

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par

➤ *Benyahia Oussama*

➤ *Belazzoug Walid*

Intitulé

*Diagnostic d'un défaut rotorique dans les moteurs asynchrones
triphases à cage par RNA*

Soutenu le : 25 / 06 / 2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. MEDJMADJ Slimane</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. TALHAOUI Hicham</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. IRATNI Abdelhamid</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. AISSA Oualid</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

A l'issue de cette fin de travail nous adressons nos remerciements premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études

Au terme de ces deux années de travail fructueux, nous tenons à remercier Mr : H.Talhaoui pour le suivi assidu et les conseils qu'il nous a prodigués tout au long des travaux de recherche.

Nos tous remerciements les plus sincères vont aussi aux membres de jury qui vont corriger et juger notre humble travail.

Un grand MERCI à tous ceux qui nous ont aidé et encouragé de près ou de loin.

Oussama et Walid

Dédicaces

Je dédie ce fruit du travail :

À ma mère et à mon père qui ont tout le crédit

À mes frères et toute la famille.

À tous les amis.

À tous mes professeurs.

À vous tous un grand merci.

*À mon binôme « OUSSAMA » que je remercie pour avoir
partagé avec moi ces moments pour la réalisation de ce
modeste travail et j'espère en garder de très bons souvenirs.*

Walid

Dédicaces

Je dédie ce fruit du travail :

À ma mère et à mon père qui ont tout le crédit

À mes frères et toute la famille.

À tous les amis.

À tous mes professeurs.

À vous tous un grand merci.

*À mon binôme « WALID » que je remercie pour avoir partagé
avec moi ces moments pour la réalisation de ce modeste
travail et j'espère en garder de très bons souvenirs.*

Oussama

Résumé : Dans ce travail, nous avons modélisé et simulé la machine asynchrone pour le diagnostic du défaut de cassure des barres rotoriques. Ce diagnostic est basé sur deux techniques. La première réside dans l'application du traitement du signal qui est une solution efficace au problème du diagnostic du défaut. La seconde est basée sur un réseau de neurones, qui est l'un des meilleurs outils de diagnostic automatique des défauts. Cette technique permet de diagnostiquer et de déterminer le nombre de barres cassées malgré le changement de la charge.

Mots clés : Diagnostic, machine asynchrone, traitement du signal, réseau de neurones.

ملخص في هذا العمل، قمنا بنمذجة ومحاكاة آلة غير متزامنة من أجل تشخيص خطأ كسر قضيب الدوار. يعتمد هذا التشخيص على تقنيتين. الأولى تكمن في تطبيق معالجة الإشارات التي تعد حلاً فعالاً لمشكلة تشخيص الخطأ. والثاني يعتمد على الشبكة العصبية التي تعتبر من أفضل الطرق لتشخيص الأعطال تلقائياً. تتيح هذه التقنية إمكانية تشخيص وتحديد عدد الأشرطة المكسورة على الرغم من التغيير في الحمولة.

كلمات مفتاحية: تشخيص، آلة غير متزامنة، معالجة الإشارات، الشبكة العصبية.

Abstract: In this work, we have modeled and simulated the asynchronous machine for the diagnosis of the rotor bar breakage fault. This diagnosis is based on two techniques. The first is the application of signal processing which is an efficient solution to the problem of fault diagnosis. The second is based on a neural network, which is one of the best tools for automatic fault diagnosis. This technique allows to diagnose and determine the number of broken bars despite the change of the load.

Keywords: Diagnosis, asynchronous machine, signal processing, neural network.

Liste des figures

Liste des figures

Figure. I. 1. Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil	3
Figure. I. 2. Stator d'une machine asynchrone	4
Figure. I. 3. Rotor bobiné	4
Figure. I. 4. Rotor à cage d'écureuil	5
Figure. I. 5. Présentation d'un court-circuit dans une bobine	7
Figure. I. 6. Défaut d'un rotor à cage d'écureuil	7
Figure. I. 7. Roulement à bille	8
Figure. I. 8. Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte	9
Figure. I. 9. Représentation schématique de la machine asynchrone triphasée	10
Figure. I. 10. Grandeur électrique et mécanique pour un fonctionnement sain du moteur	13-14
Figure. II. 1. Différents types de maintenance	16
Figure. II. 2. Principe de l'estimation d'état	18
Figure. II. 3. Génération des résidus	19
Figure. II. 4. Modélisation du rotor en défaut (une barre cassé)	19
Figure. II. 5. Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	20
Figure. II. 6. Résultats de la simulation de la machine en présence de défauts dans le rotor	22-23
Figure. II. 7. FFT du courant statorique	24-25
Figure. II. 8. Spectre de la vitesse	27-28
Figure. II. 9. Spectre du couple électromagnétique	29-30
Figure. III. 1. Neurone artificiel	34
Figure. III. 2. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge(une barre cassée)	37-38
Figure. III. 3. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (deux barres cassées)	38-39
Figure. III. 4. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (trois barres cassées)	40-41

Figure. III. 5. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction du nombre de barres cassées.	41-42
Figure. III. 6. Les entrées de l'apprentissage du RNA.	43
Figure. III. 7. Schéma de simulation d'un réseau de neurones.	44
Figure. III. 8. Vecteurs à classifier.	44
Figure. III .9. Vecteurs à classifier (test).	45
Figure. III .10. Sorties d'apprentissage et d'erreurs du RNA	46-47

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau. I. 1. Paramètres de la machine utilisée pour la simulation	13
Tableau. II. 1. Fréquences calculées et déduites (défaut d'une seule barre cassée)	26
Tableau. II. 2. Fréquences calculées et déduites (défaut de deux barres cassées)	26
Tableau. II. 3. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées)	26
Tableau. II. 4. Fréquences calculées et déduites, (défaut d'une seule barre cassée)	31
Tableau. II. 5. Fréquences calculées et déduites (défaut de deux barres cassées)	31
Tableau. II. 6. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées)	31
Tableau. II. 7. Fréquences calculées et déduites (défaut d'une seule barre cassée)	31
Tableau. II. 8. Fréquences calculées et déduites (défaut de deux barres cassées)	31
Tableau. II.9. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées)	31
Tableau. III. 1. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge(une barre cassée)	37
Tableau. III. 2. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge(deux barres cassées)	38
Tableau. III. 3. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (trois barres cassées)	39

Notations et symboles

Notations et symboles

V_{abc}	Les tensions statoriques
s,r	Indices stator et rotor, respectivement
a	Angle électrique entre deux mailles rotoriques
$[A]$	Matrice fondamentale qui caractérise le système.
$[X]$	Vecteur d'état
$[U]$	Entrée de la machine
$[Y]$	Sortie de la machine
d, q	Indices pour les composantes de Park directe et en quadrature, respectivement
U_{dqs}	Composante d et q des tensions statoriques.
i_r	Courants rotorique suivant les axes a_r, b_r, c_r
α	Angle électrique entre deux mailles rotoriques.
i_{qs}	Composante q des courant statorique
i_{ds}	Composante d des courant statorique
φ_{dqs}	Composante d et q du flux statorique
φ_r	Flux statoriques suivant les axes a_r, b_r, c_r
φ_{qr}	Composante q du flux rotorique
φ_{dr}	Composante d du flux rotorique
R_s	Résistance statorique
R_r	Résistance rotorique
$R_{\text{défaut}}$	Résistance de défaut rotorique
L_m	Inductance mutuelle
L_f	Inductance de fuite du stator
ω	La pulsation électrique
θ	angle électrique de la position du rotor
θ_0	angle repérant la phase en défaut type rupture de barre
$Q(\theta_0)$	Matrice situant l'angle de la barre cassée au rotor
p	Nombre de paires de pôles
P	Puissance

g	Glissement
f_s	Fréquence d'alimentation
f_v	fréquences caractéristiques des vibrations.
f_{cc}	Fréquence de court-circuit
f	Coefficient de frottement
k	caractérise la barre cassée.
A	Amplitude de signal
Ω	Vitesse mécanique du rotor
ω_r	Vitesse angulaire électrique du rotor
ω	Vitesse du rotor
w_s	Vitesse de synchronisme
C_{em}	Couple électromagnétique de la machine
C_r	Couple résistant
J	moment d'inertie
η_0	Pourcentage de barres cassées
n_{bc}	Nombre de barres cassées au rotor
n_b	Nombre total de barres au rotor
n_l	Vitesse du champ tournant
FFT	Transformée de fourier rapide
MAS	Machine asynchrone
RNA	Réseaux de neurones artificiels
MLP	(en anglais Multilayer Perceptron MLP).
RBF	(en anglais Radial Basis Function RBF).

Sommaire

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notation et symboles	
Sommaire	
Introduction générale	01
<i>Chapitre I : Généralités sur le diagnostic des défauts et la modélisation des machines asynchrones</i>	
I.1 Introduction	02
I.2 Constitution de la machine asynchrone	02
I.2.1 Stator	03
I.2.2 Rotor	04
I.2.3 Paliers	05
I.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	05
I.4 Défauts dus à la machine asynchrone	06
I.4.1 Défaillances d'ordre électriques	06
I.4.1.1 Défauts statoriques	06
I.4.1.2 Défauts rotorique	07
I.4.2 Défauts mécanique	08
I.4.2.1 Défauts de roulements	08
I.4.2.2 Défauts d'excentricité	09
I.5 Modélisation de la machine asynchrone	10
I.5.1 Représentation d'état du modèle de la MAS	11
I.5.1.1 Équation mécanique	12
I.6 Simulation de la MAS	12
I.6.1 Les paramètres de la MAS	12
I.6.2 Cas d'une machine saine	13

I.6.3 Résultats de simulation	13
I.7 Conclusion	15
<i>Chapitre II : Analyse d'un défaut rotorique par FFT</i>	
II.1 Introduction	16
Différents types de maintenance	16
II.2.1 Maintenance	16
II.3. Méthodes de diagnostic	17
II.3.1 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique	17
II.3.2 Méthodes avec modèle	18
II.4 Modèle du défaut rotorique de la machine asynchrone	19
II.5 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique	20
II.6 Simulation du comportement de la machine en présence de défauts	21
II.6 Transformation de fourrier	23
II.6.1 Transformée de Fourier Rapide	23
II.7 Application de l'analyse spectrale	24
II.7.1 Résultats de la simulation	24
II.8 Conclusion	32
<i>Chapitre III : Diagnostic d'un défaut rotorique par RNA</i>	
III.1 Introduction	33
III.2 Réseaux de neurone artificiel	33
III.2.1 Définition	33
III.2.2 Neurone formel	33
III.2.3 Avantages des réseaux de neurones	34
III.2.4 Inconvénients des réseaux de neurones	34
III.2.5 Principe de diagnostic par les réseaux de neurones	34
III.3 Catégories de réseaux de neurones	35
III.4 Propriétés des RNA	35
III.5 Choix du modèle neuronal	35
III.6 Types de réseaux de neurones	36
III.6.1 Réseaux de neurones multicouches (MLP)	36
III.6.2 Réseaux de neurones à fonction radiale (RBF)	36

III.7 Résultats de la simulation	36
III.8 Conclusion	47
Conclusion générale	48
Bibliographie	

Introduction générale

Introduction générale

Les moteurs asynchrones sont très importants dans les installations industrielles en raison de leur robustesse, leur simplicité, leur facilité de réparation, etc.... Ce type de moteur est composé de deux parties principales : stator (partie fixe) et rotor (partie tournante) [1]. La machine asynchrone est affectée par différents défauts, la plupart de ces défauts se trouvent dans ces deux parties principales (stator et rotor), ces défauts peuvent conduire à de nombreuses procédures de diagnostic [2].

Pour diagnostiquer les défauts des machines, il existe un large ensemble de techniques, dont l'utilisation est basée sur des modèles et des méthodes analytiques [3].

Pour diagnostiquer les défauts du rotor en ligne, les réseaux de neurones artificiels (RNA) permettent de réaliser cet objectif, où les réseaux neuronaux artificiels (RNA) font partie des méthodes de développement de l'intelligence artificielle [4].

L'étude de ce mémoire se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre traite les divers défauts qui peuvent apparaître dans la machine à induction, ainsi que la simulation du moteur asynchrone (à l'état sain).

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone, ainsi que la simulation du moteur asynchrone avec défaut (rupture des barres). Puis dans ce chapitre on a présenté les résultats de la simulation par analyse spectrale pour le courant statorique, la vitesse de rotation et du couple électromagnétique.

Le dernier chapitre présente une étude détaillée du modèle RNA pour la détection de défaut, puis dans ce chapitre on a présenté une simulation de la méthode RNA pour la détection des défauts du rotor dans une machine asynchrone.

À la fin, une conclusion générale sera présentée avec des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le diagnostic des défauts et la modélisation des machines asynchrones

I.1 Introduction

En général, la machine à induction est considérée comme l'une des machines les plus utilisées dans l'industrie et ses applications pour plusieurs considérations, dont les plus importantes sont : la robustesse, la simplicité et le prix raisonnable. Il existe deux types de moteurs asynchrones :

- Le moteur asynchrone monophasé ;
- Le moteur asynchrone triphasé.

Les moteurs asynchrones (M.A.S) triphasés représentent plus de 80 % des moteurs électriques utilisés dans l'industrie. Ils servent à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétiques.

Cependant, la machine asynchrone, comme de nombreux systèmes électriques, est sujette à plusieurs problèmes et défauts, spécialement dans les zones industrielles. Pour le bon fonctionnement du système et de la machine à induction, toute perturbation ou défaut doit être surveillé dès son apparition, afin d'éviter des dégâts importants et de maintenir le service au minimum [05]. Dans ce travail, nous intéressons au moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Dans ce chapitre, nous présenterons les composants d'une machine asynchrone et les défauts qui peuvent survenir, puis nous modélisons et simulons cette machine dans un état sain. Ensuite, les résultats de la simulation seront présentés afin de valider le modèle utilisé

I.2 Constitution de la machine asynchrone

Dans cette partie, nous présentons certains des éléments qui composent les machines asynchrones. Cette présentation nous permettra de comprendre comment la machine asynchrone est réalisée physiquement.

La machine asynchrone triphasée se compose de trois parties essentielles, qui sont [06] :

- **Le stator** : partie fixe de la machine reliée à l'alimentation électrique ;
- **Le rotor** : partie tournante, où son rôle est de faire tourner la charge mécanique ;
- **Les paliers** : parties mécaniques qui permettent la mise en rotation de l'arbre moteur.

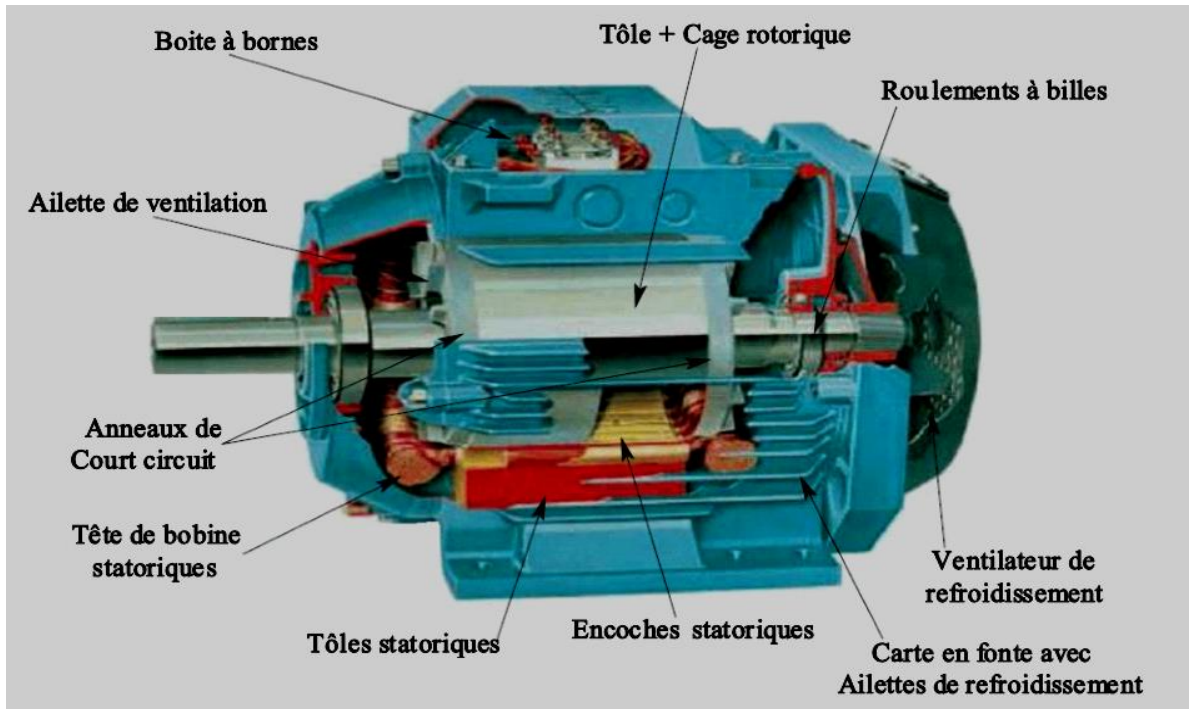


Figure. I. 1. Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [07].

I.2.1 Stator

Le stator c'est la partie statique de la machine asynchrone est réalisé en tôle d'acier pour mettre les enroulements (bobinage) [08].

Ce bobinage statorique peut être divisé en deux parties [09] :

- Les conducteurs d'encoches ;
- Les têtes de bobines.

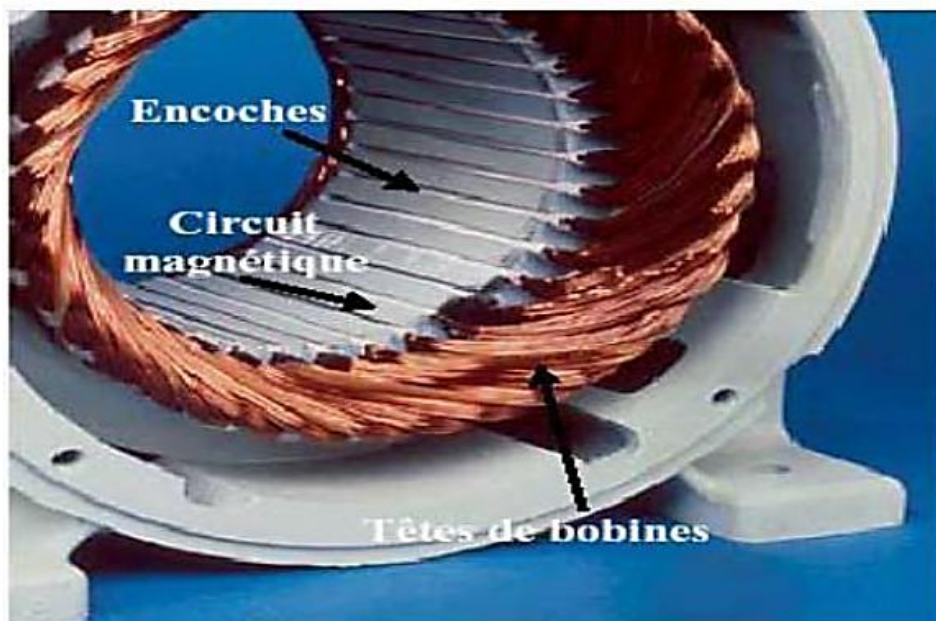


Figure. I. 2. Stator d'une machine asynchrone [06].

I.2.2 Rotor

Le rotor est situé à l'intérieur du stator, qui est la partie mobile du moteur. Il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Grâce au rotor, on peut diviser les moteurs asynchrones en deux familles [10] :

- à cage d'écureuil ;
- à rotor bobiné.

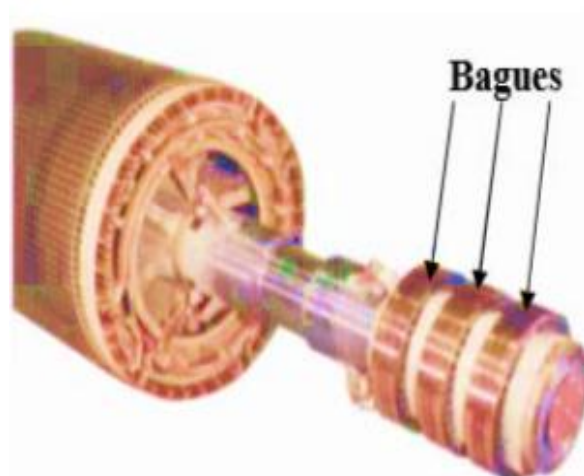


Figure. I. 3. Rotor bobiné [11].

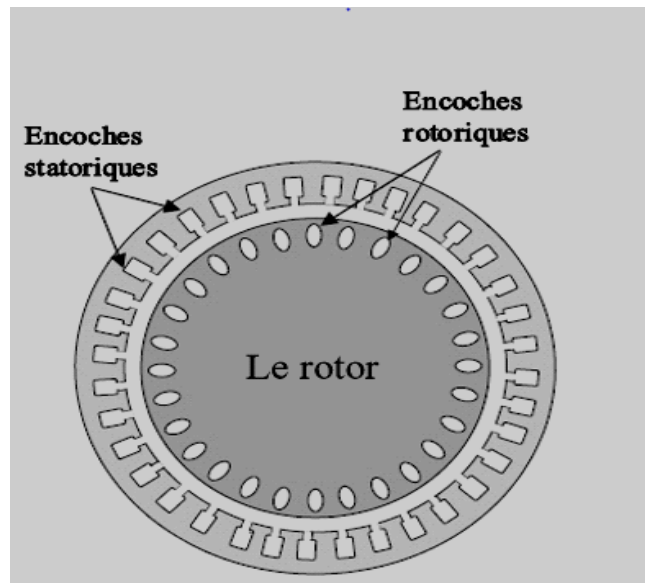


Figure. I. 4. Rotor à cage d'écurieil [07].

I.2.3 Paliers

Sont des dispositifs (organes) utilisés dans la construction mécanique pour supporter et faire tourner un arbre de rotor. Ce dernier se compose de deux éléments importants : les brides et les roulements à billes [12].

I.3 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

La machine asynchrone est fonctionnée sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur, en général, la vitesse de rotation est donnée par l'équation suivante [13] :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

n_1 : Vitesse du champ tournant ;

f : Fréquence d'alimentation ;

p : Nombre de paires de pôles.

L'équation suivante représente le glissement de la machine asynchrone [13] :

$$g = \frac{w_s - w}{w_s} \quad (I.2)$$

Avec :

g : Glissement ;

w_s : Vitesse de synchronisme ;

w : Vitesse du rotor.

I.4 Défauts dûs à la machine asynchrone

Les défauts qui apparaissent dans une machine asynchrone peuvent être divisés en deux parties : défauts mécaniques et défauts électriques. Ces défauts engendrent plusieurs problèmes, où dans des certains cas, ils causent l'arrêt intempestif de la machine, nous devons donc accorder une attention particulière à ces défauts [05].

I.4.1 Défaillances d'ordre électriques

I.4.1.1 Défauts statoriques

Parmi les principales causes de défaillance du stator, on peut citer les suivantes [14] :

- Thermique (surcharge) ;
- Électrique (diélectrique) ;
- Mécanique (bobinage) ;
- Enivrement (agression).

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électrique statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple : les défauts de type court-circuit [15].

D'autres types de court-circuit du stator se distinguent en :

- D'un court-circuit entre spires ;
- D'un court-circuit entre deux phases ;
- D'un court-circuit entre phase et carcasse ;

La figure (I.5) représente d'un court-circuit dans une bobine [16] :

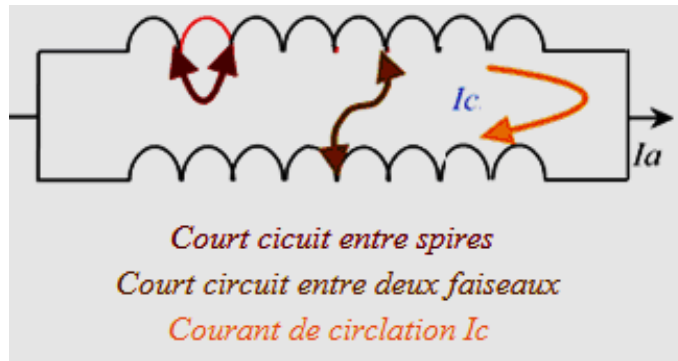


Figure. I. 1. Présentation d'un court-circuit dans une bobine [16].

L'équation suivante représente la fréquence d'un défaut de type court-circuit [09] :

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \pm k \right\} \quad (\text{I.3})$$

f_{cc} : Fréquence de court-circuit ;

f_s : Fréquence d'alimentation ;

$n=1, 2, 3, \dots$

$k=1, 3, 5, \dots$

p : Nombre de paires de pôles.

I.4.1.2 Défauts rotorique

La figure (I.6) montre le rotor d'une machine asynchrone où ces barres conductrices sont régulièrement réparties et forment le circuit du rotor. Cette figure (I.6) montre quelques défauts dans le rotor [09, 14].



Figure. I. 6. Défaut d'un rotor à cage d'écureuil [14].

La présence de défauts de rupture de barre rotorique dans une machine asynchrone génère une asymétrie du rotor, ce qui provoque des raies spectrales supplémentaires autour de la fréquence fondamentale (f_s), la relation de la fréquence est donné sous la forme [17] :

$$f_{brc} = f_s(1 \pm 2kg) \quad (I.4)$$

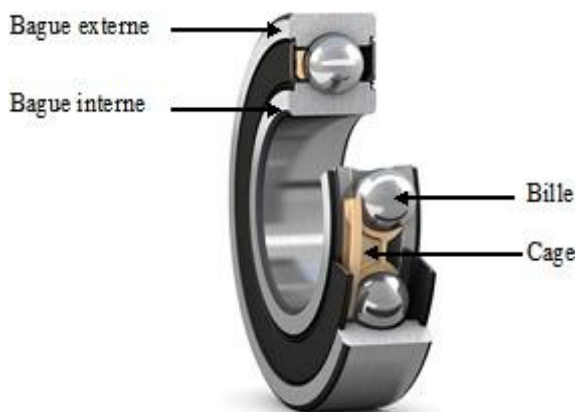
Avec : $k=1, 2, \dots$,

I.4.2 Défauts mécanique

Plus de 40% des défauts d'un moteur asynchrone sont d'ordre mécanique. Parmi les plus importants de ces défauts, nous pouvons trouver : des défauts de roulements, des défauts d'excentricité.... [18].

I.4.2.1 Défauts de roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machine électrique rotative. Les défauts des roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériaux à l'étape de fabrication, les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine [19].



(a) roulement à bille.



(b) défaut de cage à bille

Figure. I.7. Roulement à bille [05].

L'expression suivante représente les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique [09] :

$$f_{rou} = |f_s + kf_v| \quad (I.5)$$

Où :

$k=1, 2, \dots,$

f_v Est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations.

I.4.2.2 Défauts d'excentricité

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer [20].

On distingue trois catégories d'excentricité [05] :

- **L'excentricité statique** : est due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator.
- **L'excentricité dynamique** : le rotor possède un axe de rotation qui tourne autour de l'axe géométrique 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.
- **L'excentricité mixte** : représente la somme des deux cas (statique et dynamique).

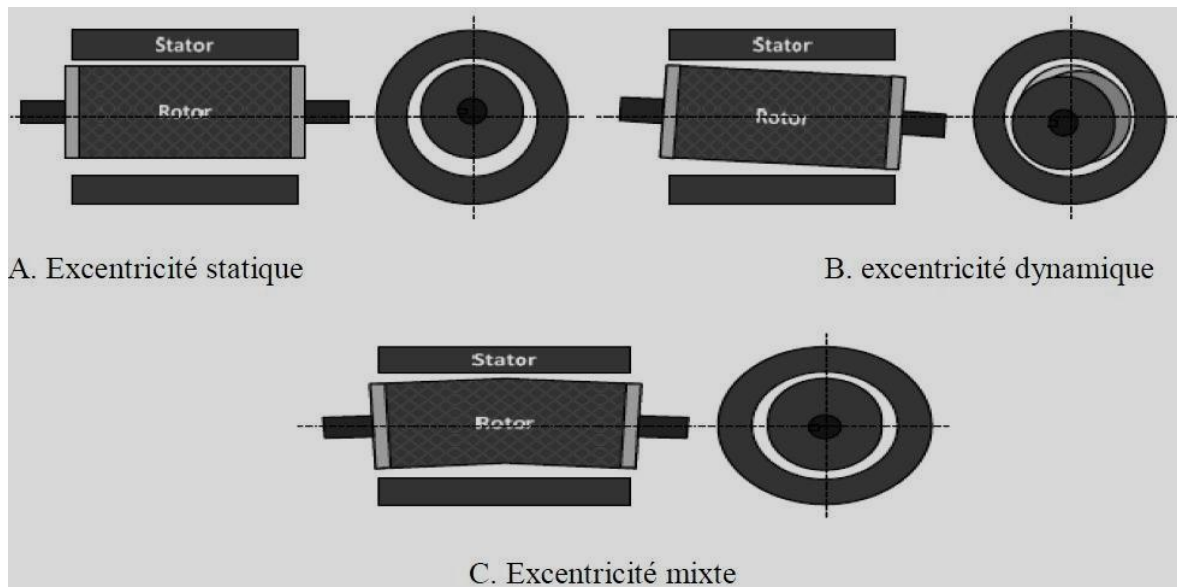


Figure. I. 8. Représentation de l'excentricité statique, dynamique et mixte [21].

Les fréquences des défauts sont données par [9] :

$$f_{exc} = f_s \left[1 \pm \frac{(1-g)}{p} \right] \quad (I.6)$$

Avec : $k=1, 2, 3, \dots,$

I.5 Modélisation de la machine asynchrone

Nous mentionnons certaines des hypothèses formulées afin de simplifier le modèle de la machine asynchrone [22] :

- ✓ L'entrefer constant ;
- ✓ L'effet des encoches négligé ;
- ✓ La distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- ✓ Le circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- ✓ Les pertes ferromagnétiques négligeables ;
- ✓ L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques, ne sont pas pris en compte.

La représentation schématique d'une machine asynchrone peut être montrée dans la figure (I.9).

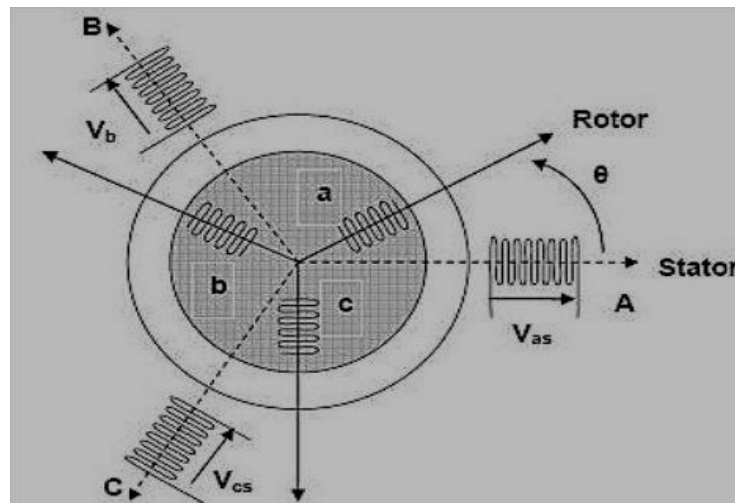


Figure. I. 9. Représentation schématique de la machine asynchrone triphasée [13].

Remarque [22] :

- Les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle ($2\pi/3$), ainsi que les axes rotoriques.
- θ : L'angle entre l'axe de la phase rotorique et l'axe fixe de la phase statorique.

Afin de réduire la complexité du modèle de simulation de la machine asynchrone, nous passons de la représentation triphasée à une représentation équivalente biphasée (transformation de Park). La représentation en biphasé se fait soit par (α - β), ou par (d - q) [13].

I.5.1 Représentation d'état du modèle de la MAS

Les équations suivantes représentent les matrices de la machine asynchrone afin d'effectuer une simulation [23] :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}}(t) = A(\omega)\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) \\ y(t) = C\underline{x}(t) \end{cases} \quad (I.7)$$

Avec :

$$\underline{x} = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]^T, \quad \underline{u} = [U_{ds} \ U_{qs}]^T, \quad \text{et} \quad \underline{y} = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$$

Où :

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_r}{L_f} & \omega & \frac{R_r}{L_f L_m} & \frac{\omega}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_s+R_r}{L_f} & -\frac{\omega}{L_f} & \frac{R_r}{L_f L_m} \\ R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} & 0 \\ 0 & R_r & 0 & -\frac{R_r}{L_m} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ω : La pulsation électrique ;

R_s : Résistance statorique ;

R_r : Résistance rotorique ;

L_m : Inductance mutuelle ;

L_f : Inductance de fuite du stator.

Remarque :

Les étapes de la modélisation sont présentées en détail dans [23].

I.5.1.1 Équation mécanique

L'équation du mouvement de la machine est donnée par la formule suivante [24] :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (I.8)$$

Avec :

C_e : Couple électromagnétique de la machine ;

C_r : Couple résistant ;

J : Moment d'inertie ;

Ω : Vitesse mécanique du rotor.

$\Omega = \frac{\omega}{p}$;

f : Coefficient de frottement.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par (repère de Park) [23] :

$$C_e = p(i_{qs}\Phi_{dr} - i_{ds}\Phi_{qr}) \quad (I.9)$$

I.6 Simulation de la M.A.S

La simulation est un bon moyen d'analyser les résultats des machines électriques et de surveiller leur comportement avec une grande précision. À l'aide de MATLAB/SIMULINK, nous effectuons plusieurs simulations.

I.6.1 Les paramètres de la M.A.S

Le tableau suivant représente les caractéristiques du moteur asynchrone [25] :

Résistance statorique	9.81 Ω
Résistance rotorique	3.83 Ω
Inductance mutuelle	436*10 ⁽⁻³⁾ H
Inductance de fuite du stator	76.2*10 ⁽⁻³⁾ H
Coefficient de frottement	0 N.m.s/rad
Nombre d'encoches du stator	48
Nombre de barres de rotor	28
Fréquence	50 Hz
Moment d'inertie	0.02 Kg.m ²
Puissance	1.1 kW
Nombre de paires de Pôles	2

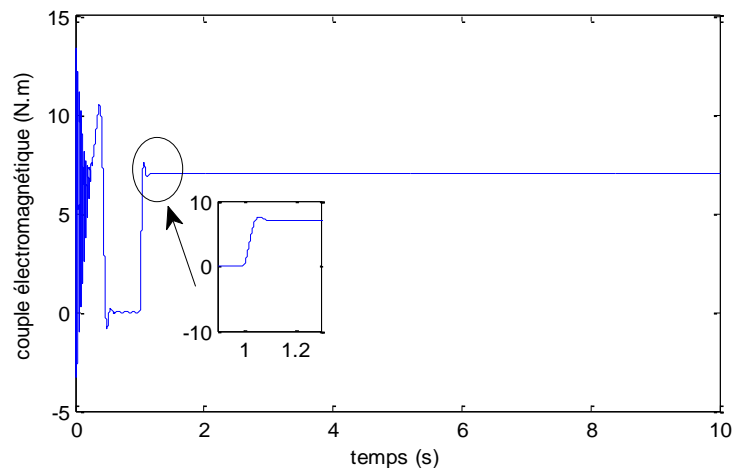
Tableau. I.1. Paramètres de la machine utilisée pour la simulation [25].

I.6.2 Cas d'une machine saine

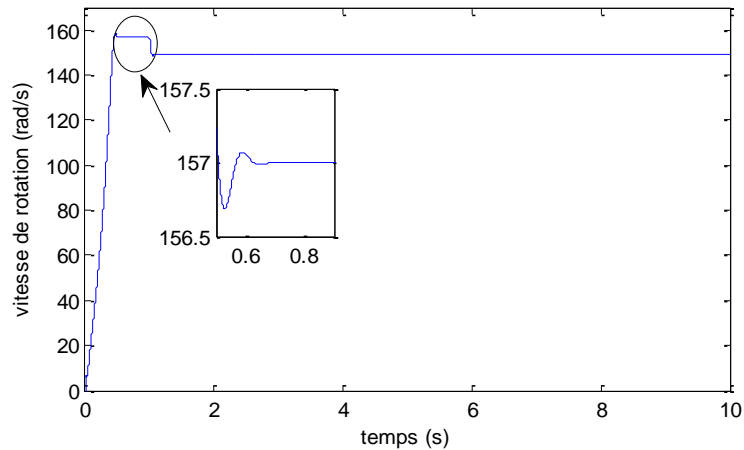
Les figures (I.10.a, b et c) représentent les résultats de la simulation du moteur asynchrone à l'état sain.

Le démarrage a été réalisé sans charge (à vide) sous une tension nominale avec une alimentation triphasée. À l'instant $t= 1s$, nous avons chargé la machine avec un couple résistant nominal de 7 N.m.

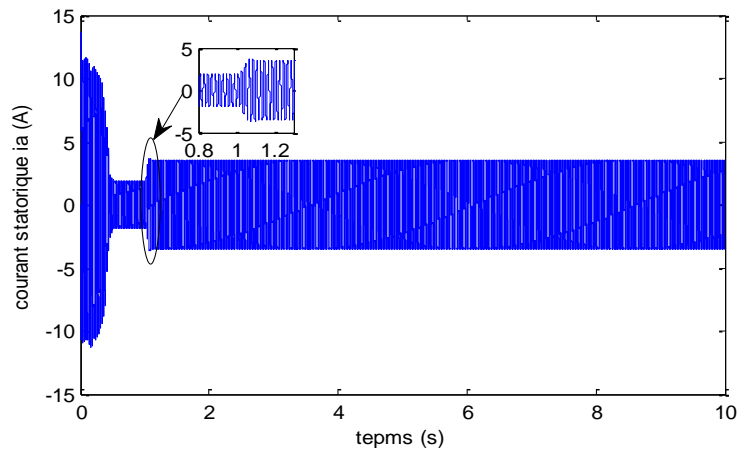
I.6.3 Résultats de simulation



(a) : couple électromagnétique



(b) : Vitesse de rotation



(c) : Courant statorique

Figure. I. 10. Grandeur électrique et mécanique pour un fonctionnement sain du moteur.

À travers les figures (I.10.a, b et c), on remarque les points suivants :

- Pendant le démarrage, des oscillations apparaissent dans le couple électromagnétique, où le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de 13 N.m, avant de se stabiliser à une valeur presque nulle.
- À $t = 1$ s (un couple nominal de 7 N.m est appliqué), le couple électromagnétique suit la valeur du couple de charge (Fig. I.10.a).
- Au démarrage, la vitesse est égale à 157 rad/s et diminue lorsque la machine est chargée (Fig. I. 10.b).
- Le courant statorique évolue en fonction de la charge appliquée au moteur (Fig. I.10.c).

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les composants d'une machine asynchrone, ainsi qu'aux différents défauts qui peuvent apparaître sur cette machine.

Ensuite, nous avons modélisé le moteur asynchrone à cage d'écuréuil, où nous avons présenté des résultats de simulation dans l'état sain. Les résultats obtenus lors de la simulation ont prouvé la validité et l'importance de ce modèle.

La machine asynchrone est affectée par plusieurs défauts, dont le plus important est la rupture des barres du rotor. Le but du deuxième chapitre est de modéliser une machine asynchrone avec défaut (rupture des barres).

Chapitre II
Analyse d'un défaut rotorique
par FFT

II.1 Introduction

La machine asynchrone est affectée par différents défauts, pour diagnostiquer et identifier ces défauts, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de paramètres de cette machine. Les méthodes les plus couramment utilisées pour diagnostiquer les défauts de la machine asynchrone sont la mesure de la température, du bruit, des vibrations, le courant, etc... L'extraction des caractéristiques temporelles et fréquentielles à partir de l'analyse du courant électrique est l'une des méthodes les plus courantes et les plus utilisées [26].

Dans ce chapitre, nous étudierons les méthodes de diagnostic appliquées aux machines asynchrones. Ensuite, nous simulons et diagnostiquons un défaut rotorique dans une machine asynchrone en utilisant la FFT.

II.2 Différents types de maintenance

Les services de maintenance sont essentiels pour anticiper et réparer les défauts des machines ; et réduire au maximum les risques pour les entreprises industrielles [27].

II.2.1 Maintenance

La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié. L'objectif principal d'une politique de maintenance est l'efficacité économique [14]. La figure (II.1) représente les différents types de maintenance.

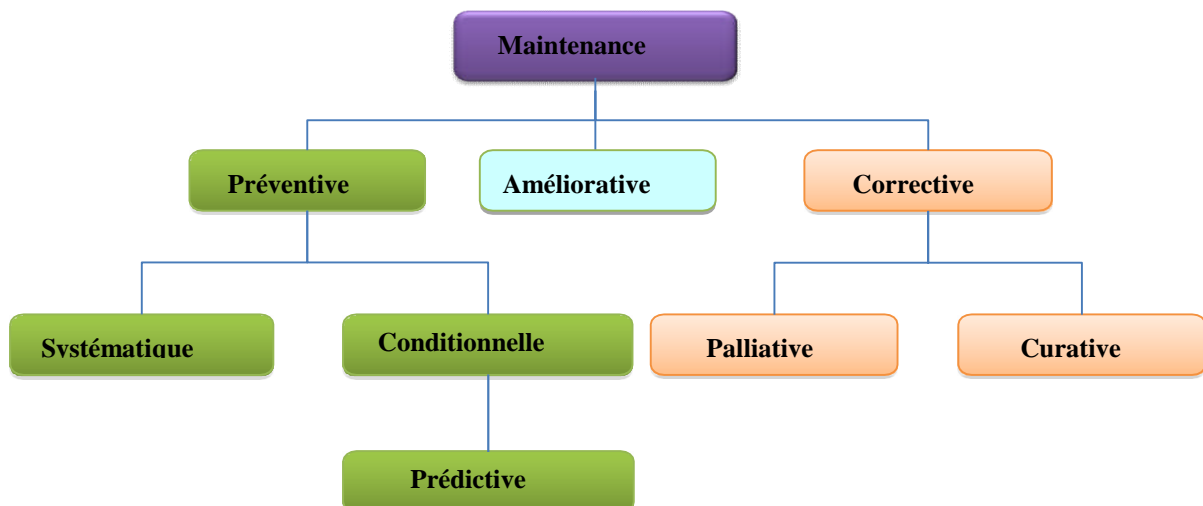


Figure. II. 1. Différents types de maintenance [28].

La maintenance peut être divisée en trois grandes catégories : maintenance corrective, maintenance préventive et maintenance améliorative.

- **Maintenance corrective** : est l'opération de maintenance effectuée après défaillance [29].
- **Maintenance préventive** : maintenance effectuée selon des critères prédéterminés [30].
En distingue deux types de maintenance préventive [29] :
 - ✓ **Maintenance préventive systématique** : maintenance effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.
 - ✓ **Maintenance préventive conditionnelle** : une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.
- **Maintenance améliorative** : l'amélioration des biens d'équipement est un ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise [29].

II.3. Méthodes de diagnostic

Il existe plusieurs méthodes modernes de diagnostic qui vous permettent d'éliminer les défauts dans les machines asynchrones [31].

Dans cette partie, nous présentons certaines des différentes méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques.

Ces méthodes sont nombreuses et peuvent être classées en deux catégories [05] : avec module analytique et sans module analytique.

II.3.1 Méthodes de diagnostic sans modèle analytique

Les méthodes sans modèle peuvent être classées aussi en deux familles : la première se basant sur le traitement de signaux issus de capteurs de grandeurs électriques ou bien mécaniques affectées par les défauts. La deuxième utilise les systèmes experts mettant en œuvre des techniques d'intelligence artificielle [32].

✓ Méthode par intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle imite l'intelligence humaine, inspirée des phénomènes de la nature, heuristique et évolutionnaire, est de plus en plus utilisée dans le domaine de la supervision et du diagnostic, elle a permis d'augmenter l'efficacité du diagnostic.

Elles exploitent les signatures avec ou sans modèle pour réaliser la supervision et le diagnostic du système [05].

✓ Diagnostic des défauts par le traitement du signal

L'approche signale est largement utilisée en diagnostic pour des raisons de simplicité et d'efficacité. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain, qui est ensuite comparée aux signaux mesurés [05].

II.3.2 Méthodes avec modèle

Ces méthodes sont basées sur l'utilisation de modèle du processus à surveiller (avec et sans défaut). Ces méthodes peuvent être divisées comme suit :

✓ Techniques d'estimation d'état

Cette méthode est basée sur des observateurs pour construire l'état du système, où dépend du modèle mathématique. En général, les observateurs sont utilisés dans les systèmes de contrôle pour réduire les écarts entre les systèmes modélisés et mesurés causés par le bruit ou les erreurs de modèle. Ils peuvent être utilisés pour le diagnostic et la recherche de pannes si les paramètres du processus sont connus [32]. La figure (II.2) représente la méthode et le principe de l'estimation d'état [33].

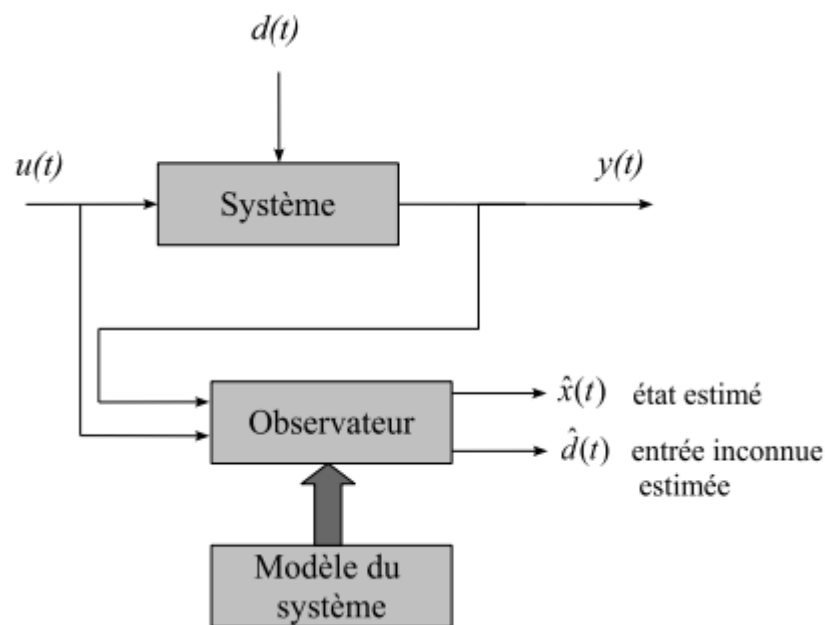


Figure. II. 2. Principe de l'estimation d'état [33].

✓ **Technique de génération des résidus**

Cette méthode dépend des observateurs, où le principe de cette méthode est d'analyser les valeurs résiduelles, qui sont la différence entre les résultats mesurés et ceux estimés par l'observateur [32]. La figure (II.2) représente le principe de la génération des résidus [34]

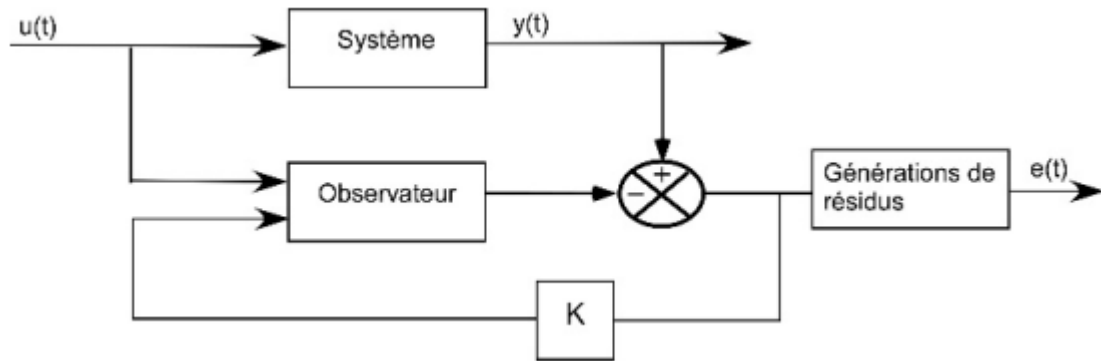


Figure. II. 3. Génération des résidus [34].

II.4 Modèle du défaut rotorique de la machine asynchrone

La figure (II.4) montre le schéma équivalent du rotor en défaut de la machine asynchrone [35].

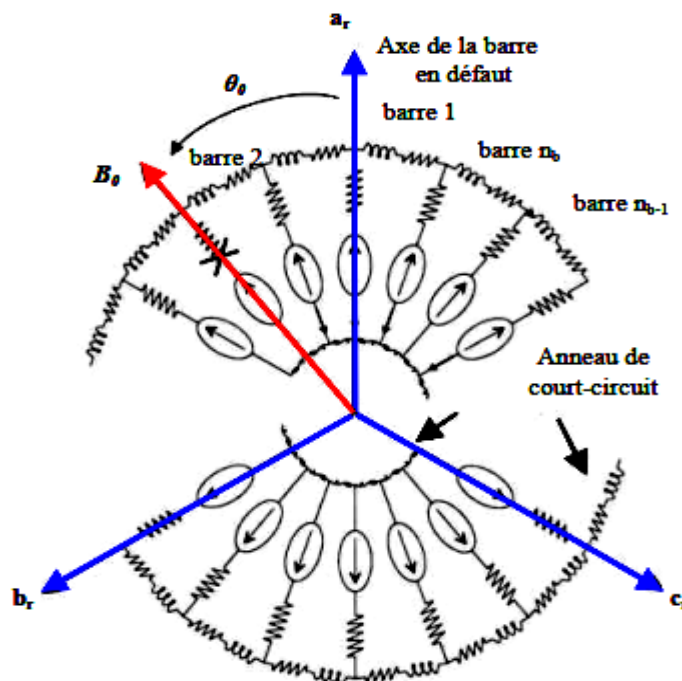


Figure. II. 4. Modélisation du rotor en défaut (une barre cassée) [35].

L'expression du rapport de défaut η_0 s'écrit par [35] :

$$\eta_0 = \frac{3n_{bc}}{n_b} \tag{II.1}$$

Avec :

n_{bc} : Nombre de barres cassées au rotor ;

n_b : Nombre total de barres au rotor.

II.5 Représentation d'état du modèle de défaut rotorique

On remarque à partir de la figure (II.5) le modèle de la machine asynchrone avec défaut rotorique et le même que celui de la machine en fonctionnement sain sauf que la résistance rotorique est remplacée par la résistance équivalente [23].

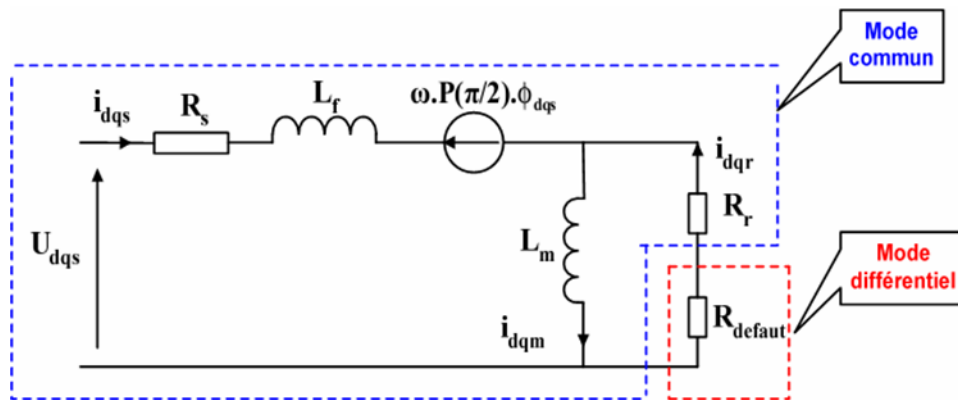


Figure. II. 5. Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone [23].

Les équations suivantes représentent les matrices de la machine asynchrone [23] :

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(\omega)X(t) + Bu(t) \\ Y(t) = CX(t) + Du(t) \end{cases} \tag{II.2}$$

Avec :

$$u = [U_{ds} \ U_{qs}] \quad \text{et} \quad Y = [i_{ds} \ i_{qs}]^T \quad X = [i_{ds} \ i_{qs} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr}]$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} -([R_s] + [R_s])L_f^{-1} - \omega P(\frac{\pi}{2}) & ([R_{eq}]L_m^{-1}) - \omega P(\frac{\pi}{2})L_f^{-1} \\ [R_{eq}] & -[R_{eq}]L_m^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Où :

$$[R_{eq}] = [R_r] + [R_{défaut}] = [R_r] \left(1 - \frac{\alpha}{1+\alpha} Q(\theta_0)\right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$[R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha = \frac{2}{3} \eta_0$$

Et

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0)\sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0)\sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

Avec :

θ_0 : Angle repérant le défaut.

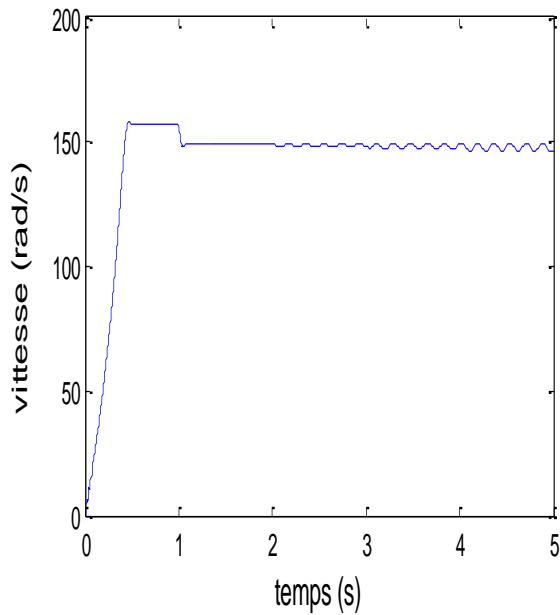
Remarque :

Les étapes de la modélisation sont présentées en détail dans [23].

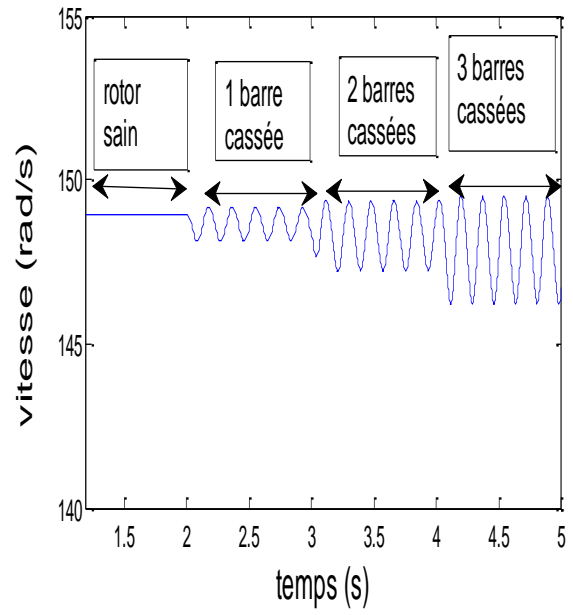
II.6 Simulation du comportement de la machine en présence de défauts

Dans ce test, nous avons simulé un défaut de trois barres, où les défauts ont été introduits comme suit (figure II.6) :

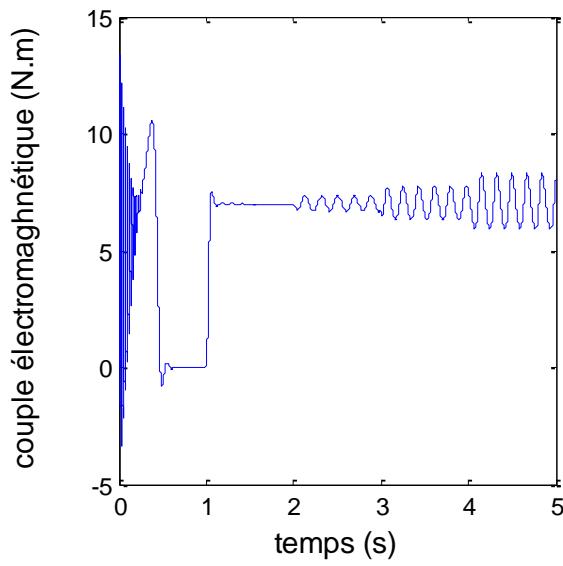
- Une barre cassée à $t=2s$,
- Deux barres cassées à $t=3s$,
- Trois barres cassées à $t=4s$.



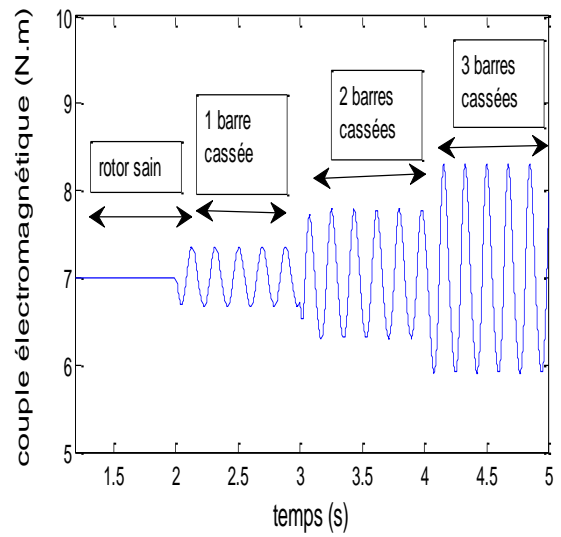
(a) : vitesse de rotation



(a-1) : zoom de la vitesse de rotation



(b) : couple électromagnétique



(b-1) : zoom du couple électromagnétique

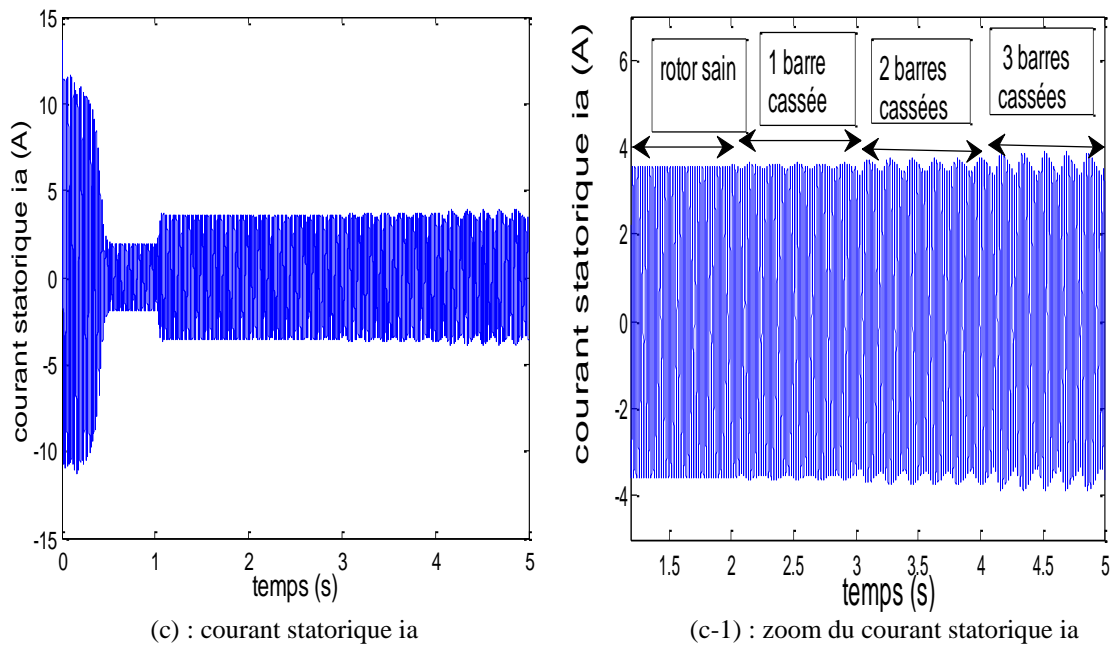


Figure. II. 6. Résultats de la simulation de la machine en présence de défauts dans le rotor

À partir de la figure II.6, nous trouvons ce qui suit :

- ✓ Des oscillations apparaissent sur la vitesse de rotation et le couple électromagnétique (augmente avec le nombre de barres cassées).
- ✓ L'augmentation de l'amplitude du courant statorique.
- ✓ Des perturbations dans le courant statorique.

II.6 Transformation de fourrier

La transformation de Fourier a été développée par Jean-Baptiste Joseph Fourier [26]. La transformation de Fourier est une extension, pour les fonctions non périodiques, du développement en série de Fourier des fonctions périodiques [36].

II.6.1 Transformée de Fourier Rapide

Transformée de Fourier Rapide (en anglais : Fast Fourier Transform (FFT)) : son objectif est de réduire le nombre d'opérations et, en particulier, le nombre de multiplications à réaliser [37].

II.7 Application de l'analyse spectrale

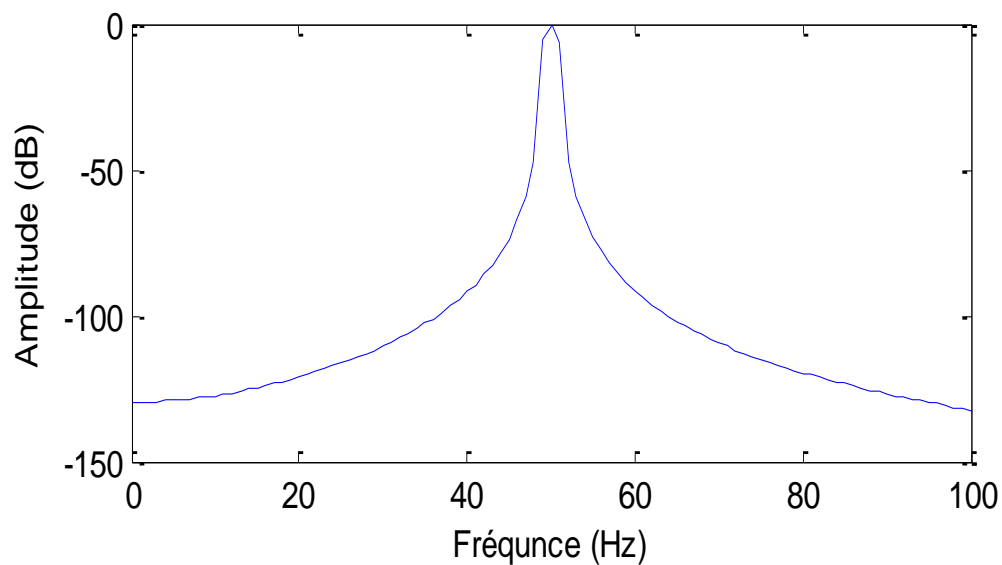
II.7.1 Résultats de la simulation

Dans cette partie, nous présentons l'analyse spectrale du courant statorique, du couple et de la vitesse en utilisant la FFT.

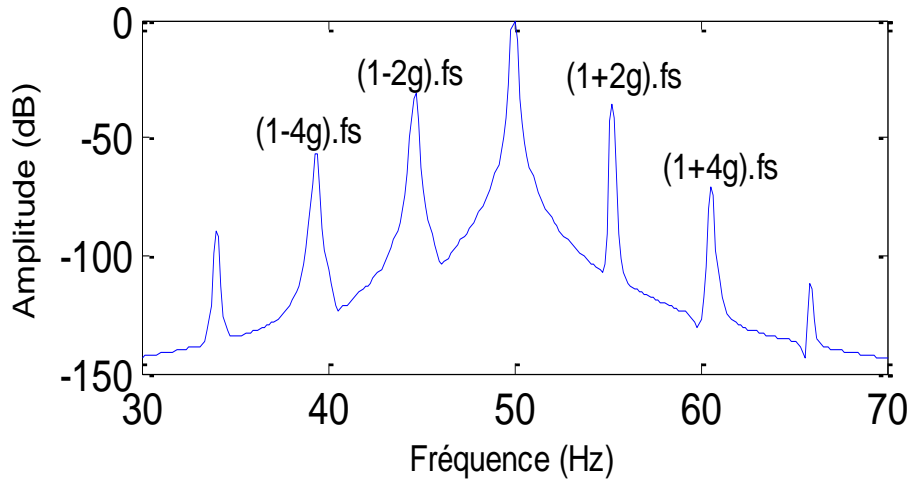
- **Analyse spectrale du courant statorique**

La figure (II.7) représente l'analyse spectrale (par la FFT) du courant statorique en régime permanent à la charge nominale dans les cas suivants :

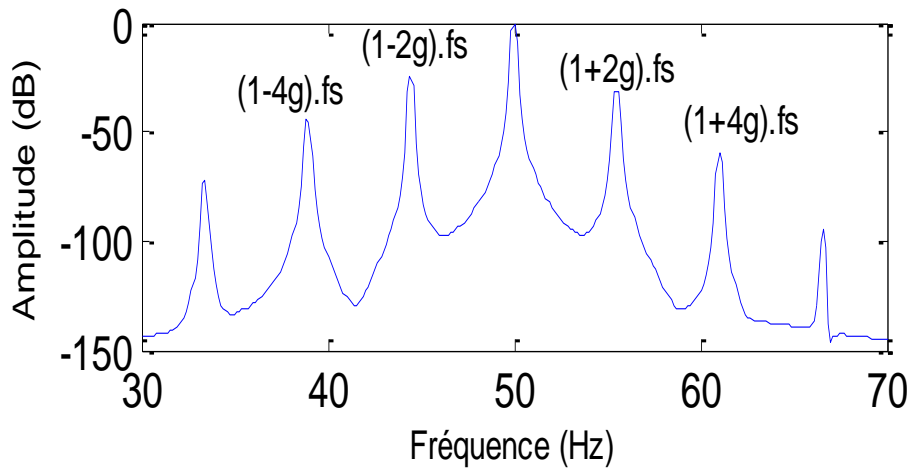
- ✓ Moteur sain ;
- ✓ Moteur avec défaut :
 - Une barre cassée,
 - Deux barres cassées,
 - Trois barres cassées.



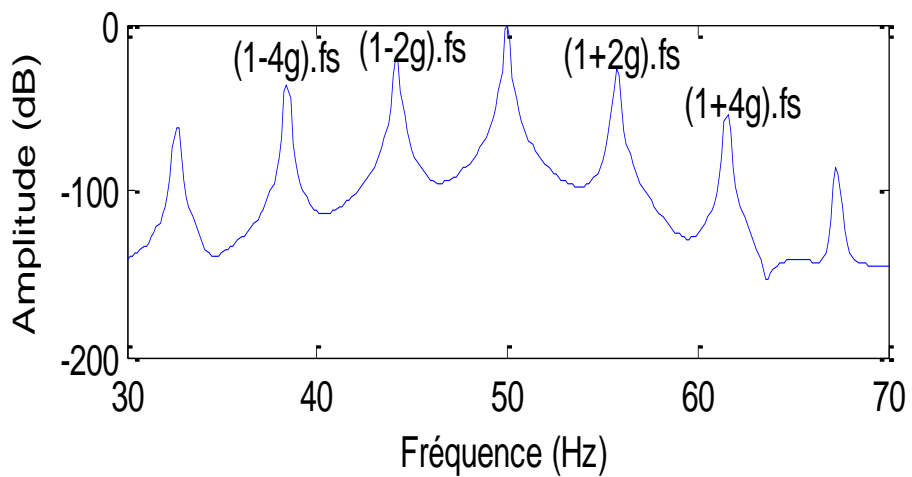
(a) : Moteur sain



(b) : Moteur avec une barre cassée



(c) : Moteur avec un défaut de 2 barres cassées



(d) : Moteur avec un défaut de 3 barres cassées

Figure. II. 7. FFT du courant statorique.

D'après la figure (II.7), nous constatons ce qui suit :

- Pour le moteur dans un état sain, aucune raie latérale n'a été observée autour de 50 Hz (Fig. II.7a),
- S'il y a un défaut, nous trouvons des raies latérales au voisinage de 50Hz (fondamental),
- Les fréquences induites voisines de 50 Hz, sont données sous la forme :

$$f_{calculée} = [(1 \pm 2K \cdot g) f_s].$$

- Les tableaux (II.1), (II.2) et (II.3) représentent l'extraction des raies de défaut :
 - ✓ à partir les spectres des figures (II.7 b, c et d) ;
 - ✓ à partir de l'expression $f_{calculée} = [(1 \pm 2K \cdot g) f_s]$.

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.32\%$	$(1-4g)f_s$	$(1-2g)f_s$	$(1+2g)f_s$	$(1+4g)f_s$
f déduite (Hz)	39.29	44.71	55.29	60.57
f calculée (Hz)	39.36	44.68	55.32	60.64
Amplitude (dB)	-56.78	-31.43	-36.22	-71.32

Tableau. II.1. Fréquences calculées et déduites (défaut d'une seule barre cassée).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.55\%$	$(1-4g)f_s$	$(1-2g)f_s$	$(1+2g)f_s$	$(1+4g)f_s$
f déduite (Hz)	38.86	44.43	55.57	61
f calculée (Hz)	38.9	44.45	55.55	61.1
Amplitude (dB)	-44.46	-23.96	-31.65	-60.15

Tableau. II.2. Fréquences calculées et déduites (défaut de deux barres cassées).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.82\%$	$(1-4g)f_s$	$(1-2g)f_s$	$(1+2g)f_s$	$(1+4g)f_s$
f déduite (Hz)	38.43	44.14	55.71	61.57
f calculée (Hz)	38.36	44.18	55.82	61.64
Amplitude (dB)	-36.46	-20.27	-27.68	-54.23

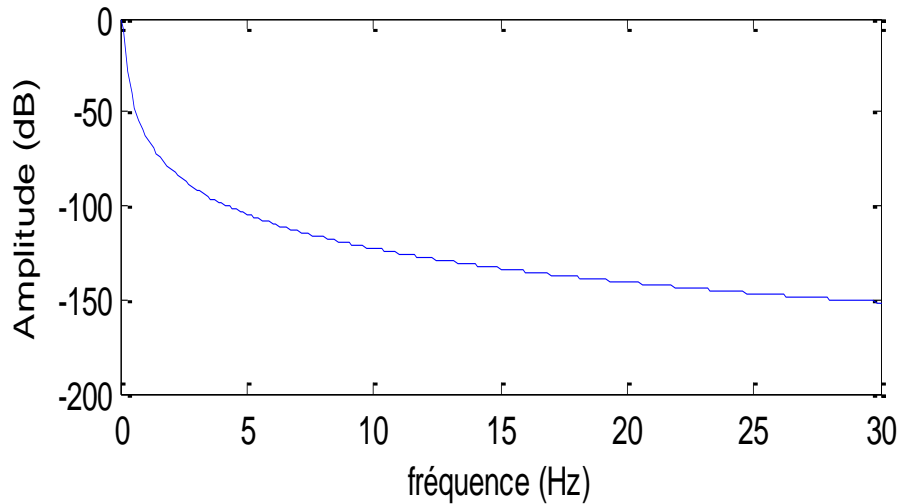
Tableau. II.3. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées).

- On remarque que les fréquences des raies latérales déduites correspondent aux valeurs théoriques (calculées) de ces fréquences $f_{calculée} = [(1 \pm 2K \cdot g) f_s]$.

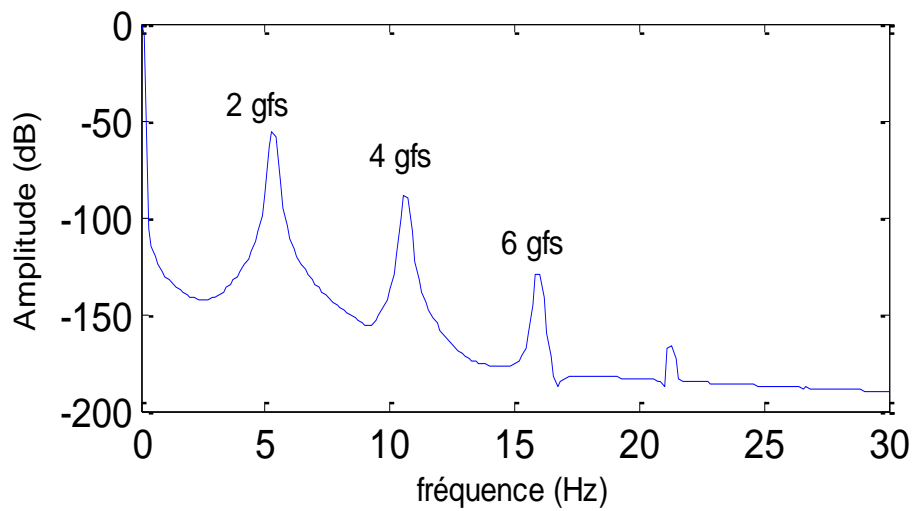
L'amplitude des raies est d'autant importante si le nombre de barres cassées augmente.

- **Analyse spectrale de la vitesse et du couple électromagnétique**

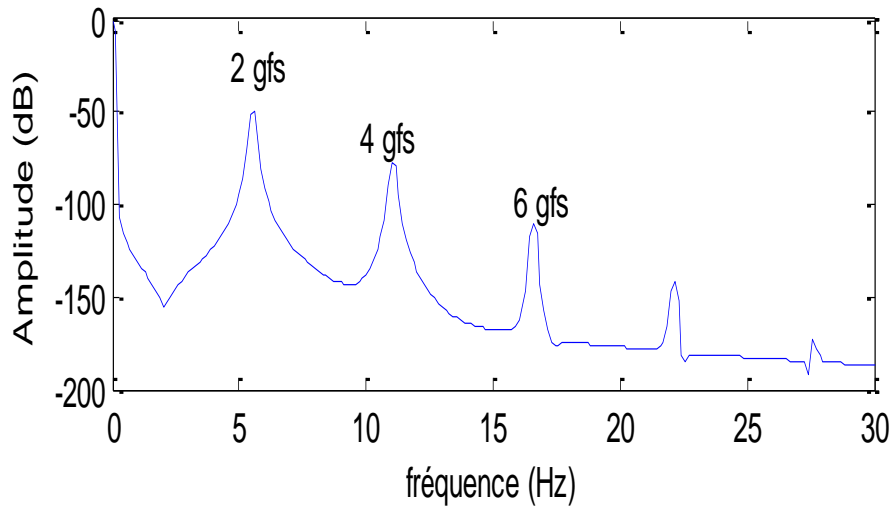
La figure (II.8) représente l'analyse spectrale de la vitesse dans les cas suivants : moteur sain et moteur avec défaut (une barre cassée, deux barres cassées et trois barres cassées).



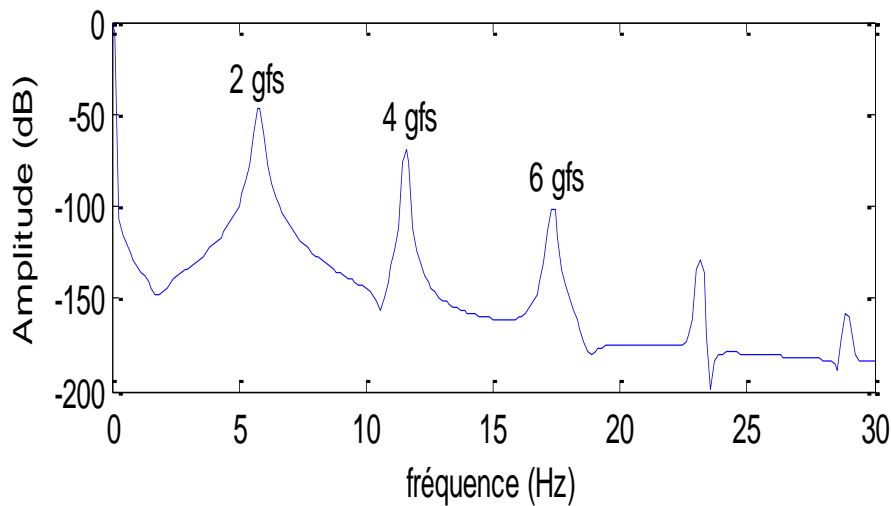
(a) : Moteur sain



(b) : Moteur avec une barre cassée



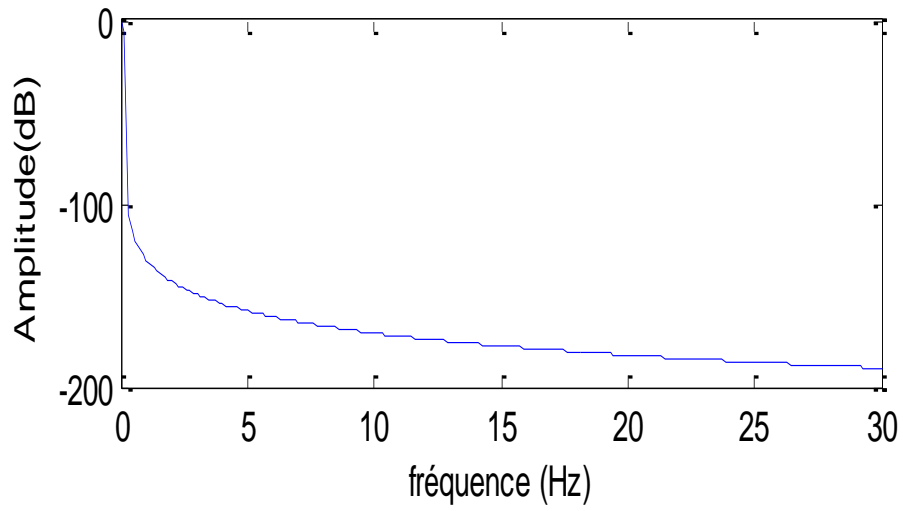
(c) : Moteur avec deux barres cassées



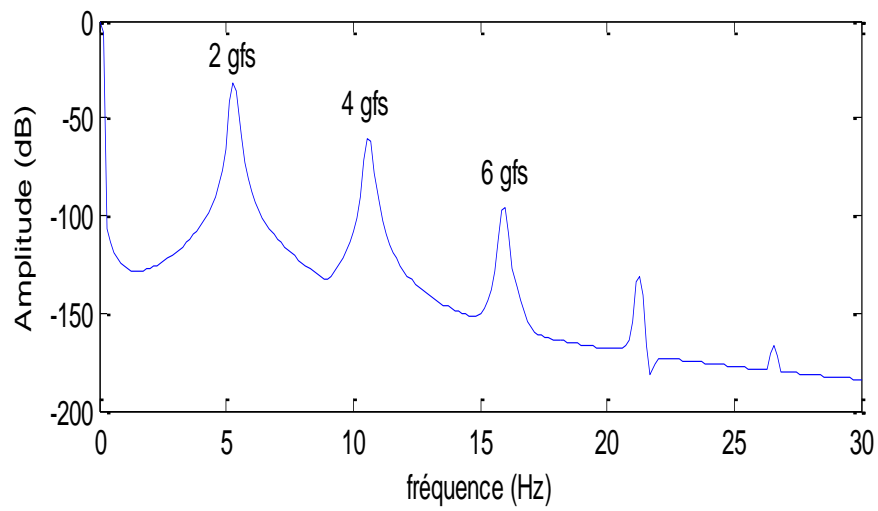
(d) : Moteur avec trois barres cassées

Figures. II .8. Spectre de la vitesse.

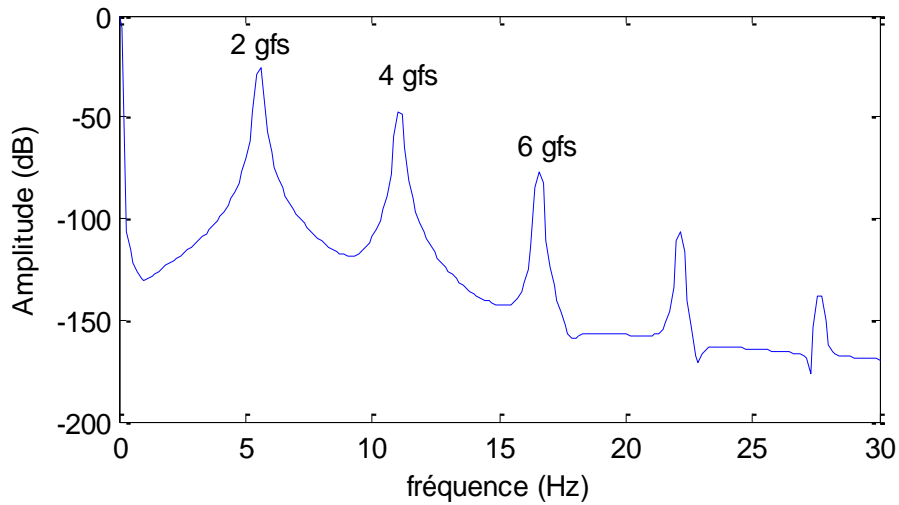
La figure (II.9) représente l'analyse spectrale du couple électromagnétique dans les cas suivants : moteur sain et moteur avec défaut (une barre cassée, deux barres cassées et trois barres cassées).



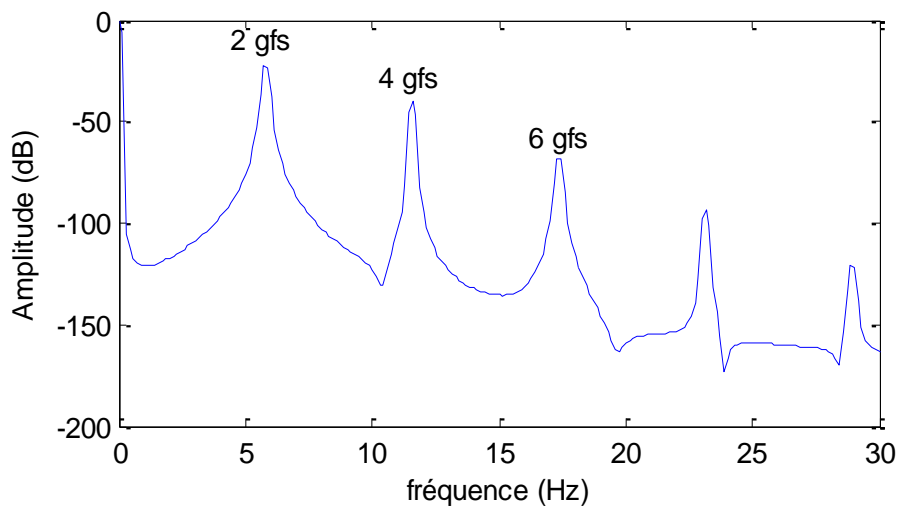
(a) : Moteur sain



(b) : Moteur avec une barre cassée



(c) : Moteur avec deux barres cassées



(d) : Moteur avec trois barres cassées

Figures. II .9. Spectre du couple électromagnétique.

D'après les figures (II.8, 9), nous constatons ce qui suit :

Les fréquences des défauts dans les spectres de la vitesse et du couple électromagnétique sont données par : $2.g.k.f_s$.

D'après les tableaux (II.4, II.5, II.6, II.7, II.8 et II.9) nous remarquons que les valeurs déduite et calculées sont très proches.

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.32\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.286	10.57	16
f calculée (Hz)	5.32	10.64	15.96
Amplitude (dB)	-55.47	-89.02	-129.10

Tableau. II.4. Fréquences calculées et déduites, (défaut d'une seule barre cassée).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.55\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.57	11	16.57
f calculée (Hz)	5.55	11.1	16.65
Amplitude (dB)	-49.46	-77.4	-110.30

Tableau. II.5. Fréquences calculées et déduites (défaut de deux barres cassées).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.82\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.714	11.57	17.29
f calculée (Hz)	5.82	11.64	17.46
Amplitude (dB)	-46.47	-69.90	-101.1

Tableau. II.6. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.32\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.286	10.57	16
f calculée (Hz)	5.32	10.64	15.96
Amplitude (dB)	-32.44	-59.97	96.51

Tableau. II.7. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.55\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.57	11	16.57
f calculée (Hz)	5.55	11.1	16.65
Amplitude (dB)	-26.10	-48.02	-77.39

Tableau. II.8. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées).

$f_s=50\text{Hz}$ $g=5.82\%$	$2gfs$	$4gfs$	$6gfs$
f déduite (Hz)	5.714	11.57	17.29
f calculée (Hz)	5.82	11.64	17.46
Amplitude (dB)	-22.75	-40.16	-67.87

Tableau. II.9. Fréquences calculées et déduites (défaut de trois barres cassées).

Nous concluons que le spectre de couple donne des informations de plus en plus claires par rapport au spectre de vitesse, car l'amplitude des ondulations de vitesse est très faible par rapport au couple électromagnétique.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les méthodes de diagnostic et les types de maintenance qui peuvent être appliquées à une machine asynchrone. Ensuite, nous avons présenté des résultats de simulation de l'analyse spectrale du courant statorique, la vitesse de rotation et du couple électromagnétique. Grâce aux résultats de simulation obtenus, les performances de la transformée de Fourier (FFT) sont démontrées. Pour diagnostiquer les défauts du rotor en ligne, nous proposons d'utiliser une méthode intelligente, qui fait l'objet du dernier.

Chapitre III
Diagnostic d'un défaut
rotorique par RNA

III.1 Introduction

La détection et le diagnostic des défauts dans les installations industrielles, en particulier dans les machines asynchrones, à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA) (en anglais artificial neural networks (ANNs)) est un sujet important qui a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Les performances des réseaux neuronaux artificiels en vue de diagnostiquer et d'identifier les défauts sont bonnes, où leur importance réside dans la détection des défauts par la reconnaissance de formes [38].

Dans ce chapitre, nous présenterons les réseaux de neurones artificiels, leur structure, leur type, leurs caractéristiques, etc.... Ensuite, nous utilisons la méthode RNA pour la détection des défauts du rotor dans une machine asynchrone via le programme MATLAB/SUMILINK.

III.2 Réseaux de neurone artificiel

III.2.1 Définition

Le système de diagnostic automatique des défauts est très coûteux. Par conséquent, certains chercheurs se sont principalement concentrés sur certaines techniques, notamment la logique floue, les réseaux neuronaux et les machines à vecteurs de support, qui permettent de classer les échantillons en catégories saines et défectueuses. Les réseaux de neurones forment un ensemble de fonctions non linéaires, les signaux sont reçus de l'extérieur par leurs entrées, pour être délivrés aux sorties, qui sont en fait les activités de certains neurones [39].

III.2.2 Neurone formel

La figure III.1 représente la structure d'un neurone artificiel. Il est constitué d'un certain nombre d'entrées et de sorties, où chaque neurone recevant un nombre variable d'entrées du neurone amont. Chaque neurone élémentaire a une fonction de transfert (fonction d'activation) qui donne une sortie (Y) [40].

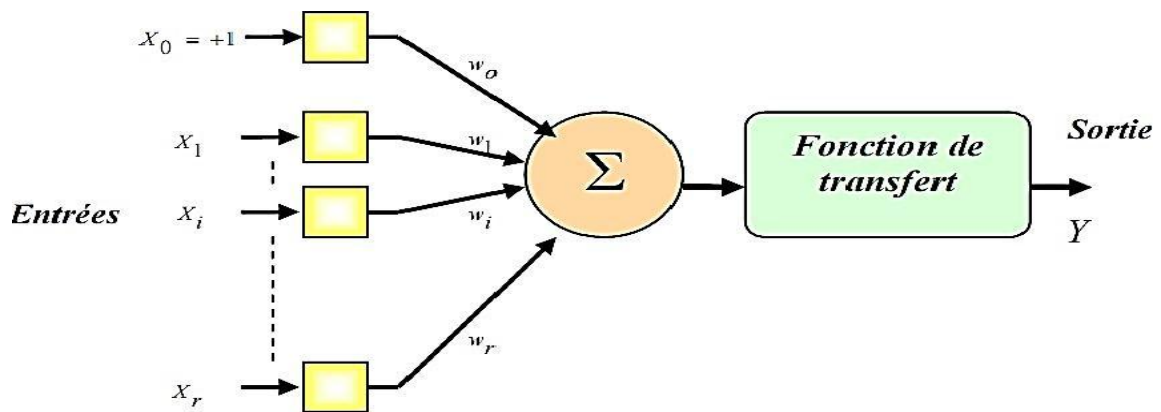


Figure. III. 1. Neurone artificiel [40].

III.2.3 Avantages des réseaux de neurones

L'un des avantages les plus importants de l'utilisation des réseaux de neurones, nous trouvons [39] :

- rapidité ;
- robustesse ;
- Plusieurs algorithmes d'apprentissage sont disponibles.

III.2.4 Inconvénients des réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones présente certains inconvénients, comme tout autre algorithme, notamment [39] :

- L'apprentissage peut être lent et difficile ;
- une fois entraîné, un réseau de neurones n'est pas flexible.

III.2.5 Principe de diagnostic par les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont une méthode mathématique qui peut générer des modèles pour n'importe quel comportement grâce aux données d'entrée et de sortie des systèmes dynamiques. Récemment, les réseaux neuronaux ont été largement utilisés dans la modélisation, le contrôle et la surveillance des systèmes industriels et ont été développés pour les mesures et le diagnostic de nombreux problèmes rencontrés lors de la modélisation classique [41].

III.3 Catégories de réseaux de neurones

En général, l'architecture des connexions entre les neurones d'un réseau peut aller d'une connectivité complète où tous les neurones sont connectés entre eux, à une connectivité locale où les neurones ne sont connectés qu'à leurs proches voisins [41].

Il existe deux classes de réseaux de neurones : les réseaux statiques et les réseaux dynamiques [41].

- **Réseaux statiques (non bouclé) :** est représenté graphiquement par un groupe de neurones connectés les uns aux autres. L'information circule de l'entrée à la sortie sans retour [42].
- **Réseaux dynamiques (bouclé) :** Permet des connexions arbitraires entre les neurones de toutes les couches [42].

III.4 Propriétés des RNA

Parmi les caractéristiques les plus importantes d'un réseau neuronal, on trouve [41] :

- Le parallélisme ;
- La capacité d'adaptation ;
- La mémoire distribuée ;
- La résistance aux pannes.

III.5 Choix du modèle neuronal

La désignation du modèle neuronal permettant de diagnostiquer un processus de production est parfois assez difficile. Cette difficulté réside dans la capacité de l'outil logiciel utilisé dans la modélisation. L'algorithme qui nous permet de déterminer le modèle neuronal robuste, est recherché à travers les étapes suivantes [43] :

- Connaissance approfondie sur le système à identifier ;
- Le choix des entres et de la sortie du modèle neuronal ;
- Détermination du comportement interne du modèle neuronal (le nombre de couche cachée et le nombre des neurones dans chaque couche cachée) ;

- Choix des fonctions d'activation ;
- Choix de la précision et du nombre d'itération.

III.6 Types de réseaux de neurones

Il peut être divisé en deux types principaux (les plus utilisés) [39] :

- Réseaux de neurones multicouches (en anglais Multilayer Perceptron MLP) ;
- Réseaux de neurones à fonction radiale (en anglais Radial Basis Function RBF).

III.6.1 Réseaux de neurones multicouches (MLP)

Sa structure est très simple, composée d'une couche d'entrée, d'une couche de sortie et d'une ou plusieurs couches cachées. Chaque neurone est connecté uniquement aux neurones des couches précédentes, ces réseaux n'ont donc pas de connexions au sein de la couche [44].

III.6.2 Réseaux de neurones à fonction radiale (RBF)

Le réseau RBF est un réseau de neurones qui utilise l'apprentissage supervisé. La couche cachée contient les neurones RBF dont chacun a une fonction d'activation gaussienne [44].

III.7 Résultats de la simulation

Grâce à la technique des réseaux de neurones, un défaut rotorique (rupture des barres rotoriques : 1 barre, 2 barres, 3 barres) d'une machine asynchrone peut être diagnostiqué à l'aide deux paramètres principaux, la fréquence et le glissement. Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab-Simulink.

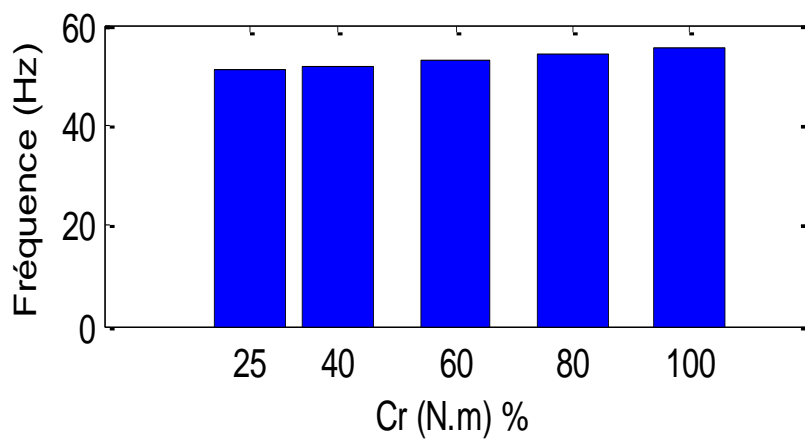
Les tableaux (III.1, III.2 et III.3) et les figures (III.2, III.3 et III.4) représentent l'évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge pour la défaillance des barres du rotor dans les cas suivants :

- une barre cassée,
- deux barres cassées,
- trois barres cassées.

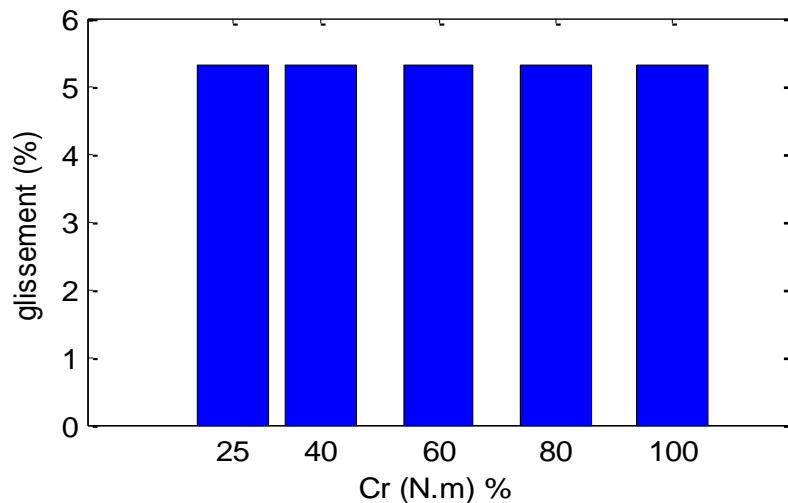
Les valeurs du couple de charge sont données comme suit : Cr =25%, 40%, 60%, 80%, et 100% de la charge nominale

Charge	Fréquence (Hz)	Glissement (g) %
Cr=25%	50.86	5.31971
Cr=40%	51.71	5.31973
Cr=60%	52.71	5.31980
Cr=80%	54	5.31984
Cr=100%	55.29	5.31986

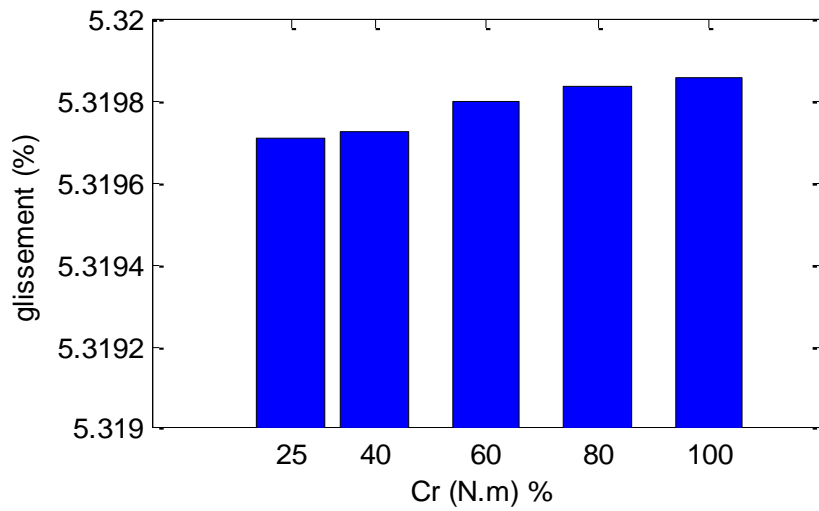
Tableau. III. 1. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (une barre cassée).



(a) : Évolution de la fréquence en fonction de la charge (une barre cassée).



(b) : Évolution du glissement en fonction de la charge (une barre cassée).

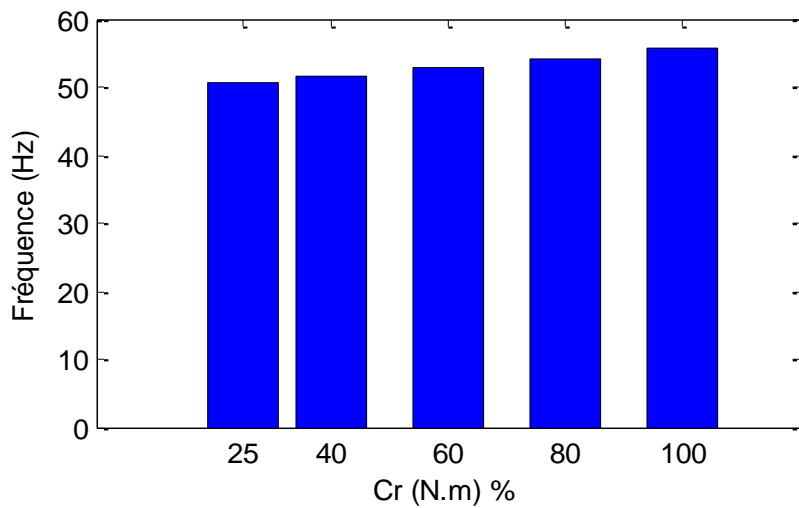


(b.1) : Zoom

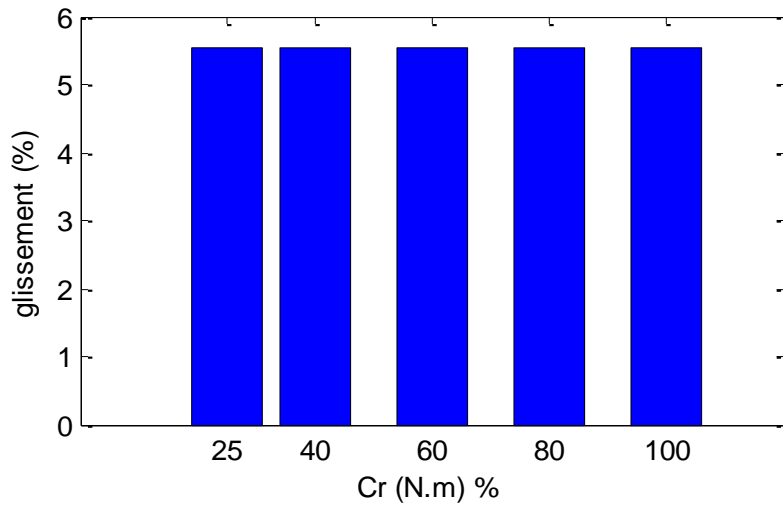
Figure. III. 2. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (une barre cassée).

Charge	Fréquence (Hz)	Glissement (g) %
Cr=25%	50.71	5.5520
Cr=40%	51.71	5.5524
Cr=60%	52.86	5.5530
Cr=80%	54.14	5.5535
Cr=100%	55.57	5.5540

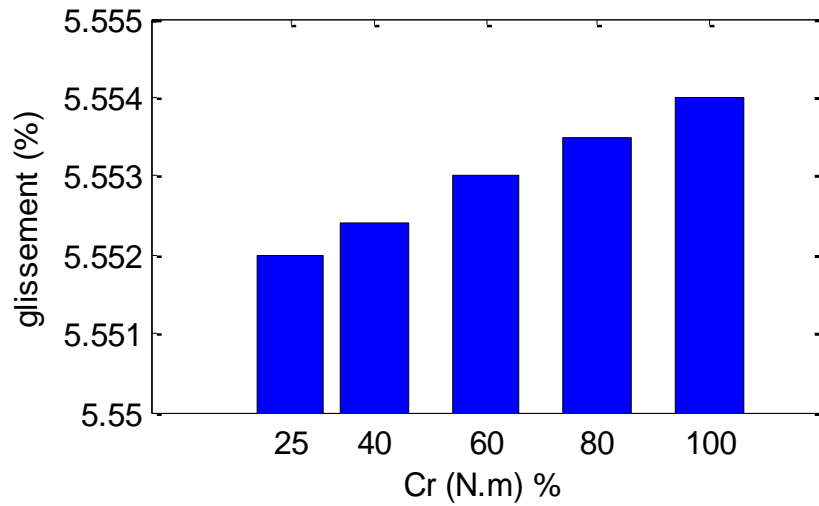
Tableau. III. 2. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (deux barres cassées).



(a) : Évolution de la fréquence en fonction de la charge (deux barres cassées).



(b) : Évolution du glissement en fonction de la charge (deux barres cassées).

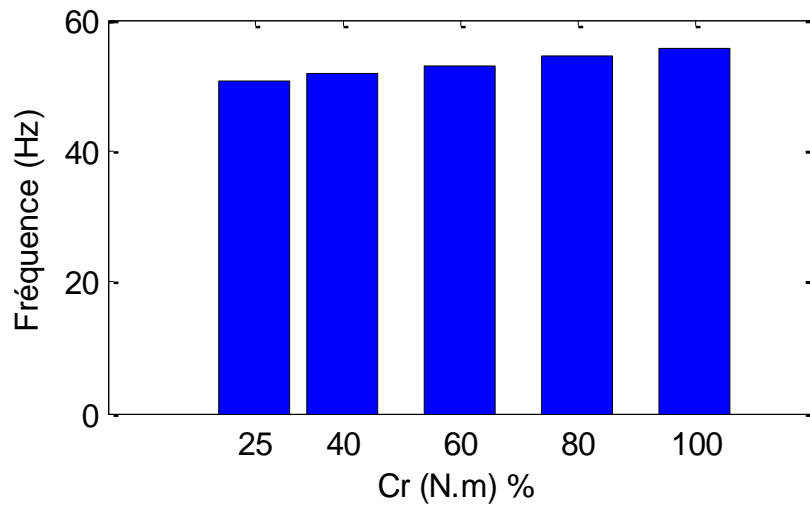


(b.1) : Zoom

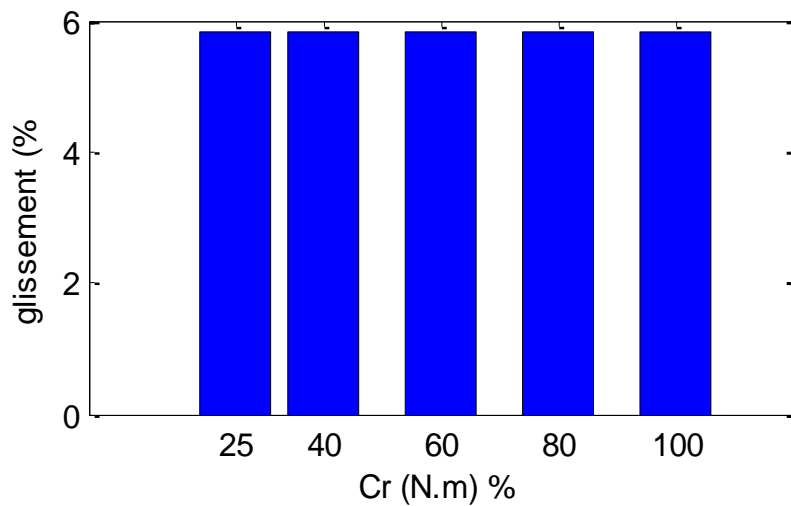
Figure. III. 3. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (deux barres cassées).

Charge	Fréquence (Hz)	Glissement (g) %
Cr=25%	50.57	5.8250
Cr=40%	51.71	5.8255
Cr=60%	52.86	5.8256
Cr=80%	54.29	5.8262
Cr=100%	55.71	5.8270

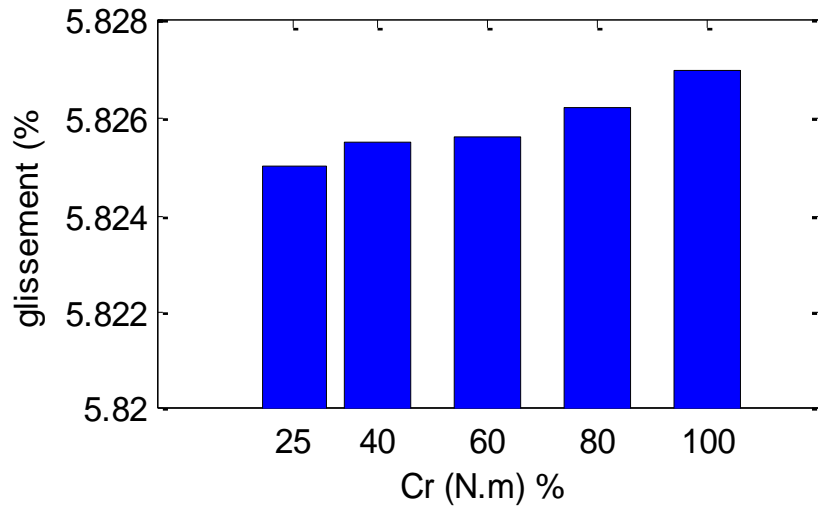
Tableau. III. 3. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (trois barres cassées).



(a) : Évolution de la fréquence en fonction de la charge (trois barres cassées).



(b) : Évolution du glissement en fonction de la charge (trois barres cassées).

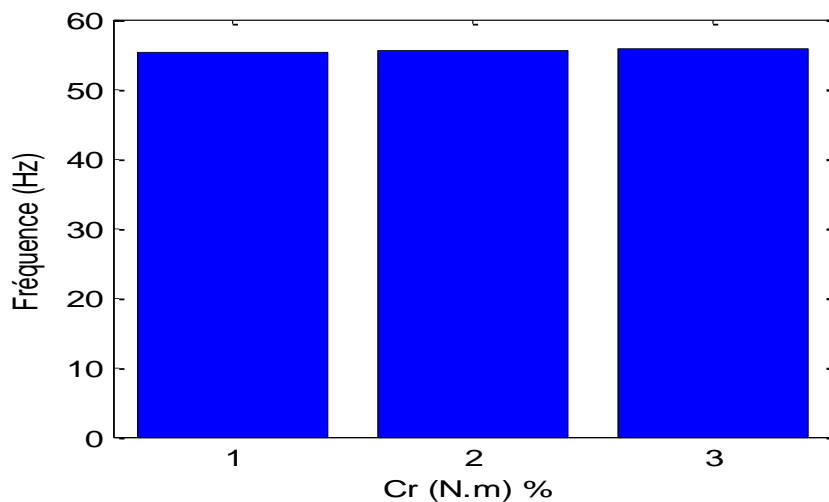


(b.1) : Zoom

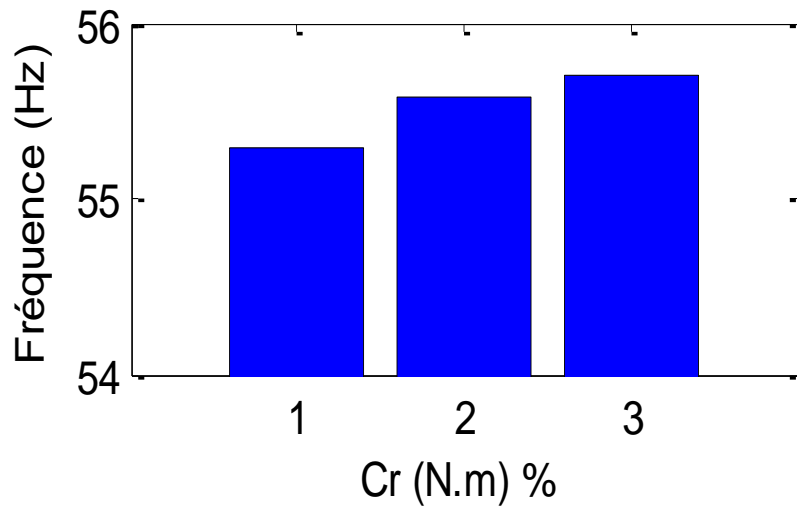
Figure. III. 4. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction de la charge (trois barres cassées).

Nous constatons à travers les trois figures (III.2, 3 et 4) : que lorsque la charge (Cr) augmente, la fréquence et le glissement augmentent parallèlement avec l'augmentation de la charge.

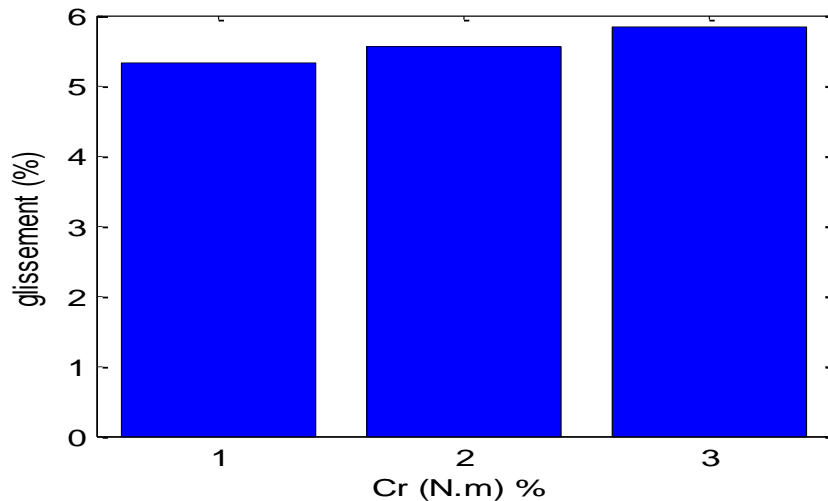
La figure III.5 représente l'évolution de la fréquence et du glissement en fonction du nombre de barres cassées (pour Cr = 100%).



(a) : Évolution de la fréquence en fonction du nombre de barres cassées.



(a.1) : Zomm



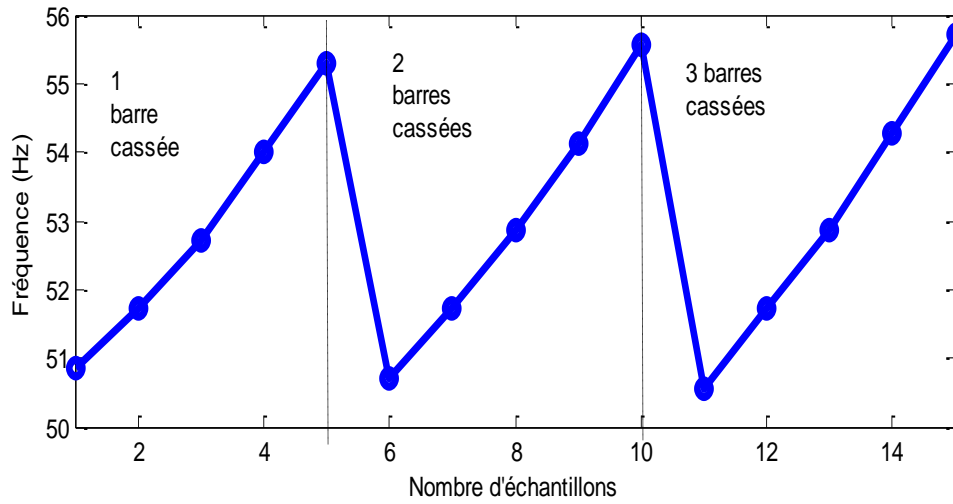
(b) : Évolution du glissement en fonction du nombre de barres cassées.

Figure. III. 5. Évolution de la fréquence et du glissement en fonction du nombre de barres cassées.

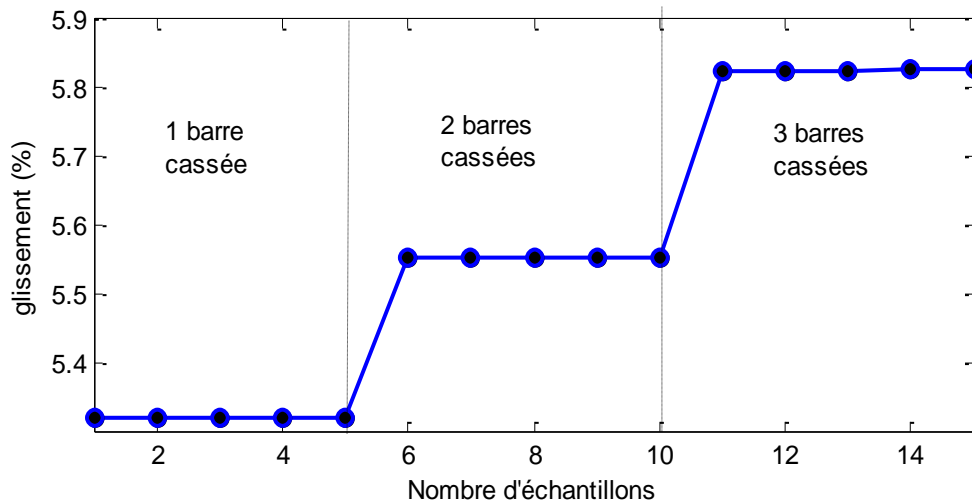
D'après les figures (III.5), on constate que la fréquence et le glissement sont plus importants si le nombre de barres cassées augmente.

Pour surmonter le problème de la charge variable, il a été proposé d'utiliser différentes valeurs de charge pour la phase d'apprentissage, c'est-à-dire 25 %, 40 %, 60 %, 80 % et 100 %.

La figure (III.6) présente les vecteurs de données d'entrée, elles sont composées d'une gamme successive de plusieurs échantillons dans différentes conditions de fonctionnement du MAS.



(a) : Évolution de la fréquence en fonction du nombre d'échantillons.



(b) : Évolution du glissement en fonction du nombre d'échantillons.

Figure. III. 6. Les entrées de l'apprentissage du RNA.

La figure III.7 représente le schéma d'une simulation de réseau de neurones pour la détection de défauts de rupture de barres dans une machine asynchrone.

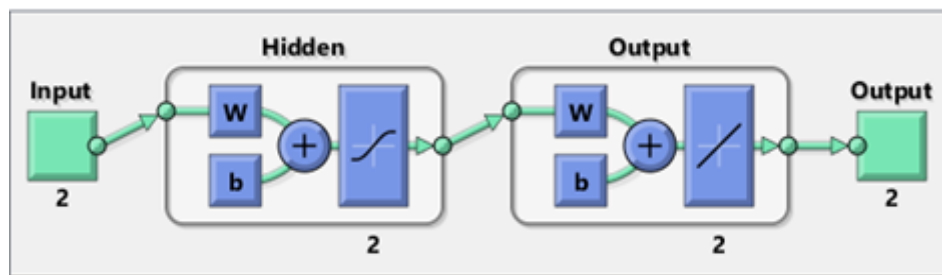


Figure. III. 7. Schéma de simulation d'un réseau de neurones.

Il existe quatre classes (catégories) A, B, C et D, et ces classes peuvent être séparés en plusieurs sections dans l'espace des formes (Figure III.8).

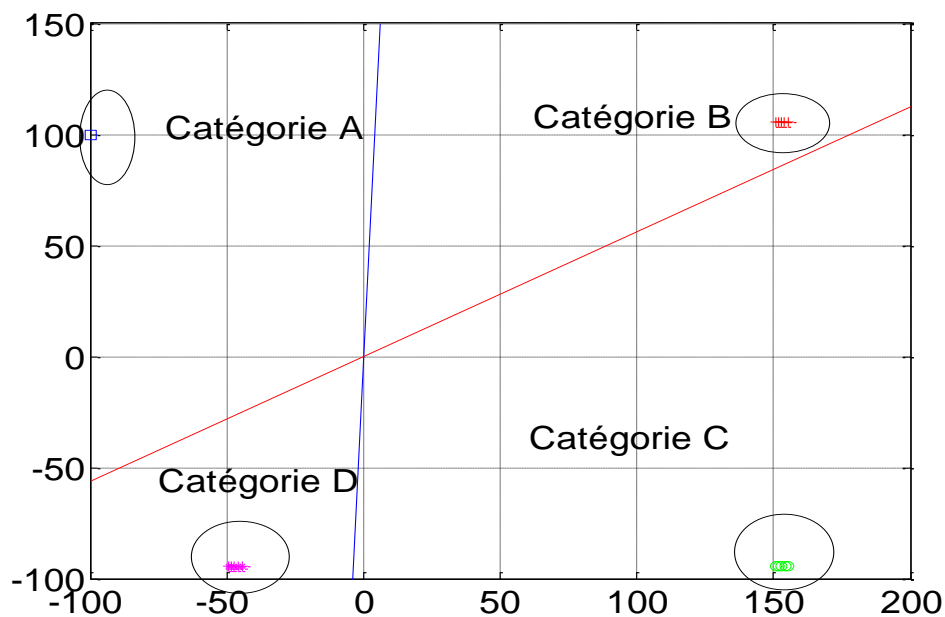


Figure. III .8. Vecteurs à classifier.

La figure (III.8) présente la classification du réseau de neurones des barres cassées, où les sorties indiquent les valeurs (figure (III.10)) :

- (0 0) machine sans défaut (catégorie A) ;
- (1 0) machine avec une barre cassée (catégorie B) ;
- (0 1) machine avec deux barres cassées (catégorie C) ;
- (1 1) machine avec trois barres cassées (catégorie D).

La figure (III.9) montre un test de validation de l'algorithme (une barre cassée avec $Cr=50\%$).

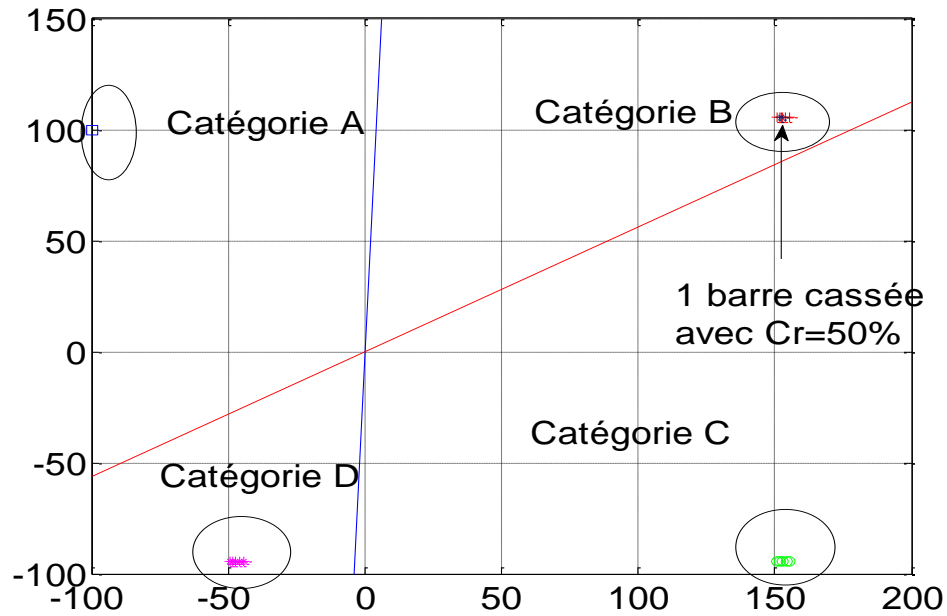
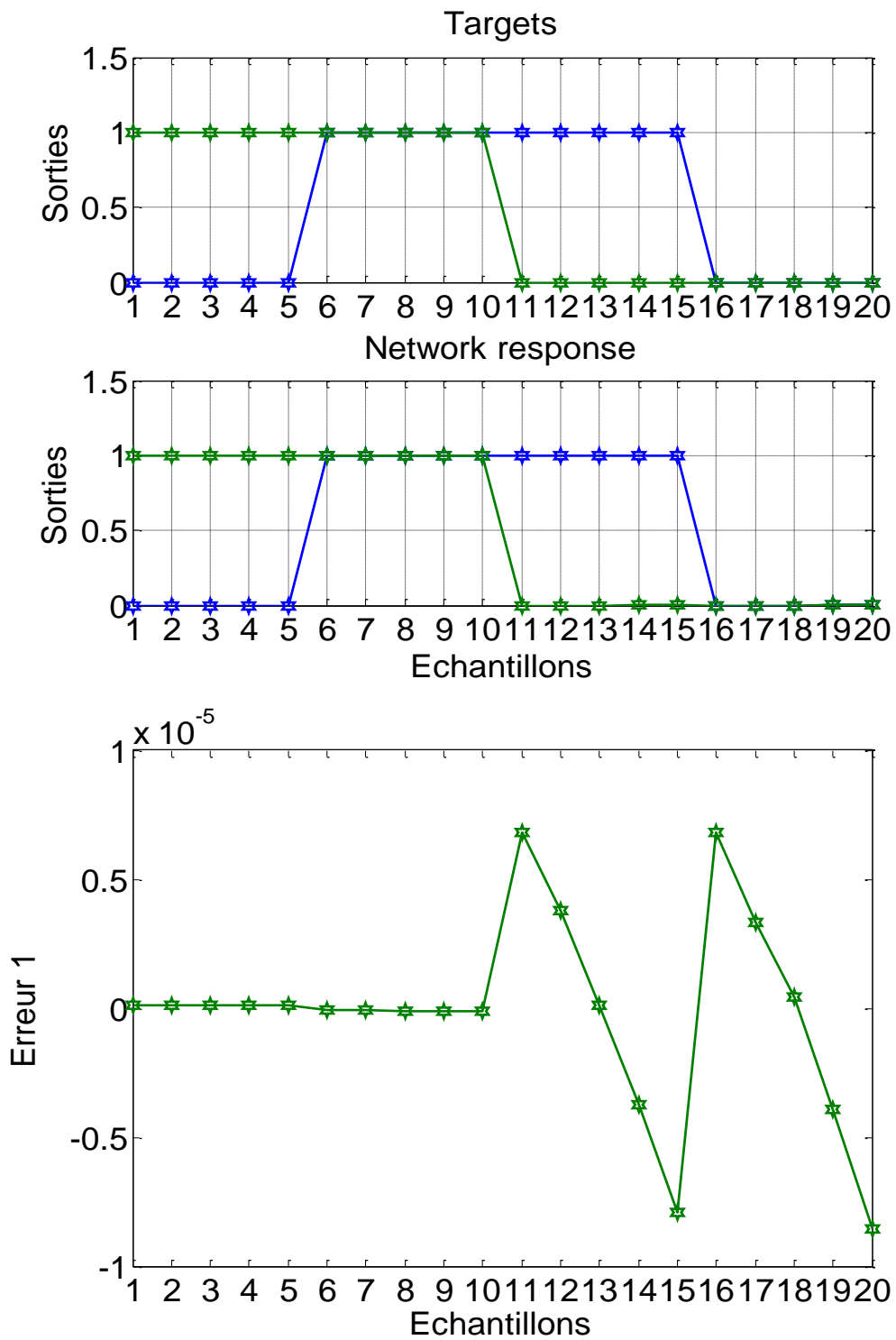


Figure. III .9. Vecteurs à classifier (test).

Les sorties d'apprentissage et d'erreurs du RNA sont présentées dans la figure III.10, où l'on remarque que l'erreur d'apprentissage est presque nulle ; elle est de l'ordre de 10^{-5} , ce qui explique le bon apprentissage du réseau.



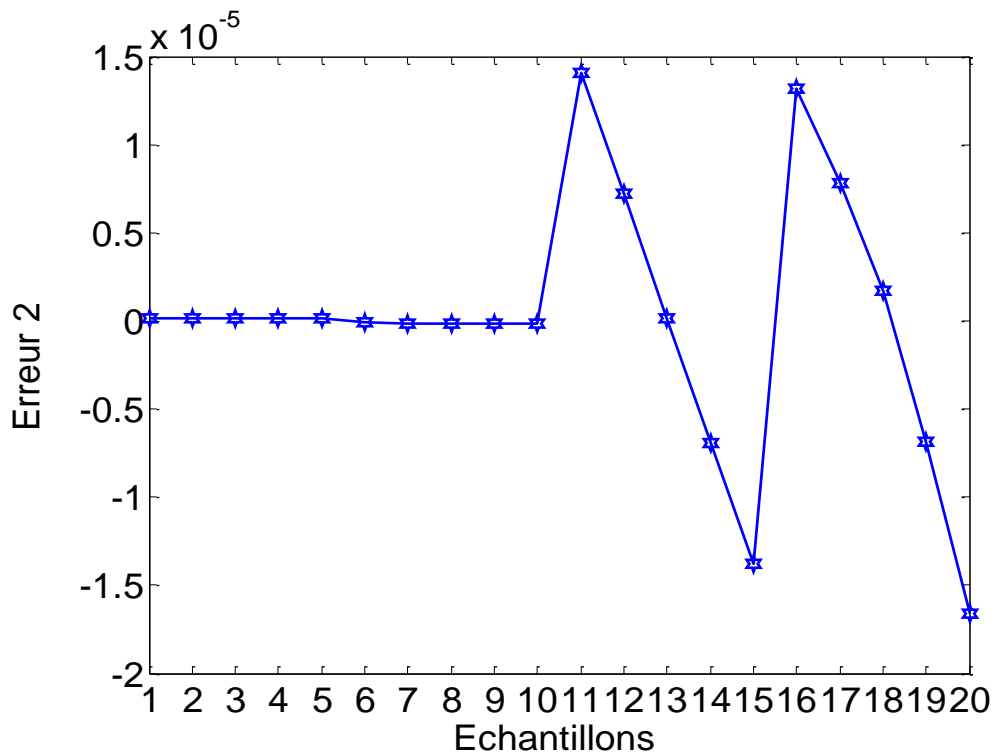


Figure. III .10. Sorties d'apprentissage et d'erreurs du RNA

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une technique de réseaux de neurones artificiels afin d'obtenir le diagnostic des défauts de rupture de barres dans la machine asynchrone. Les résultats obtenus par simulation ont montré que cette technique est l'une des meilleures méthodes pour diagnostiquer les défauts en ligne (détection automatique). Cette technique permet de diagnostiquer et de déterminer le nombre de barres cassées malgré le changement de la charge.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, la surveillance industrielle, le diagnostic et la détection rapide des défauts des machines asynchrones sont devenus essentiels pour la sécurité du fonctionnement.

En général, le bon fonctionnement de la méthode du diagnostic des défauts nécessite une bonne connaissance du système. Dans ce travail, un modèle de simulation (machine asynchrone) a été utilisé dans l'état sain et dans l'état de défaut afin de connaître son comportement.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les composants des machines électriques (asynchrone) et les différents défauts qui peuvent apparaître lors du fonctionnement de cette machine puis nous avons simulé un moteur asynchrone à l'état sain.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes de maintenance et les types de diagnostics fréquemment utilisés dans la maintenance des machines asynchrones. Ensuite, nous avons modélisé et simulé le moteur asynchrone avec défaut. En cas de défaut, l'analyse spectrale du courant statorique, de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique a été utilisée afin de diagnostiquer ce défaut.

Dans le troisième chapitre, nous avons diagnostiqué le défaut du rotor de la machine asynchrone, où cette méthode est basée sur les RNA. Nous avons vu à partir des résultats de simulation que cette technique est d'une grande importance dans la maintenance et le diagnostic des machines asynchrones.

Enfin, pour l'amélioration de ce modeste travail, nous suggérons quelques perspectives à savoir :

- L'implémentation pratique,
- Autres méthodes de diagnostic : logique floue, SVM...,
- Autres types de défauts : excentricité, court-circuit...

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Cours, <https://elearning-deprecated.univ-annaba.dz/mod/resource/view.php?id=23329>.
- [2] E. Schaeffer, “Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts,” Thèse Doctorat, Université de Nantes école doctorale sciences pour L’ingénieur de Nantes, le 6 décembre 1999.
- [3] L. Noureddine, “Diagnostic de défauts au rotor d’une machine asynchrone à cage d’écureuil,” Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 26 octobre 2005.
- [4] F. Smaili, N. Outtar, “Utilisation des réseaux de neurones en vue du diagnostic des défauts statoriques dans la machine asynchrone,” Mémoire, Université L’Arbi Ben M’hidi Oum El Bouaghi, 2019 /2020.
- [05] S. Bazi, “Contribution à la Détection au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur,” Thèse de doctorat, université de Batna, 08/12/2016.
- [06] A. Rahmani, M. Nessil, “Mémoire Diagnostic des Défauts rotoriques de la machine asynchrone à cage,” Université de Bordj Bou Arreridj, Diplôme d’ingénieur D’état en électromécanique, Promotion :2007/2008.
- [07] C. Mokhtar, “Recherche de signatures électromagnétique des défauts rotoriques dans la machine asynchrone par la méthode,” Université des sciences et de technologie, Oran, Mohamed Boudiaf.
- [08] O. Sid, “Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par les réseaux de neurones,” MEMOIRE Présenté pour l’obtention du diplôme de Magister En Electrotechnique, Soutenu Publiquement, le : 12-07-2011.
- [09] R. Kechida, “Contrôle et diagnostic d’une machine induction sans capteur en utilisant Des techniques avancées d’analyse et de traitement,” Diplôme de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, le :19/10/2017.
- [10] A. Cherbi, A. Abbad, “Commande d’un moteur asynchrone par la logique floue adaptative,” Diplôme Master en Filière, Génie Electrique, Université de Bouira, Année Universitaire, 2017/ 2018.
- [11] M, Mohamed Yahya, “Surveillance et diagnostic de la machine asynchrone avec défaut d’alimentation (déséquilibre de tension),” Mémoire Master en Electromécanique, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, Promotion, 2019.
- [12] A. Belkhiri, B. Tounsi, A. Dahmani, “Détection des défauts par les réseaux de neurones artificiels de la machine asynchrone contrôlée par la technique du flux orienté,” Université de Msila, Mémoire de fin d’étude 2006/2007.
- [13] H. Dahmane, S. Souisi, “Commande et diagnostic de la machine asynchrone à l’aide d’observateur,” Mémoire Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année universitaire 2015/1016.
- [14] S. Merahi, “Diagnostic de défauts des machines électriques,” Master Académique, Université Larbi Ben Mehidi -Oum El Bouaghi, 2019/2020.
- [15] C. Hatout, A. Guessabi, “Diagnostic des défauts rotoriques dans la machine asynchrone a cage utilisation l’analyse par FFT et ondelettes,” Université Mohamed el Bachir el Ibrahim Bordj Bou Arreridj, 2014/2015.
- [16] R. Rouaibia, “Détection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrones”, l’obtention du diplôme de, magister, Université Badji Mokhtar Annaba, Année 2009.
- [17] R. Merad, “Outils de diagnostic application a la machine asynchrone triphasée a cage d’écureuil,” Université de Constantine, 2005/2006.
- [18] T. Baptiste, “Analyse et traitement de grandeurs électriques pour la détection et le diagnostic de défauts mécaniques dans les entraînements asynchrones,” Thèse de doctorat, 1 Décembre 2009.

- [19] Y. Messaoudi, B. Oukacine, “Modélisation fine multi-spires de la machine asynchrone en vue des a simulation en régime sain et de défauts de courts-circuits entre spires,” diplôme d’ingénieur d’Etat en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007–2008.
- [20] C. Roland, “Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes,” Thèse de doctorat, L’école doctorale, De Lyon, le :18 décembre 2003.
- [21] L. Labiod, F. Boutadjine, “Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones,” Master académique, Université Eochaid Hamma Lakhdar d’El-Oued, en Juin 2019.
- [22] F. Saci, “Modèles multi enroulements de la MAS dédiés au diagnostic,” Mémoire de fin d’études, mestre, Université de Msila, 2012/2013.
- [23] H. Cherif, “Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l’analyse par FFT et ondelettes,” Université Mohamed Khider – Biskra, Mémoire présenté en vue de l’obtention du diplôme de Magister, le 30/09/2014.
- [24] M. Elbordj, B. Huichiti, “Détection Des Défauts d’une Machine Asynchrone Alimentée par un Onduleur Commandé par Modulation à Largeur d’impulsion,” Université de Ghardaïa, mestre, soutenu publiquement le 20/10/2020.
- [25] B. Bessam. A, Menacer. M, Boumehraz. H, Chrif, “Detection of Broken rotor bar faults in induction motor at low load usigne neural network,” Université de Biskra, Algeria, ISA Transaction (2016).
- [26] A. Haradj, N. Maachi, “Diagnostic d’un défaut rotorique dans une machine asynchrone par des techniques de traitement du signal,” Mémoire de Fin d’études, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2018/2019.
- [27] <https://www.legarrec.com/entreprise/type-maintenance-industrielle/>.
- [28] cours, “Maintenance industrielle,” Université Relizane, Département de Génie mécanique
- [29] cours, “Les stratégies de la maintenance industrielle,” Université-Batna.
- [30] K. Makara, “Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique,” Doctorat de L’université de Toulouse, 17 Décembre 2009.
- [31] S. Aouchiche, “Diagnostic de défauts à base d’observateurs Application à la Machine Asynchrone,” Mémoire de Fin d’Etudes, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [32] T. Ameid, “Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction,” Université Mohamed Khider – Biskra, 01/07/2018.
- [33] M. Anca, K. Nagy, “Analyse et synthèse de multimodales pour le diagnostic. Application à une station d’épuration,” Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Institut National Polytechnique de Lorraine, 26 novembre 2010.
- [34] T. Aggab, P. Vrignat, M. Avila, F. Kratz, “Estimation du niveau de d’egradation par un modèle de Markov caché multi-flux,” Qualita 2015, Mar 2015, Nancy, France, Submitted on 7 May 2015.
- [35] B. Bessam, “Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes,” Université Mohamed Khider – Biskra, 02/06/2016.
- [36] <https://fr.wikipedia.org> Transformation de Fourier – Wikipédia.
- [37] G. Baudoin et J.-F. Bercher, “Transformée de Fourier Discrète. École Supérieure d’Ingénieurs en Électrotechnique et Électronique,” Novembre 2001.
- [38] M. Bouzid, N. Mrabet, K. Jelassi, G. Champenois, “Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par réseaux de neurones,” cours.

- [39] O. Benchourak, O. Achouri, "Application des réseaux de neurones artificiels au diagnostic de la machine asynchrone," Mémoire de Master, Université M'hamed Bougera Boumerdes, 26 juin 2018.
- [40] A. Galizra, "Implémentation des réseaux de neurones artificiels sur circuit FPGA en utilisant la représentation en virgule fixe," Mémoire de Projet de Fin d'Études, Université de Saad Dahleb Blida, 2013-2014.
- [41] A. Khatir, "Étude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts," Magister En Electrotechnique, Université Farhat Abbas Sétif, 11 / 04 / 2009.
- [42] Z. ASRADJ, "Identification des systèmes non linéaires par les réseaux de neurones," Mémoire, Université Abderrahmane Mira, Bejaia.
- [43] K. Mendaz, "Adaptation des commandes floues et Neuro-floue aux actionnaires asynchrones en mode dégradé : application au transport ferroviaire," Doctorat en Electrotechnique, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [44] Z. Taibi, "Développement d'un Algorithme Automatique Dédié au Diagnostic en ligne des Défauts Electriques de la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil pour une implantation sur carte FPGA," Mémoire, Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene, le 28/04/2012.