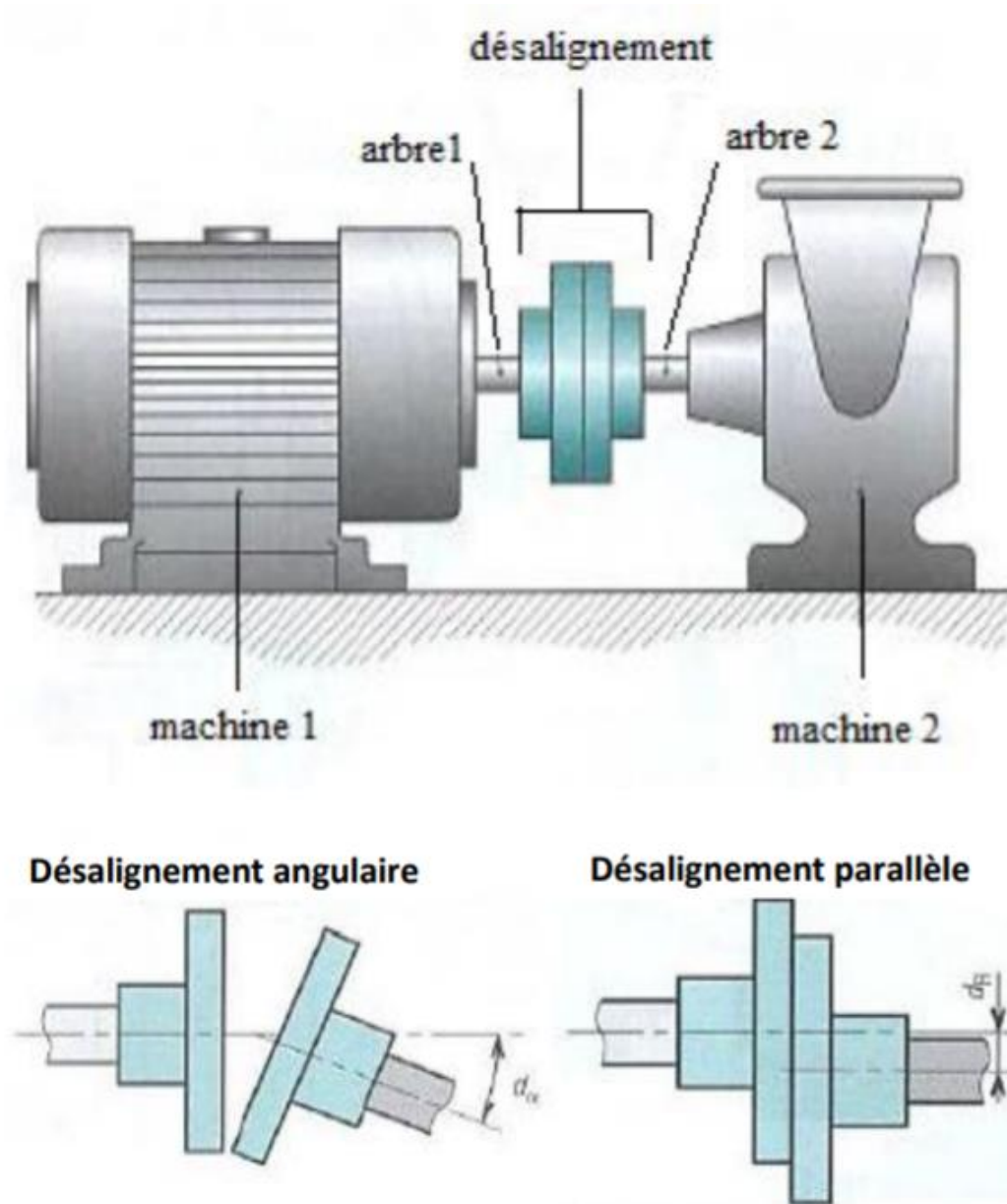


FIGURE 14 : TYPES DE DESALIGNEMENT D'ARBRES.

Le défaut d'alignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Il crée des efforts importants qui vont entraîner la dégradation rapide du système d'accouplement et des paliers. Dans la plupart des cas, on peut y remédier facilement par un lignage. L'objectif du lignage de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèles et confondues. Pour la plupart des applications, un lignage effectué par du personnel qualifié et expérimenté n'immobilise la machine que quelques heures [xviii].

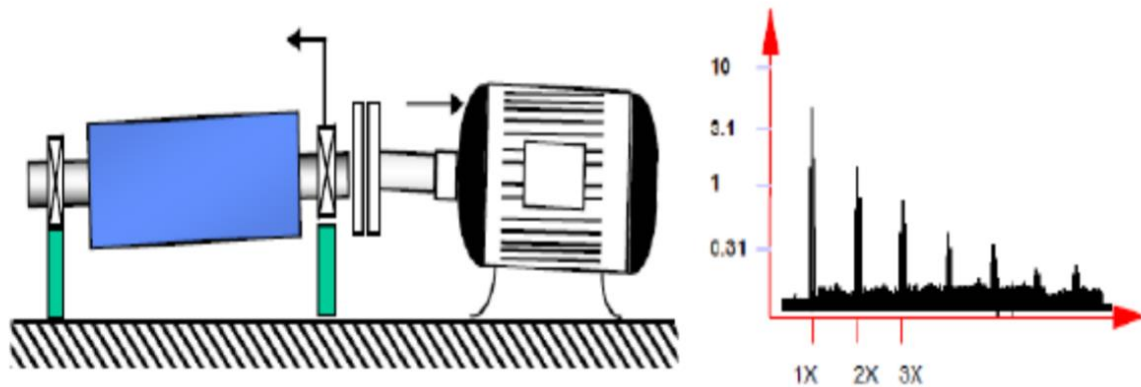


FIGURE 15 :DESALIGNEMENT ANGULAIRE [xix]

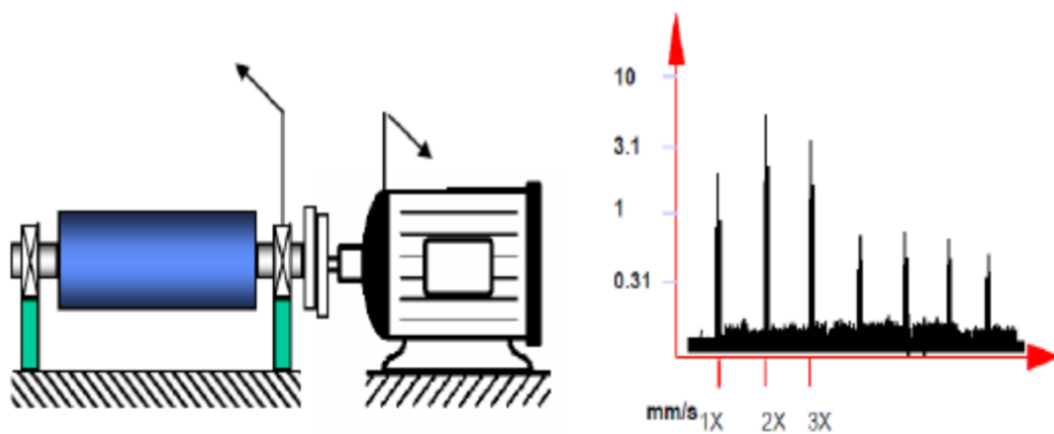


FIGURE 16 :DESALIGNEMENT PARALLELE

C-Défauts d'engrenage :

Les engrenages sont utilisés pour transmettre le mouvement et la puissance mécanique entre deux arbres parallèles ou non parallèles, concourants ou non concourants et Perpendiculaires ou non perpendiculaires [xx]. Ces défauts sont liés aux dégradations de la denture (denture cassée ou abimée, usure uniforme ou non, les piqûres (pitting) localisé ou réparti, mauvais centrage). On peut observer aussi la corrosion de contact (fretting) qui se traduit par un enlèvement de métal lorsque l'engrenage est lubrifié et que les efforts sont importants.

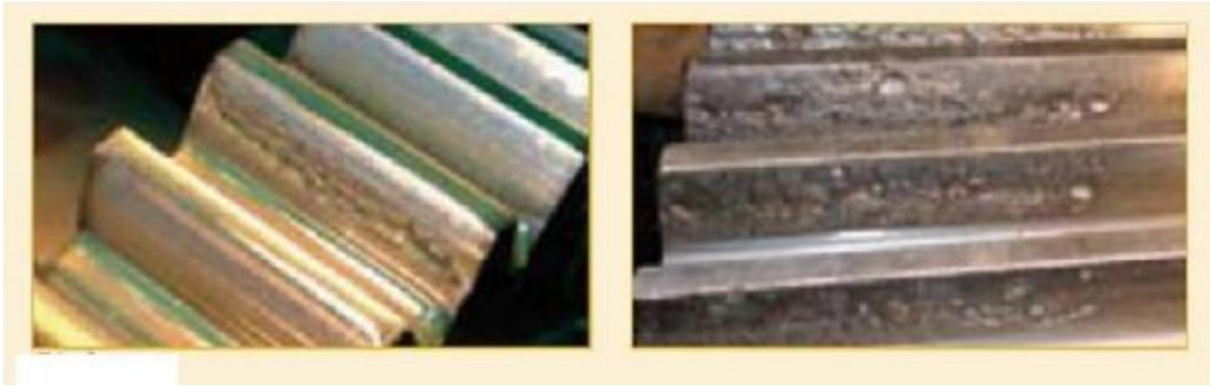


FIGURE 17 :PIQURES (PITTING)

D-JEU, DESSERRAGE, MAUVAISE FIXATION :

Cette classe de défauts concerne les fixations des machines sur leurs supports ou massifs. Si le montage est défectueux, on pourra observer différents phénomènes [^{xxi}].

- S'il y a du jeu, le fonctionnement ne sera pas linéaire, et le mouvement vibratoire sinusoïdal se transformera en un mouvement périodique d'autant plus riche en harmoniques que le signal sera déformé. Une autre conséquence de la présence de jeu est la création des chocs, et dans ce cas, on peut les détecter par des méthodes similaires à celles que l'on utilise pour les roulements.
- Si la fixation à une raideur insuffisante c'est par des mesures de déformées qu'on pourra la mettre en évidence. Les points faibles d'une structure y apparaissent comme des singularités de forme (déformation locale excessive, dissymétries de comportement vibratoire).

E-Défauts de palier :

Les axes des deux paliers d'un même corps de la machine ne sont pas concentriques. Cette anomalie peut être causée par une mauvaise lubrification ou une instabilité du palier engendré par des vibrations auto-excitées qui apparaissent quand l'arbre est insuffisamment chargé. La conséquence d'un défaut de montage d'un palier, d'un mauvais calage des pattes de fixation se traduit par une flexion de l'arbre du rotor [^{xxii}].

I.4. Défaillance d'ordre électrique :

Les défaillances d'origine électrique peuvent être la cause d'un arrêt de la machine (au même titre que les défaillances d'ordre mécanique). Ces défaillances peuvent être classées en deux catégories bien distinctes : les défaillances affectant les circuits électriques statoriques et

celles affectant les circuits électriques rotoriques. Les Tableaux II.2 et II.3 présentent une synthèse sur les causes et effets de ces défaillances.

<i>Circuit</i>	<i>Défaillance</i>	<i>Causes possibles</i>	<i>Effets sur le système</i>	<i>Observable</i>
Circuit électrique statorique	Isolant dans un enroulement	<ul style="list-style-type: none"> • Dégradation de l'isolant à la fabrication • Tension élevée • Courant élevé • Vibration mécaniques • Températures élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Court-circuit dans l'enroulement du stator 	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Vibrations • Courant
	Court-circuit entre spires	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut d'isolants • Vibration mécanique • Fonctionnement dans un environnement sévère 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du courant statorique. • Augmentation du courant rotorique. • Variation d'amplitude sur les autres phases, • Modification de facteur de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Vibrations • Courant • Puissance instantanée
	Court-circuit entre phases	<ul style="list-style-type: none"> • Décharge partielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépend de la position par rapport à l'alimentation • Fusion des conducteurs • Disjonction par les protections • Augmentation des courants dans les barres et les anneaux. • Déséquilibre des courants statoriques 	<ul style="list-style-type: none"> • Température • Tension • Courant • Puissance

Déséquilibre De Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> • Problème sur le réseau d'alimentation • Défaillance du convertisseur 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des courants dans les autres phases. • Augmentation des vibrations. • Augmentation de l'échauffement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrations • Courant • Tension • Puissance
------------------------------------	---	--	---

TABLEAU 2:SYNTHESE DES DEFAILLANCES DU STATOR D'UN MOTEUR ASYNCHRONE [xxiii]

Circuit	Défaillances	Causes possibles	Effets sur le système	Observable
Rotor	Ruptures de barres	<ul style="list-style-type: none"> • Surcharge • Environment hostile 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la valeur moyenne de couple électromagnétique • Oscillations de la vitesse • Vibrations mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibration • Couple électromagnétique • Courant
	Ruptures d'anneaux	<ul style="list-style-type: none"> • Surcharge du couple • Détérioration des conditions de fonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> • Déséquilibre la répartition des courants • Entraîne une modulation d'amplitude des courant statorique 	<ul style="list-style-type: none"> • Courant • Vibration
	Excentricité	<ul style="list-style-type: none"> • Positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage • Usure des roulements • Défaut de charge • Défaut de fabrication 	<ul style="list-style-type: none"> • Balourd (mécanique) • Entraîne des oscillations de couple 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrations • Courant • Couple
Axe	Roulement	<ul style="list-style-type: none"> • Usure. • Température élevée • Perte de lubrification • Défaut de montage • Huile contaminée 	<ul style="list-style-type: none"> • Oscillations du couple de charge • Augmentation des pertes 	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrations • Courant • Puissance instantanée • Couple.

			<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des vibrations • Altération de l'équilibre magnétique 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse
--	--	--	---	---

TABLEAU 3:SYNTHESE DES DEFAILLANCES DU ROTOR D'UN MOTEUR ASYNCHRONE.

I.5. Impacts des défauts sur le fonctionnement des moteurs :

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total du processus industriel, On cite parmi les conséquences des défauts [^{xxiv}]:

- ✓ Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- ✓ Appel supplémentaire de courant.
- ✓ Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- ✓ Augmentation de la vibration du moteur
- ✓ Augmentations des arrêts non programmés entraînant des pertes de production et financières.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre, après avoir rappelé les terminologies utilisées en diagnostic, nous nous sommes intéressés à la constitution du moteur asynchrone ainsi qu'aux principaux défauts pouvant affecter les différentes parties du moteur. A noter, que nous nous sommes surtout intéressés aux défauts mécaniques, vu que statistiquement c'est les défauts les plus récurrents.

Aussi, nous avons rappelé les causes mais surtout l'impact de ces défauts sur les grandeurs mesurables issues du moteur. Ainsi, un suivi efficace de ces grandeurs permettra un diagnostic fiable du moteur.

Chapitre III :

Les méthodes de diagnostic dans la machine asynchrone

Introduction :

La maintenance nécessite de connaître les régimes de fonctionnement des systèmes alors que la surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance dans le but de garantir le bon fonctionnement des systèmes. Le diagnostic s'intègre à la surveillance en ayant pour objectif de déterminer les causes de dysfonctionnement.

La surveillance et le diagnostic des défauts nécessitent d'obtenir des symptômes caractéristiques du fonctionnement de l'entraînement surveillé et de les analyser pour en déduire l'état du système. L'établissement des symptômes se fait souvent en référence à la connaissance du comportement sain dont on dispose.

La forme et la méthode de génération des symptômes sont tributaires de la forme prise par cette connaissance. Par exemple si le fonctionnement défaillant est mis en évidence par l'apparition des nouvelles raies spectrales dans une grandeur électrique, une analyse en traitement de signal permettra une acquisition des symptômes. Le mode de traitement des symptômes dépend de leur type mais aussi de la forme prise de la connaissance.

Traditionnellement, les symptômes du défaut sont recherchés dans les signaux mesurés: ce sont les méthodes reposant sur une approche signal. Elles traitent en grande partie des informations issues de l'expérience. Les méthodes de surveillance et de diagnostic mises en œuvre s'orientent donc naturellement sur l'analyse du signal (sans ajout de capteur).

Une autre approche, appelée « système » basée sur des méthodes heuristiques, issues de l'expérience et de l'expertise. Des techniques d'aide à la génération et la formalisation des symptômes (mesures) ont permis de fournir une aide à l'expertise en quantifiant les symptômes (analyse de signaux électrique, vibratoire, thermique) mais l'analyse reste une affaire de règles et de classification (reconnaissance de forme, système expert..). Ces méthodes de surveillance nécessitent une bonne connaissance du système et de ces composants.

I. Classification des méthodes de diagnostic :

Compte tenu de l'importance des enjeux en termes de productivité (arrêt inutile des installations), de sécurité (anomalie non détectée) ou de qualité de production (mesure incorrecte d'une grandeur à contrôler), de nombreuses approches ont été utilisées pour apporter une contribution à la solution du problème de diagnostic. On distingue cependant,

parmi les différentes méthodes, deux familles principales ; celles qui utilisent un modèle du système à surveiller, et utilisent généralement les techniques de l'automatique ; et celles pour qui seules les données acquises sur le procédé considéré, qui se limitent à son observation passée et présente, permettent de caractériser son mode de fonctionnement. Parmi les méthodes basées sur l'utilisation d'un modèle du procédé, deux sous-familles importantes peuvent également être dégagées ; celles utilisant un modèle qualitatif et celles recourant à un modèle quantitatif (dit aussi modèle numérique). Pour certaines méthodes, cette distinction est cependant sans fondement, car elles utilisent de manière mixte les deux types de modèles en essayant de tirer profit des avantages et s'affranchir des limitations de chacun d'entre eux. Toutes les méthodes nécessitent une phase d'apprentissage qui permet de connaître une référence de fonctionnement normal ou dégradé. Cette référence permet de générer en temps réel les symptômes lors de la phase de diagnostic. Les sections suivantes présentent les grandes familles de méthodes de diagnostic représentées par la Figure 18.

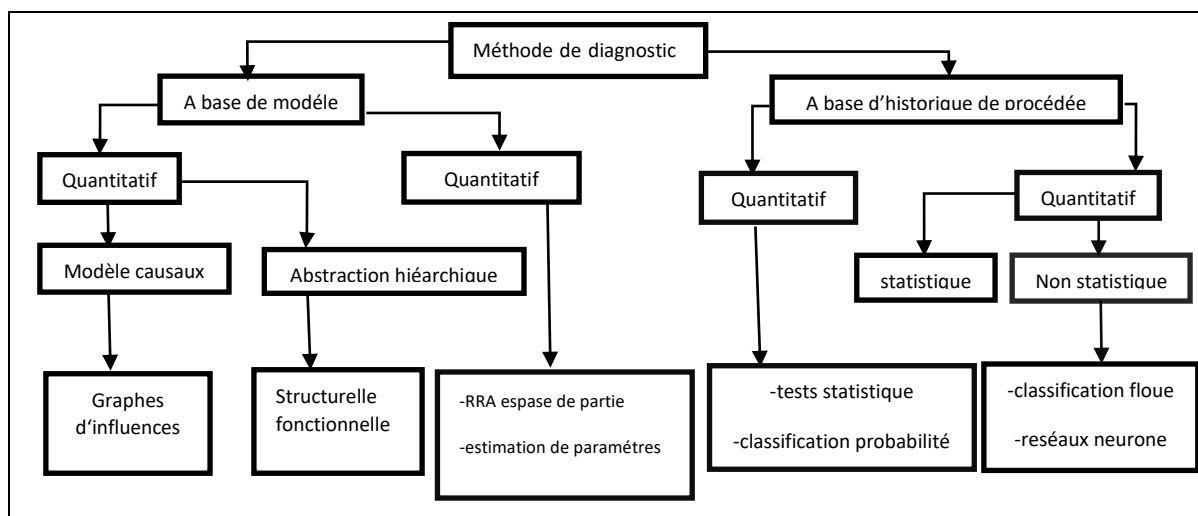


FIGURE 18 : LES METHODES DE DIAGNOSTIC

I.1 Approche à base de modèle qualitatif :

C'est une connaissance qui s'exprime avec des symboles et peut être traitée, en simulant la façon dont un humain raisonne logiquement par des techniques informatiques relevant de l'intelligence artificielle. Pour construire des représentations qui permettent une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans un procédé, l'intelligence artificielle s'intéresse au milieu des années 1980 au raisonnement qualitatif. Le développement de techniques de représentation qualitative du monde pour en comprendre schématiquement le fonctionnement est une idée très naturelle et par conséquent très

ancienne. On trouve dans la proche qualitative (Modèles causaux, Abstractions hiérarchiques).

I.1.2 Approche à base de modèle quantitatif :

L'utilisation de modèle mathématique pour le diagnostic est très largement répandue. Les méthodes de surveillance à base de modèle (Model-based-FDI: Fault Detection and Isolation) utilisent un modèle et reposent sur la génération et l'étude d'un signal particulier appelé "indicateur de défaut" ou "résidu".

Un résidu :

est un signal qui reflète la cohérence des données mesurées vis-à-vis d'un modèle comportemental du système. Les modèles utilisés peuvent être de nature et de complexité différente. Ils peuvent être : à temps continu ou à temps discret, linéaires ou non linéaires, représentant le bon fonctionnement ou tenant compte des défaillances. Les sorties du modèle se représentent classiquement sous la forme de valeurs numériques.

La localisation :

qui suit la détection peut être effectuée à l'aide d'une table de signature ou matrice d'incidence. Les colonnes de cette table sont représentatives des différents défauts et les lignes des différents résidus. Un 1 représente le symptôme qui indique que le résidu est sensible au défaut, un 0 le contraire. La signature d'un défaut (colonne de la matrice) définit l'état des symptômes lorsque ce défaut affecte le système (l'état est une grandeur logique ou symbolique).

En surveillance :

par contre, il est parfois nécessaire de compléter le modèle afin de caractériser le comportement défaillant du système. Suivant la classe de modèle considérée, les techniques de génération de résidus seront différentes. Suivant le niveau de connaissance sur les défaillances, les résultats de la procédure de surveillance seront plus ou moins précis et complets.

I.1.3 Approche à base d'extraction de caractéristiques qualitatives :

Ces méthodes ont l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé, contrairement aux méthodes à base de modèles. Seulement, la disponibilité de grandes quantités de données historiques du procédé est nécessaire. Il y a diverses façons de traiter ces données et de les présenter en tant que

connaissance a priori pour le diagnostic. Ceci est connu comme l'extraction de caractéristiques. Parmi les méthodes d'extraction de caractéristiques qualitatives, se trouvent les méthodes à base de règles (systèmes experts), et les méthodes de représentation et analyse qualitative des tendances.

I.1.4 Approche à base d'extraction de caractéristiques quantitatives :

Dans la section précédente, on a vu la méthode basée sur l'extraction de caractéristiques qualitatives. Dans cette section, on va évoquer la méthode qui extrait les caractéristiques quantitatives. On peut analyser les signaux issus de l'instrumentation et proposer pour chacun de ces signaux un modèle

I.1.4.1 Les méthodes statistiques :

Comme tests d'hypothèses, classification probabilistes, analyse en composante principales moindres carrés partiels, cette méthode est, en fait, une référence du comportement d'un signal, qui peut être représentative de l'état normal de l'installation ou d'un défaut particulier.

Donner des exemples (Moyenne Variance Ecart type).

I.1.4.2 Les méthodes non statistiques :

On peut citer la classification floue, réseaux de neurones, méthodes de signature, méthodes fréquentielles, temps-fréquence et temps-échelle. La méthode non statistique est une autre méthode de représentation pour un signal qui peut très bien être utilisée comme référence pour le diagnostic, est sa représentation par un spectre de fréquences, une signature graphique, ou encore l'extraction d'attributs (ou caractéristiques), à partir des données suivie de leur classification, qui permettent, pour des procédés dont on veut analyser plusieurs signaux liés entre eux, de discriminer divers modes de fonctionnement, dont le mode normal et certains modes de défaillance.

I.2-Analyse de procédure du diagnostic :

L'organisation générale de la procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes :

- A partir des moyens de mesure ou d'observation appropriés, nous effectuons l'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux.

- l'élaboration des signatures associées à des symptômes de défaillance en vue de la détection d'un dysfonctionnement.
- la détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnements normaux.
- la mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de défaillance à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de causalité.
- une phase d'interprétation des données de diagnostic (identification du type et de la nature du défaut).
- la prise de décision en fonction des conséquences et de l'importance des défauts.

I.3-Diagnostic d'un moteur asynchrone:

Le moteur asynchrone à cage d'écurueil est le convertisseur d'énergie électromécanique le plus utilisé dans différents domaines d'application tels que l'industrie ou le transport. L'intérêt pour ce type de moteur est dû surtout à sa grande robustesse et à son faible prix de revient. De plus, l'apparition et l'utilisation croissante des variateurs de vitesse ont énormément favorisé son développement dans différents domaines d'application. En effet, il est omniprésent dans l'industrie associant les machines électriques, exemple (traction électrique, laminoir, levage, pompage, etc...)[^{xxv}]. Seulement cette utilisation massive de variateurs de vitesse peut fragiliser ce type de moteur surtout en présence d'un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement). En effet, ces contraintes peuvent altérer son fonctionnement en provoquant différentes défaillances au niveau des différentes parties qui le constitue. Ce qui se répercute sur sa durée de vie tout en occasionnant des pertes financières considérables si le processus industriel est interrompu. Il est donc impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats basés sur des techniques de diagnostic afin d'éviter tout arrêt imprévu du moteur. L'objectif de ce premier chapitre est de faire un rappel sur la constitution du moteur asynchrone à cage d'écurueil, ainsi que sur les principaux défauts pouvant l'affecter tout en précisant leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement du moteur. Par la suite, une étude comparative est effectuée sur les différentes techniques couramment utilisées

pour la détection de ces défauts. Mais avant d'entamer ce chapitre il est important de faire un rappel sur la terminologie utilisée en diagnostic.

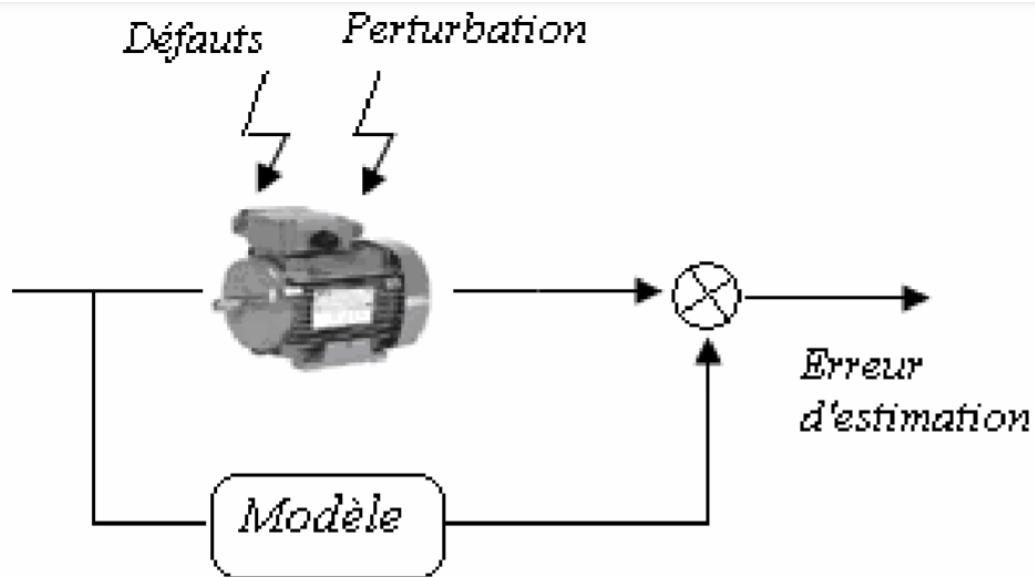


FIGURE 19 : METHODE DE DIAGNOSTIC PAR ANALYSE DE RESIDUS

I.4. Techniques du diagnostic des défauts dans le moteur asynchrone :

Le diagnostic consiste à détecter un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale du système. A cet effet, il existe une variété de technique de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation de l'évolution des paramètres du système en présence de défauts. D'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison de l'évolution des différentes grandeurs physiques (courant, vibration, couple, etc...) du moteur en défaut par rapport à celles représentant un moteur sans défaut [5, 26, 27]. Notre travail rentre dans cette deuxième famille. A noter que ces techniques peuvent être classées en trois

catégories :

a. Techniques mécaniques :

- Diagnostic par mesure de la température
- Diagnostic par mesure de vibration
- Diagnostic par mesure du couple et de la vitesse

b. Techniques chimiques :

c. Techniques électromagnétiques

- Diagnostic par mesure du flux magnétique axiale de fuite
- Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Le tableau suivant donne une synthèse sur le principe et les avantages et inconvénients des différentes techniques de diagnostic des moteurs asynchrones.

Techniques	Principe	Avantages	Inconvénients
Mesure de la température	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de la température de chaque phase de l'enroulement statorique. • Capteurs de température utilisée en platine PT100 ou thermocouples 	<ul style="list-style-type: none"> • Sert à la protection des enroulements statoriques 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite de capteur de forte température • Ne diagnostic pas la totalité des défauts
Fluctuation de la vitesse	<ul style="list-style-type: none"> • Les perturbations dues aux défauts entraînent des fluctuations de la vitesse. • Mesurables par un capteur qui utilise la technique de calcul du signal moyen de synchronisme à la fréquence de synchronisme du moteur 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs clairs sur la dégradation du circuit rotorique 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût relativement élevé des capteurs. • Ne diagnostic pas la totalité des défauts
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> • La dégradation de l'isolation électrique produit l'oxyde de carbone qui apparait dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par 	<ul style="list-style-type: none"> • Détecter les défauts d'enroulement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisable pour les moteurs à grande puissance. • Ne diagnostic pas la totalité des défauts

	une technique d'absorption infrarouge		
Courant statorique	<ul style="list-style-type: none"> • En présence d'un défaut les courants statoriques et rotoriques ne sont plus équilibrés. Ainsi le flux magnétique n'est plus nul. • Flux détecté par une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine. 	<ul style="list-style-type: none"> • Courants facilement mesurables grâce à un emplacement simple du capteur pouvant être placé sur n'importe quel point de la ligne d'alimentation • Diagnostic de la plupart des défauts électriques et mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Cette technique ne s'applique actuellement qu'en régime permanent. • Influence de la perturbation de l'alimentation sur la précision de la détection. • N'est exploitable que si la machine est en marche.
Vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> • L'analyse vibratoire de la machine asynchrone menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions axiales et radiales, pour détecter les défauts afin de faire un diagnostic fiable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Détection de défauts à un stade précoce. • Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi. • Autorise une surveillance continue. • Possibilités de réaliser un diagnostic approfondi. • Diagnostic de la plupart des défauts électriques et mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> • Problème d'accessibilité. • Difficulté rencontrée dans les connexions mécaniques des accéléromètres. Pour effectuer le mesure nécessaire du défaut. • Le fonctionnement de la machine présente une source supplémentaire de vibration.
Flux magnétique de fuite axial	<ul style="list-style-type: none"> • En présence d'un défaut les courants statoriques et rotoriques ne sont plus équilibrés. Ainsi le flux 	Détection des défauts de: <ul style="list-style-type: none"> • Fabrication. • Rupture de barres et 	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de souplesse car nécessitant un montage spécial.

	magnétique n'est plus nul. • Flux détecté par une bobine enroulée autour de l'arbre de la machine.	des anneaux rotoriques. • Court-circuit entre les spires statoriques. • Coupures des phases.	• Utilisable que pour les moteurs de grande puissance • Ne diagnostic pas l
--	---	--	--

TABEAU 4:SYNTHESE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC

I.5. Réseaux de neurones :

I. 5.1. Principe et définitions :

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation du neurone biologique par Warren McCulloch et Walter Pitts [JOD 94]^{xxvi}. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés.

Le schéma suivant présente un neurone formel :

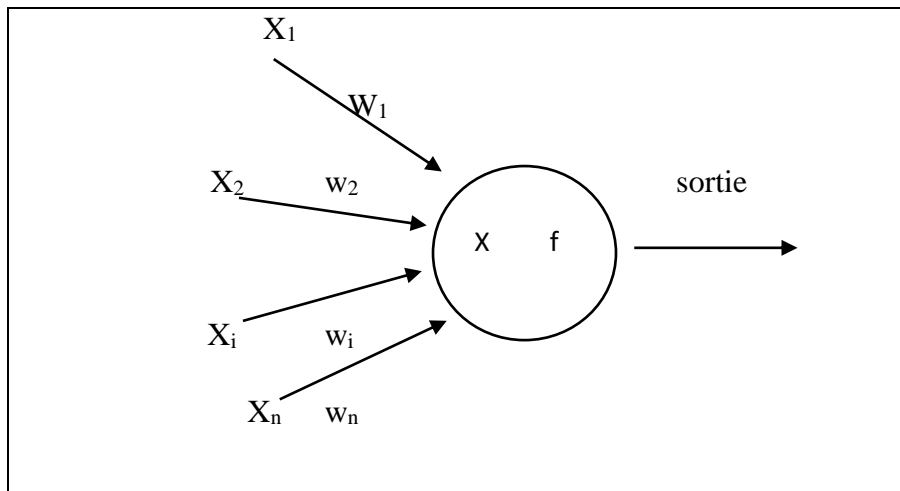


FIGURE 20REPRESENTATION D'UN NEURONE

Les entrées du neurone sont désignées par x_i ($i=1..n$). Les paramètres w_i reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids. La sortie du neurone est donnée par :

$$\text{sortie} \Rightarrow f(x) \text{ avec } x = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

x est l'état d'activation du neurone (également appelé état ou activité).

f est la fonction d'activation du neurone. Conformément au modèle biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes et bornées. Les fonctions les plus connues sont la fonction signe, la fonction linéaire saturée et la fonction sigmoïde.

Leur choix revêt une importance capitale comme nous le verrons par la suite.

Les réseaux de neurones sont constitués des neurones élémentaires connectés entre eux par l'intermédiaire des poids qui jouent le rôle des synapses. L'information est portée par la valeur de ces poids tandis que la structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter cette information et à l'acheminer vers la sortie.

Le réseau de neurones fait partie des Réseaux Adaptatifs Non-linéaires, cela signifie que ses agents (neurones) s'organisent et modifient leurs liens mutuels lors d'une procédure fondamentale qu'est l'apprentissage. Pour une tâche précise, l'apprentissage du réseau de neurones consiste donc à adapter les différents poids w_i .

I.5.2. Perceptrons multicouches :

Ce sont les réseaux de neurones les plus connus. Un perceptron est un réseau de neurones artificiel du type feedforward, c'est à dire à propagation directe. Sur l'exemple suivant nous présentons un perceptron à trois couches. La première est celle des entrées (elle n'est cependant pas considérée comme couche neuronale par certains auteurs car elle est linéaire et ne fait que distribuer les variables d'entrées). La deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire) et constitue le cœur du réseau de neurones. Ses fonctions d'activation sont du type sigmoïde. La troisième, constituée ici par un seul neurone est la couche de sortie. Sa fonction d'activation est du type linéaire bornée.

Nous pouvons remarquer sur la figure 21, des termes x_0^m en entrée des neurones [xxvii]. En fait, sur chaque neurone, en plus de ses entrées qui les lient avec les neurones précédents, on ajoute une entrée particulière que l'on appelle polarisation du neurone. Elle correspond à un biais qui joue un rôle de translation du domaine d'activité du neurone. Sa valeur est donc liée à la fonction d'activation puisqu'elle permet le déplacement de cette fonction.

Afin de garder une notation généralisée, nous représentons ces biais comme le produit d'une entrée x_0^m par les poids w_{0j}^m . Nous fixons l'entrée x_0^m à l'unité, le poids porte alors l'information sur la polarisation du neurone.

Le perceptron multicouche est très utilisé en identification et en contrôle. Avec une couche cachée, il constitue un approximateur universel. De récentes recherches montrent qu'il peut être entraîné de manière à approximer n'importe quelle fonction entrées-sorties sous réserve de mettre suffisamment de neurones dans la couche cachée et d'utiliser des sigmoïdes pour les fonctions d'activation [PIC 94]^{xxviii}. Bien entendu, les théorèmes mathématiques ne démontrent pas qu'un réseau à une seule couche cachée est optimal [THI 97]^{xxix}.

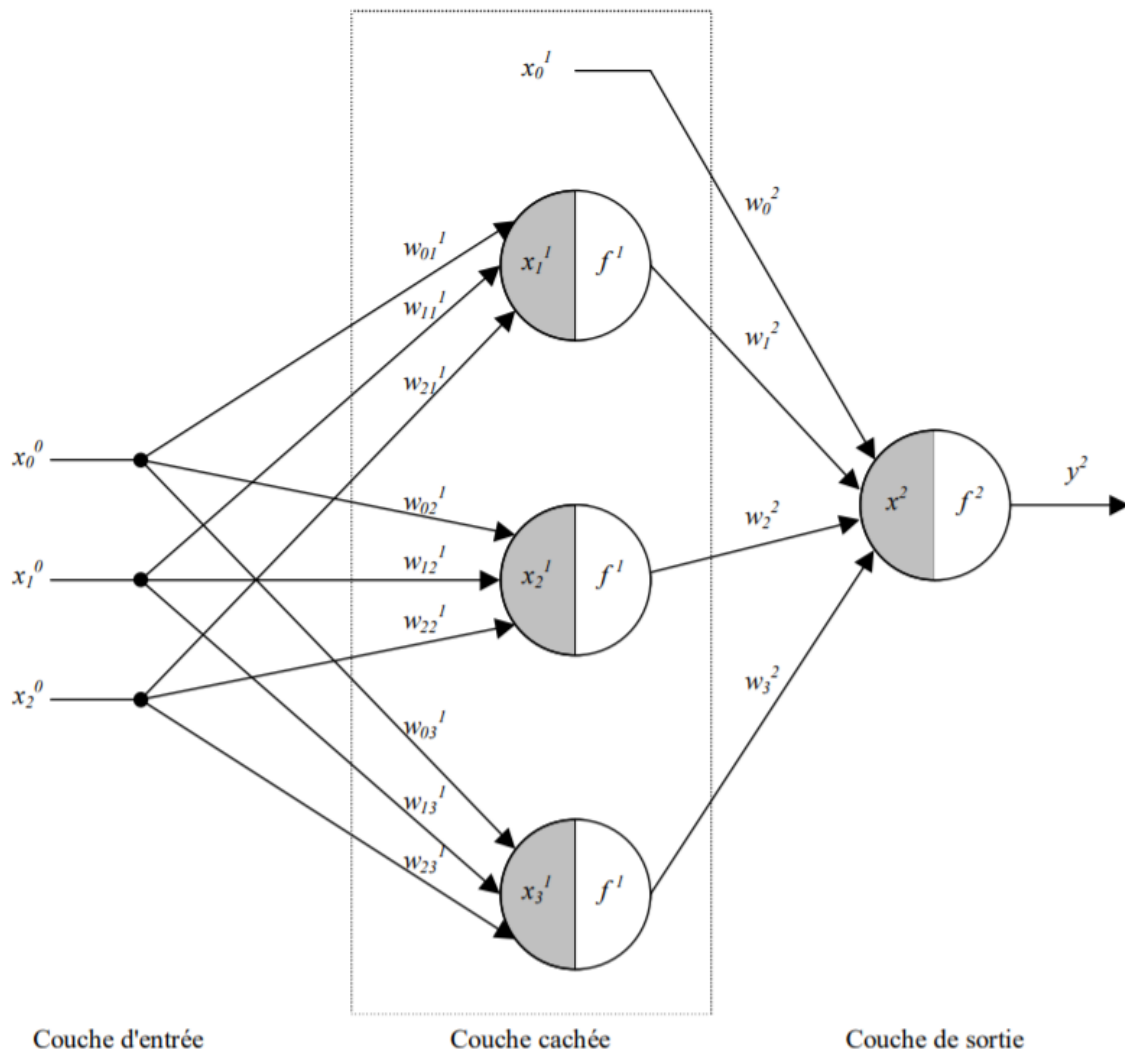


FIGURE 21 :RESEAU DE NEURONES DE TYPE PERCEPTRON A UNE COUCHE CACHEE

L'un des problèmes de l'utilisation des réseaux de neurones consiste dans le choix de sa topologie. Par exemple, il n'existe pas de règle générale qui donne le nombre de neurones à

retenir pour la couche intermédiaire. Ce choix est spécifique à chaque application et, à ce jour, ce ne sont que des choix arbitraires dont on vérifie par la suite la validité.

1.5.2.1. Apprentissage :

Une fois la structure fixée, il faut passer par le processus d'apprentissage, par lequel les poids vont être ajustés de manière à satisfaire un critère d'optimisation. Prenons le cas de l'identification d'un processus qui comporte deux entrées et une sortie. L'apprentissage va se faire sur un ensemble de triplet (x_1^0, x_2^0, y_s).

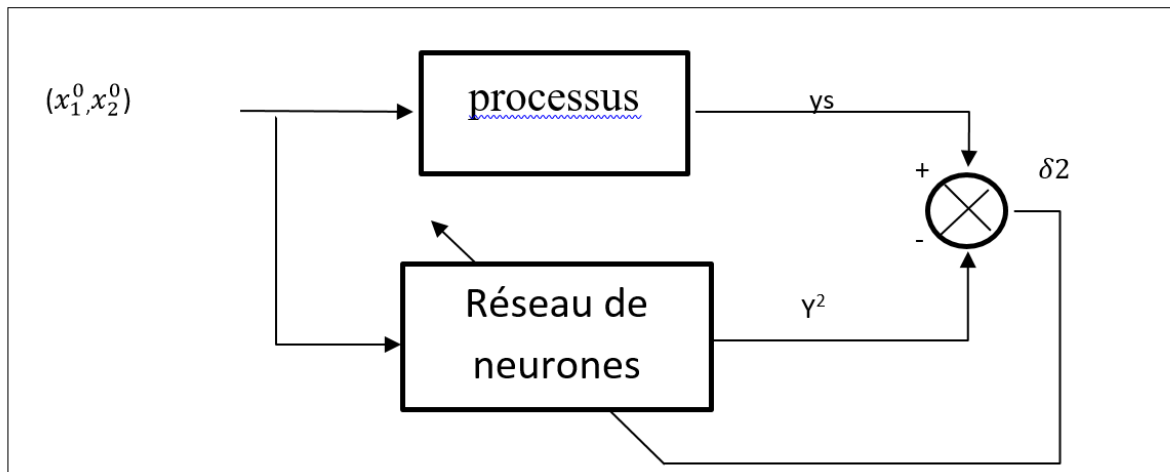


FIGURE 22 :SCHEMA SYNOPTIQUE DU PROCEDE D'APPRENTISSAGE DU RESEAU DE NOURONES

Pour chaque triplet, l'erreur entre les deux sorties est calculée. Elle est utilisée pour corriger les poids de la couche de sortie puis par rétropropagation de l'erreur (error backpropagation), des erreurs intermédiaires, correspondant à la couche cachée sont ainsi calculées et permettent l'ajustement des poids w_{ij}^1 de la couche cachée. Nous présentons, dans ce qui suit, un exemple de cet algorithme. Il est basé sur la méthode du gradient. La notation adoptée peut être résumée comme suit :

Les entrées x_i^0 sont notées y_i^0 pour permettre de généraliser l'algorithme. La fonction d'activation pour la sortie est $f(x) = x$.

$$x_j^m = \sum_i w_{ji}^m y_i^{m-1} \quad \text{représente l'activité du neurone } j \text{ de la couche } m. \quad (2)$$

$$y_j^m = f(x_j^m) \text{ est la sortie du neurone } j \text{ de la couche } m. \quad (3)$$

w_{ij}^m est le poids reliant la sortie du neurone (i) de la couche précédente (m-1) au neurone (j) de la couche considérée (m).

i, j, i', j', k et l sont des indices muets.

L'erreur globale sur l'ensemble d'apprentissage (indicé (k)) est : ¹

$$E = \frac{1}{2} (x+a)^n = \sum_k (y_s(k) - y^2(k))^2 \quad (4)$$

Les poids vont être ajustés par une variation de Δw_{ij}^2 et Δw_{ij}^{m1} . La direction optimale est donnée par l'opposé du gradient de l'erreur par rapport aux poids :

$$\begin{aligned} \Delta y_{i'}^2 &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{i'}^2} = -\frac{1}{2} \eta \sum_k \frac{\partial}{\partial w_{i'}^2} \{ (y_s(k) - y^2(k))^2 \} \\ &= \eta \sum_k \frac{\partial y^2(k)}{\partial w_{i'}^2} (y_s(k) - y^2(k)) \frac{\partial y^2(k)}{\partial w_{i'}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 y^2(k)}{\partial w_{i'}^2} &= \frac{\partial}{\partial w_{i'}^2} \left\{ f^2 \left(\sum_{i=0}^3 w_{i'}^2 y_i^1(k) \right) \right\} = f^{2'}(x^2) \frac{\partial}{\partial w_{i'}^2} \left\{ \sum_{i=0}^3 w_{i'}^2 y_i^1(k) - y^2(k) \right\} \\ &= f^{2'}(x^2(k)) y_{i'}^1(k) \end{aligned}$$

$$\boxed{\Delta w_{i'}^2 = \eta \sum_k (y_s(k) - y^2(k)) f^{2'}(x^2(k)) y_{i'}^1(k)} \quad (5)$$

même pour la couche cachée :

¹ Afin d'éviter toute confusion entre les indices hauts et les exposants, nous écrivons l'erreur quadratique sous sa forme explicite (Erreur * Erreur).

$$\Delta w_{i'j'}^1 = \eta \sum_k (y_s(k) - y^2(k)) f^{2'}(x^2(k)) w_{i'}^2 f^{1'}(x_{j'}^1(k)) y_{i'}^0(k) \quad (6)$$

On peut introduire l'erreur élémentaire à la couche m par $\delta_j^m(k)$, on a alors :

$$\delta^2(k) = (y_s(k) - y^2(k)) f^{2'}(x^2(k)) \quad (7)$$

$$\Delta w_{i'}^2 = \eta \sum_k \delta^2(k) y_{i'}^1(k) \quad (8)$$

De même

$$\begin{aligned} \delta_j^i(k) &= (y_s(k) - y^2(k)) f^{2'}(x^2(k)) w_j^2 f^{1'}(x_{j'}^1(k)) \\ &= \delta^2(k) w_j^2 f^{1'}(x_{j'}^1(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta w_{i'j'}^1 = \eta \sum_k \delta_j^i(k) y_{i'}^0(k) \quad (10)$$

On voit bien que pour le calcul de $\delta_j^1(k)$, on utilise $\delta^2(k)$. En fait, de proche en proche, par rétropropagation, on calcule une erreur correspondant à chaque neurone pour une couche donnée. On peut remarquer cela plus explicitement sur un cas plus général où l'on a plusieurs sorties dans la dernière couche. L'erreur est alors donnée par :

$$E = \frac{1}{2} \sum_k \sum_j (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) \quad (11)$$

Dans la dernière couche :

$$\Delta w_{i'j'}^2 = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{i'j'}^2} = \eta \sum_k \sum_j (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) \frac{\partial y_j^2(k)}{\partial w_{i'j'}^2} \quad (12)$$

$$\Delta w_{i'j'}^2 = \sum_k (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) f^2(x_j^2(k)) w_{j'}^2 y_{i'}^1(k) \quad (13)$$

Dans l'avant-dernière couche :

$$\Delta w_{i'j'}^1 = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{i'j'}^1} = \eta \sum_k \sum_j (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) \frac{\partial y_j^2(k)}{\partial w_{i'j'}^2}$$

$$\Delta w_{i'j'}^1 = \sum_k \sum_j (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) f^2(x_j^2(k)) w_{j'j}^2(k) f^{1'}(x_{j'}^1(k)) y_{j'}^1(k) \quad (14)$$

On a alors :

$$\delta_{j(k)}^2 = (y_{s_j}(k) - y_j^2(k)) f^{2'}(x_j^2(k)) \quad (15)$$

$$\Delta w_{ji}^2 = \eta \sum_k \delta_j^2(k) y_j^1(k) \quad (16)$$

De même

$$\begin{aligned} \delta_{j(k)}^1 &= \left\{ \sum_l (y_{s_l}(k) - y_l^2(k)) f^{2'}(x_l^2(k)) w_{jl}^2(k) \right\} f^{1'}(x_j^1(k)) \\ &= \left\{ \sum_l \delta_l^2(k) w_{jl}^2(k) \right\} f^{1'}(x_j^1(k)) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Delta w_{jl}^1 = \eta \sum_k \delta_j^1(k) y_j^0(k) \quad (18)$$

On peut également montrer que la relation générale pour toute couche différente de la couche de sortie, on a :

$$\delta_j^{m-1}(k) = \left\{ \sum_l \delta_l^m(k) w_{jl}^m(k) \right\} f^{m-1'}(x_j^{m-1}(k)) \quad (19)$$

$$\Delta w_{ij}^{m-1} = \eta \sum_k \delta_j^{m-1}(k) y_i^{m-2}(k) \quad (20)$$

De ce qui précède découle un certain nombre de remarques :

- On peut choisir la vitesse avec laquelle se fait la mise à jour des poids lors de l'apprentissage en agissant sur η . Il représente un facteur d'accélération appelé ici facteur d'apprentissage.

- Une variante permet l'introduction d'un terme inertiel qui aide à la convergence [LUT 96]^{xxx},

$$w_{ij}^m(n) = w_{ij}^m(n-1) + \Delta w_{ij}^m(n) + \mu \cdot \Delta w_{ij}^m(n-1) \quad (21)$$

Le choix de ce facteur est cependant délicat, on peut d'ailleurs aboutir à des effets inverses ; des oscillations ou un ralentissement de la convergence. Les performances apportées par ce terme ne sont pas toujours convaincantes [REN 95]^{xxxi}.

- L'algorithme de rétropropagation introduit la dérivée première des fonctions d'activation. Comme nous le verrons dans le chapitre suivant, nous utiliserons pour notre application comme fonctions d'activation, la fonction sigmoïde pour la couche cachée et la fonction identité pour la sortie.

- Il est cependant tout à fait envisageable d'utiliser d'autres algorithmes qui ne nécessitent pas de dérivation. Par exemple [BUR 97]^{xxxii} utilise un algorithme de changement aléatoire des poids. Bien que cet algorithme ne prenne pas la pente la plus grande, il y a toujours une bonne probabilité pour qu'un petit nombre d'essais aléatoires trouvent une direction dans la quelle les poids sont ajustés de manière à réduire l'erreur. Dans [EL-S 94]^{xxxiii}, les auteurs exposent une méthode génétique pour l'adaptation des poids. Nous verrons l'utilisation des algorithmes génétiques par la suite.

- Ces méthodes ont pour but de réduire les problèmes rencontrés lors de la convergence. En effet, l'algorithme du gradient est très sensible aux minimums locaux. Le choix d'un facteur d'apprentissage variable permet dans certains cas d'accélérer la convergence [PIC 94]^{xxxiv}. Il arrive cependant qu'on reste au-dessus du critère d'arrêt sans jamais l'atteindre. C'est souvent le signe que le mécanisme d'apprentissage est inadapté, ou que la topologie du réseau ne permet pas d'atteindre ce degré de précision. Dans ce cas, il faut augmenter le nombre de neurones de la couche cachée ou changer de structure.

- Villiers et al. [De V 92]^{xxxv} pensent qu'il n'y a pas de raison d'utiliser deux couches cachées à la place d'une seule couche cachée pour une complexité de réseau 4 donnée. De plus, les réseaux de neurones à deux couches cachées sont plus sensibles

au problème du minimum local durant l'apprentissage (utilisant les méthodes de rétropropagation de l'erreur et du gradient-conjugué).

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le base nécessaire à la compréhension de méthode de réseaux de neurones . Le vocabulaire utilisé par le communauté qui étudient et développent ces méthode est assez vaste et non encore uniformisé. Il nous a donc semblé nécessaire de préciser celui utilisé ici afin de permettre une lecture claire et sans ambiguïté des chapitres qui vont suivre. De nombreuses possibilités d'utilisation de ces techniques sont envisageables rien qu'en ce qui concerne la machine asynchrone et sa commande. Nous présenterons les méthodes pour lesquelles nous les avons utilisées et nous nous garderons de faire des conclusions trop hâtives en ce qui concerne leur supériorité par rapport aux méthodes classiques. Ce n'est pas parce qu'une méthode est nouvelle qu'elle est forcément plus efficace. Nous les comparerons donc de manière objective aux méthodes plus classiques. Nous mettrons en lumière ce que ces techniques apportent comme améliorations sans occulter leurs désavantages.

Chapitre IV : Diagnostic par RNA des défauts d'un moteur

I.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons chercher à identifier les informations fournies par les différentes mesures de courants et tensions et d'essayer de les exploiter pour détecter et localiser le défaut de type cassure de barre pour un moteur asynchrone. Ces informations sont extraites à partir du domaine temporel et du domaine fréquentiel en utilisant la magnitude de la transformée de Fourier et la valeur maximale et Skewness. L'exploitation de ces données est faite par le réseau de neurones choisis, qui est responsable de la classification des différents états du moteur. Après détection et localisation du défaut, une commande tolérante sera étudiée afin de remédier au défaut. Une simulation en utilisant le SIMULINK de MATLAB permettra d'étudier l'influence du défaut et de valider les performances du système de diagnostic proposé.

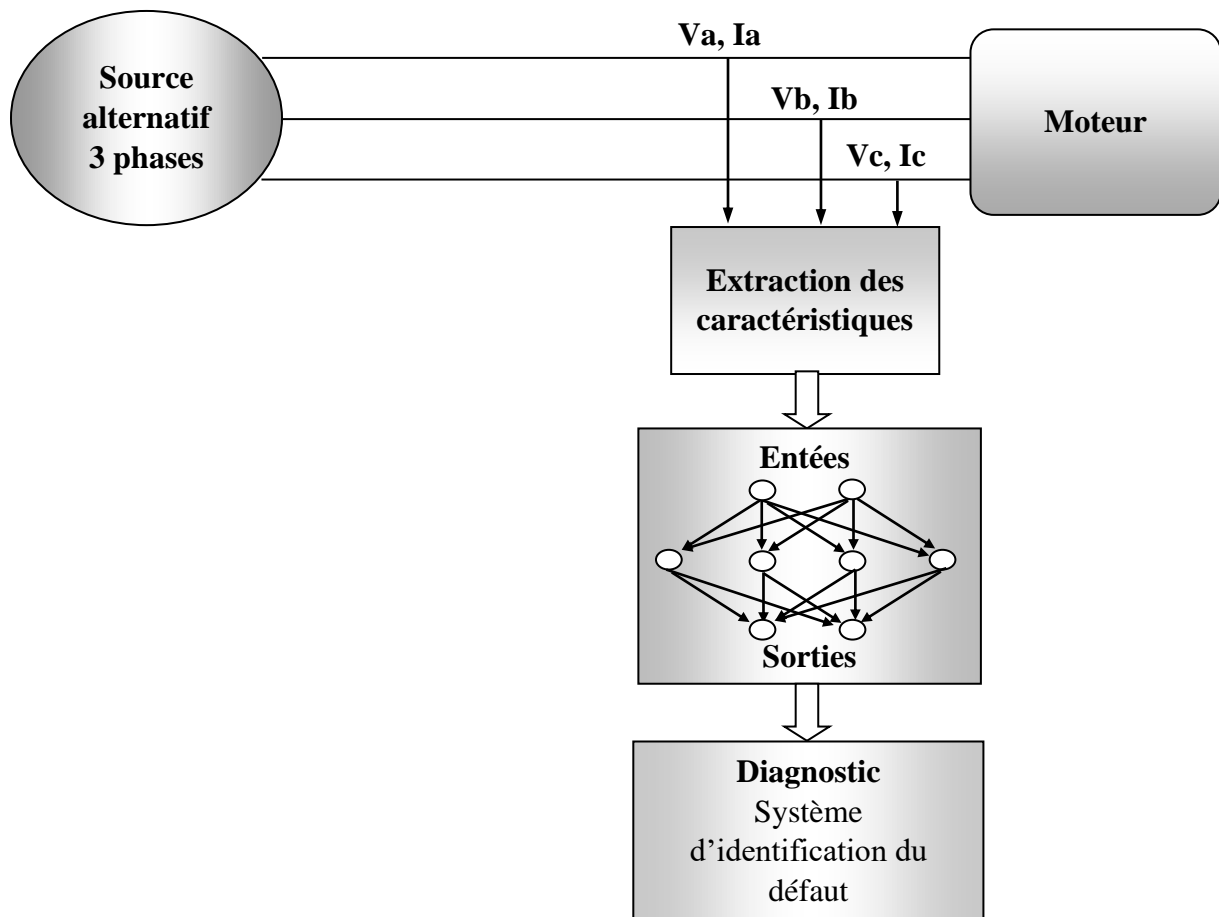


FIGURE 23: STRUCTURE DU SYSTEME DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS

Les étapes pour la mise au point du système à commande tolérante pour le filtrage à base d'UPQC et le même décrit dans le chapitre , il consiste dans le choix de l'architecture du RNA, l'extraction des caractéristiques pour l'apprentissage et le test du RNA, cette première procédure permet la détection et la localisation du défaut. On ajoute à cela la procédure de continuité de service qui consiste à isoler le bras défectueux et le changer. Une fois terminée nous pouvons simuler et étudier les caractéristiques de notre système tolérant aux défauts. En cas d'apparition d'un défaut au niveau du bras numéroté k ($k = \{1, 2, 3\}$), la continuité de service est réalisée selon les étapes suivantes :

- Détection de l'apparition d'un défaut ;
- Localisation du filtre défectueux ;
- Détection du bras défectueux numéroté k , ainsi que de l'interrupteur ;
- Mise à '0' des ordres de commande des deux interrupteurs du bras défectueux ;

- Commande à la fermeture de l'interrupteur bidirectionnel tk;
- Application des ordres de commande des interrupteurs du bras défectueux aux interrupteurs de secours;
- Arrêt de la fonction "détection de défaut";
Lancer la procédure de remplacement (maintenance) en indiquant le bras et l'interrupteur

II. Partie diagnostic du défaut :

II.1. Extraction des caractéristiques pour l'apprentissage du RNA :

II.1.1. La transformé de Fourier Rapide (FFT) :

Comme nous l'avons mentionné auparavant la transformé de Fourier rapide met en évidence les propriétés cachés dans le domaine temporel et les fait apparaitre dans le domaine spectral. Afin d'optimiser notre système de détection et de localisation du défaut nous utilisons la FFT et plus précisément la magnitude.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-jn\omega_k} \quad (22)$$

Avec

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \quad \text{fréquence d'ordre } k \text{ de la sinusoïde.}$$

L'équation de la magnitude est donnée comme suit :

$$\text{Magnitude [FFT(X)]} = \sqrt{(\text{réel[FFT(X)]})^2 + (\text{imag[FFT(X)]})^2} \quad (23)$$

C'est cette dernière équation qui sera prise en considération lors de l'élaboration de la base de données.

II.1.2. *le Skewness et la valeur maximal:*

Plusieurs test on était effectués pour déterminer les meilleurs outils statistiques à utilisées comme caractéristiques pour le classifieur. D'après l'étude effectuée, l'impact des valeurs de skewness et les valeurs maximales sont supérieur à aux valeurs obtenus pour l'écart type, le kurtosis, ou le minimum, et ceci quel que soit les combinaisons possibles.

II.1.3. *L'architecture du réseau de neurones artificiel :*

En prenant en compte les critères pour choisir une architecture du RNA et après des tests, le tableau 5 donne des détails sur l'architecture du réseau choisit.

Nombre de neurones de la couche d'entrée	12	3 neurones pour la max du courant 3 neurones pour le max (magnitude(FFT(FAP))) 3 neurones pour max de la tension 3 neurones pour le max (magnitude(FFT(FAS)))
Nombre des neurones de la couche de sortie	3	Sortie désirée = [X X X]; X= 0 ou 1.
Nombre de couche cachée	2	
Nombres de neurones pour chaque couche cachée	Couche 1: 7 Couche 2: 12	
Nombre d'itération	10000	
Erreur quadratique moyenne	0.0001	
Algorithme d'apprentissage	LM	Algorithme de Levenberg marquadt

TABLEAU 5: ARCHITECTURE PROPOSE POUR LE RNA.

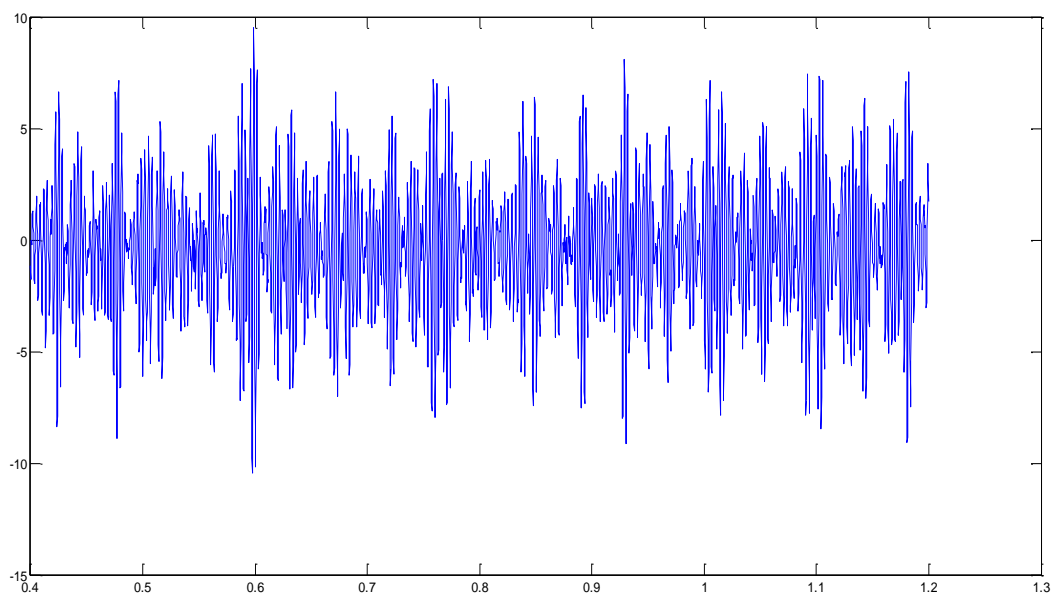
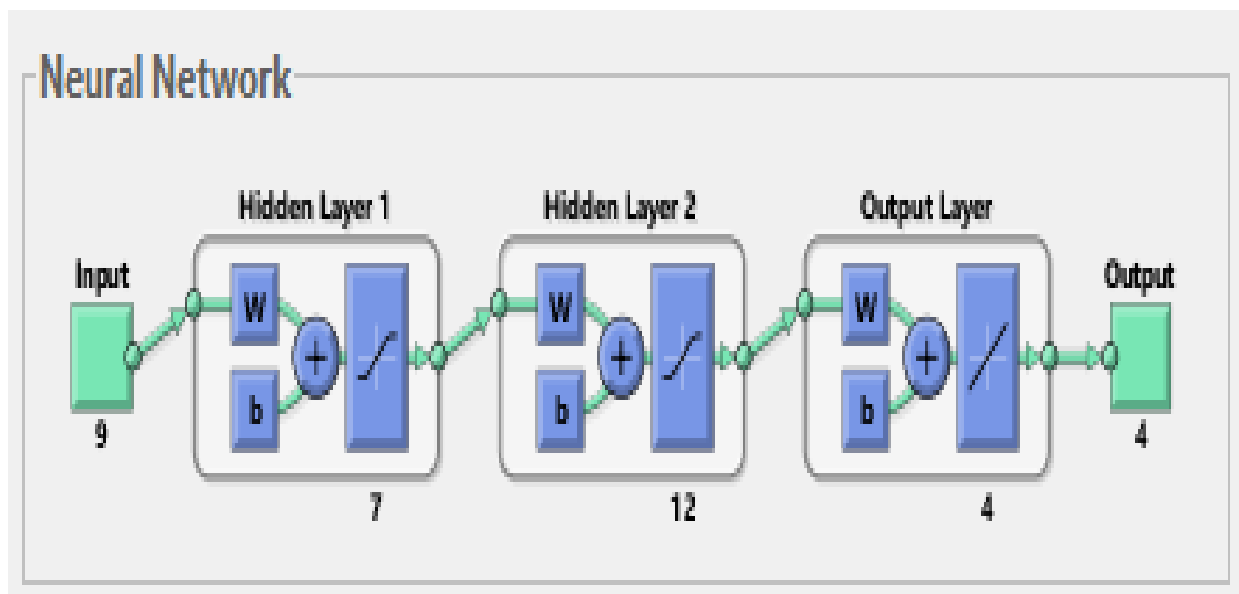


FIGURE 24: SIGNAL COURANT MESURE A PARTIR DU MOTEUR ETAT SAIN.

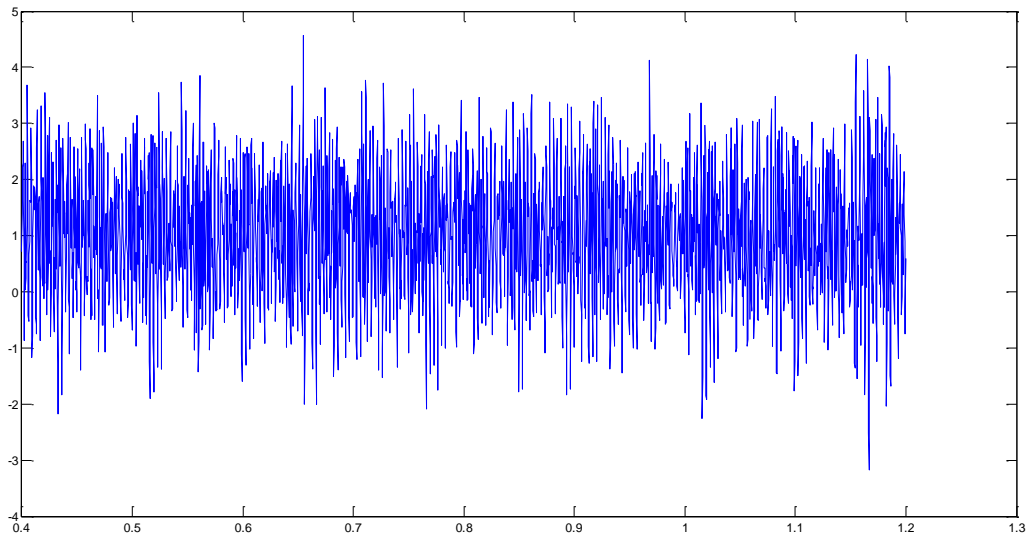


FIGURE 25: SIGNAL COURANT MESURE A PARTIR DU MOTEUR AVEC UN DEFAUT 01 BARRE.

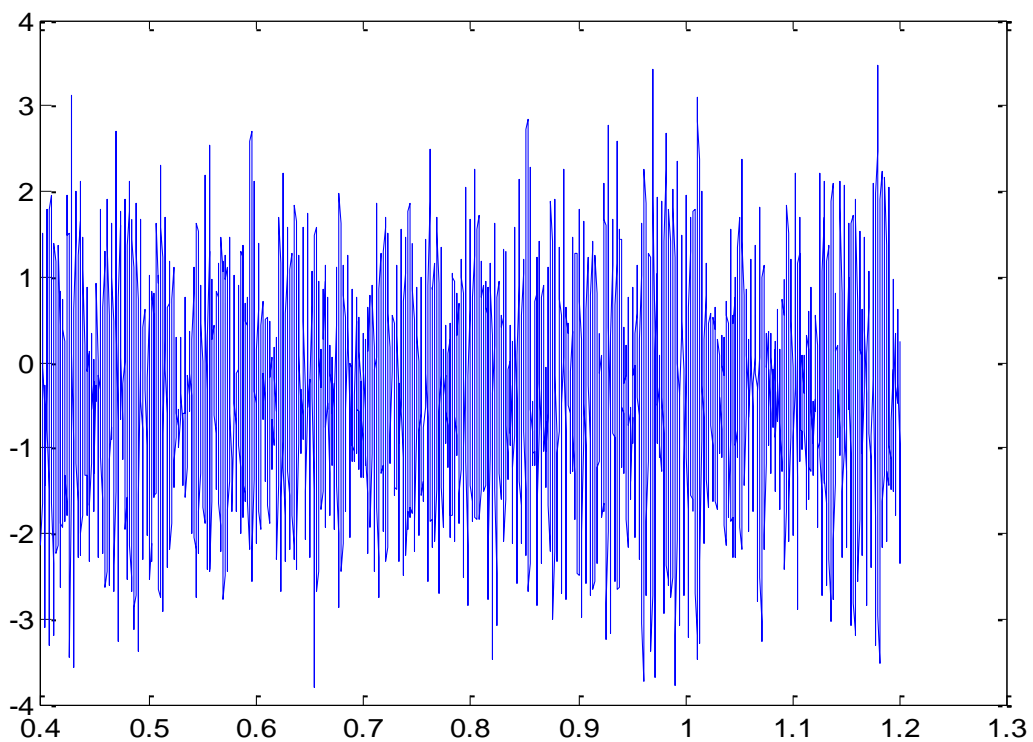


FIGURE 26: SIGNAL COURANT MESURE A PARTIR DU MOTEUR AVEC UN DEFAUT 02 BARRE.

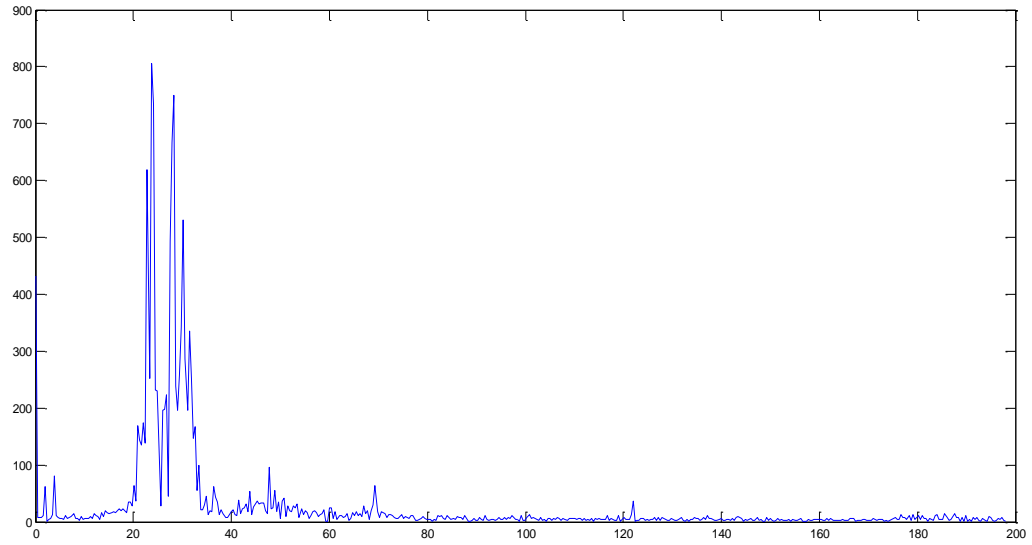


FIGURE 27: REPRESENTATION SPECTRAL DU SIGNAL MESURE SAIN.

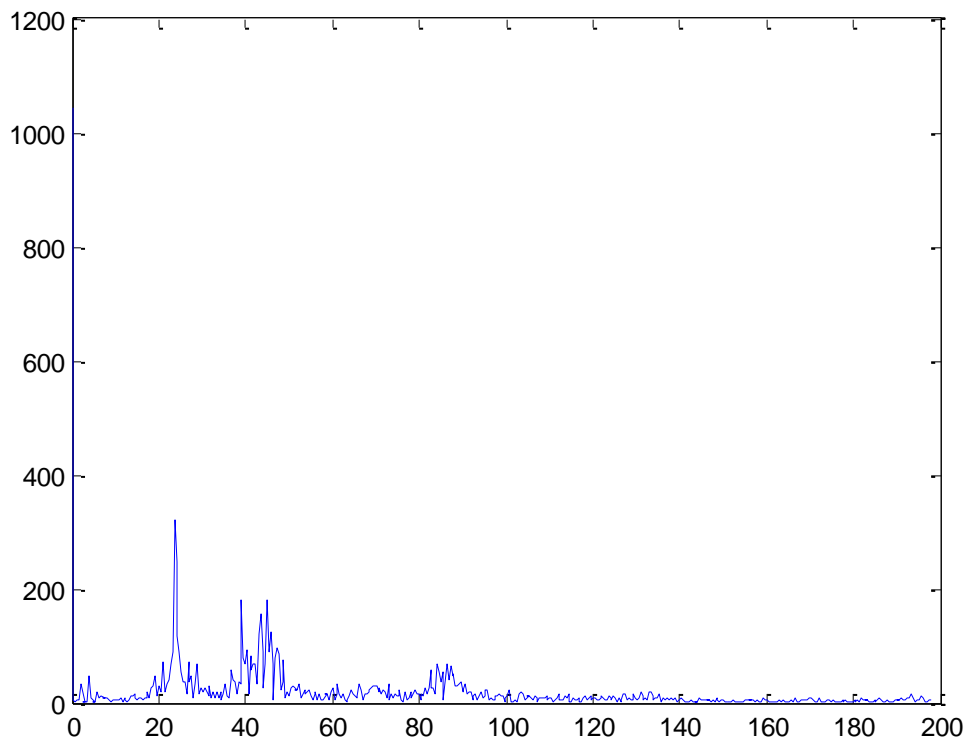


FIGURE 28: REPRESENTATION SPECTRAL DU SIGNAL MESURE AVEC DEFAUT 01 BARRE.

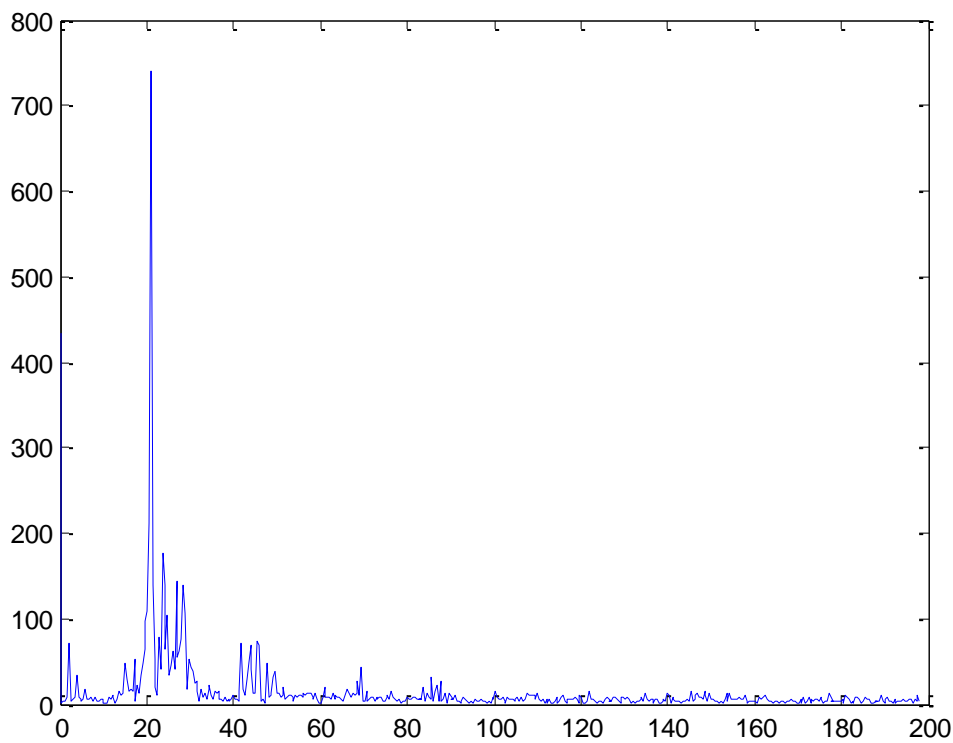


FIGURE 29: REPRESENTATION SPECTRAL DU SIGNAL MESURE AVEC DEFAUT 02 BARRE.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude du système de détection, localisation du défaut de barre d'un moteur asynchrone.

Nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur le RNA, permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le signaler. La méthode proposée détecte l'apparition du défaut concerné et identifie le composant défectueux.

Conclusion générale

LE TRAVAIL REALISE S'ATTARDE SUR LE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES TRIPHASEES. LA CROISSANCE D'UTILISATION DE CE TYPE DE MACHINE ELECTRIQUE, ESSENTIELLEMENT DUE A SA SIMPLICITE DE CONSTRUCTION, SON FAIBLE COUT D'ACHAT ET DE FABRICATION, SA ROBUSTESSE MECANIQUE. A TITRE D'EXEMPLE, AUX ETAT-UNIS, 70 MILLIONS DE MOTEURS ASYNCHRONES SONT FABRIQUE CHAQUE ANNEE POUR UNE POPULATION D'ENVIRON 300 MILLIONS DE PERSONNES, IL EST CLAIR QUE CES MOTEURS NOUS CONDUISENT A PORTER UNE ATTENTION DE PLUS EN PLUS SERIEUSE QUANT A LEUR FONCTIONNEMENT ET LEUR DISPONIBILITE.

Les défauts qui apparaissent dans la machine électrique ont des causes variées. Ils peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service. Dans ce mémoire, nous avons présenté de façon succincte et non exhaustive, les modèles de comportement dynamique de la machine asynchrone destinés soit à la recherche des signatures des défauts, soit à l'analyse de fonctionnement en présence de défaut, ainsi qu'à l'étude des paramètres permettant de détecter l'apparition de défauts.

Nous avons ensuite présenté les différentes approches de la modélisation, les techniques et autres outils de diagnostic étant très nombreuses, nous les avons classées en une approche: une approche réseau de neurone permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le signaler. La méthode proposée détecte l'apparition du défaut concerné et identifie le composant défectueux.

BIBLIOGRAPHIE

- i [Ker 84] L. Kerszenbaum et C. F. Landy, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- ii Bouzaouit Azzedine, « Influence de la Vibration sur la Durée de Vie des Roulements », thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2008.
- iii [Sch 99] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- v K. Merah, « Diagnostique des Défauts de Roulement d'un Moteur par Analyse Vibratoire (Etude Comparative avec l'Analyse du Courant Statorique) », thèse de magistère, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 2016.
- vi Yassa Nacera, « Modélisation des Machines Asynchrones Dédiées au Diagnostic des Défauts de Court-Circuit Inter- Spires et des Cassures de Barres et d'Anneaux », thèse de magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, Mai 2009.
- vii Saidji Rebiha, Abdellouad Samia, « L'Impact des Défauts de l'Onduleur Triphasé sur le Diagnostic du Moteur Asynchrone », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, Juin 2017.
- viii Andrian Ceban, « Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques », thèse de doctorat, Université d'Artois, France, Février 2012.
- ix Andrian Ceban, « Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques », thèse de doctorat, Université d'Artois, France, Février 2012.
- x O. V. Thorsen and M. Dalva, « A survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, And Oil Refineries » Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 31, pp. 1186-1196, 1995.
- xi A. H. Bonnett and C. Yung, « Increased Efficiency Versus Increased Reliability» Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- xii Didier G, « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillance », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 2004.

-
- ^{xiii} Didier G, « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillance », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 2004.
- ^{xiv} Isri Imen, Seddik Asmaa Khadidja, « Diagnostic des Défauts de Roulements d'un Moteur Asynchrone par la Technique Vibratoire et la Technique du Courant Statorique », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Juin 2017.
- ^{xv} Belhamdi Saad, « Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Contrôlé par Différentes Techniques de Commande », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, Mai 2014.
- ^{xvi} Baba Fatima, « Contribution à la Modélisation et à La Commande de la Machine Asynchrone : Application au diagnostic des défauts statoriques », thèse de doctorat, Université Constantine 1, Algérie, Juin 2014.
- ^{xvii} J. Morel, « Surveillance Vibratoire et Maintenance Prédictive », Technique de l'ingénieur, R6100
- ^{xviii} Belhamdi Saad, « Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Contrôlé par Différentes Techniques de Commande », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, Mai 2014.
- ^{xix} Touafek Ishak, « Extraction d'Indicateurs Robustes pour le Diagnostic des Défauts Mécaniques : Comparaison de L'EMD et des Ondelettes (WT) », thèse de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- ^{xx} A. H. Bonnett and C. Yung, « Increased Efficiency Versus Increased Reliability» Industry Applications Magazine, IEEE, vol. 14, pp. 29-36, 2008.
- ^{xxi} D. AUGÉIX, « Analyse vibratoire des machines tournantes », Technique de l'Ingénieur, BM 5 145.
- ^{xxii} Isri Imen, Seddik Asmaa Khadidja, « Diagnostic des Défauts de Roulements d'un Moteur Asynchrone par la Technique Vibratoire et la Technique du Courant Statorique », mémoire de master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Juin 2017.
- ^{xxiii} O. Ondel, « Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application à un Ensemble Convertisseur-Machine Asynchrone », thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, Octobre 2006.
- ^{xxiv} Didier G, « Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillance », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, 2004

-
- xxv Malek Bouharakat, « Etude de l'Evolution des Courants Rotoriques d'une Machine Asynchrone à Cage en Régime Dynamique », thèse de doctorat, Université de Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Algérie, Février 2006.
- xxvi [JOD 94] Jodouin, J-F., Les réseaux de neurones; principes et définition, Hermes, 1994, 124p.
- xxvii Les termes en exposant représentent, non pas la fonction puissance, mais plutôt l'indice (m) de la couche du réseau de neurones.
- xxviii [PIC 94] Picton, P., Introduction to neural networks, Ed. Macmillan, 1994, 168p
- xxix [THI 97] Thiria, S.; Lechevallier, Y.; Gascuel, O.; Canu, S., Statistique et méthodes neuronales, Ed. Dunod, 1997.
- xxx [LUT 96] Lutaud-Brunet, M., Identification et contrôle de processus par réseaux neuroflous, Thèse de Doctorat de l'Université de d'Evry Val d'Essonne, 1996.
- xxxi [REN 95] Renders, J. M., Algorithmes génétiques et réseaux de neurones, Ed. Hermès, 1995, 349p
- xxxii [BUR 97] Burton, B.; Kamran, F.; Harley, R. G.; Habetler, T. G.; Brooke, M. A.; Poddar, R., "Identification and control of induction motor stator currents using fast online random training of a neural network," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, pp. 697-704, May/June 1997.
- xxxiii [EL-S 94] El-Sharkawi, M. A.; Huang, S. J., "Ancillary techniques for neural network applications," IEEE International Conf. On Neural Networks, NY, USA, 1994, vol. 6, pp. 3724-3729.
- xxxiv [PIC 94] Picton, P., Introduction to neural networks, Ed. Macmillan, 1994, 168p.
- xxxv [De V 92] De Villier, J.; Barnard, E., "Backpropagation neural nets with one and two hidden layers," IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 4, n°1, pp. 136-141, January. 1992.