

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم للإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines électrique

présenté par

KADA Ihcene

&

MAHMOUD BACHA Chaïmaa

Diagnostic des défauts de la MAS à l'aide des réseaux de neurones artificiels

Proposé par : Mr.Ferdjouni Abdelaziz

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** tout puissant, de nous avoir donné le courage, la patience et la santé pour y parvenir au bout de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre Promoteur Monsieur **A.FERDJOUNI** pour nous avoir encadrés, conseillés, aidés ainsi pour son soutien et encouragements tout le long de notre travail.*

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants de notre spécialité.

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers **parents** qui m'ont été un soutien pendant mes années d'études et qui m'ont entouré pour que rien n'entrave le déroulement de mes études.*

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

*A mes Sœurs, **Assma, Chahinez, Sarra** qui m'ont encouragé et suivi depuis longtemps.*

*A mes frères, **Abdelbasset, Abdelmoumen** que j'aime beaucoup*

*Une spéciale dédicace à mon neveu **Anes***

*A mon fiancé **Amir** qui m'encourage toujours.*

A tous ma famille, ma grande mère mes tantes mes oncles, mes cousins et mes cousines.

*A mes amis, **Kenza, Ahlem, Ihcene, Hind, Sarah, Ryma**..A tous ceux qui sont proches de nos cœurs et dont nous n'avons pas cité le nom.*

chaïmaa

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers **parents**, pour m'avoir soutenue et aidée tout au long de ma vie et mes études, en leur espérant une longue vie, une bonne santé et tout le bonheur du monde,*

*Mes chers frères **Abdel Hakim** et **Abdel Kader**,*

*Ma petite sœur adorée **Inés** ,*

*Ma chère tante **Nouzha** qui m'a toujours soutenue,*

*A mon cousin **N.Mouhamed** qui m'a aidé dans ce travail,*

*A mes grands-parents **Baba** et **Maima** qu'Allah les gardes,*

*A ma tante **Laila**, mes oncles **Hocine** et **Nourdine** qui m'ont toujours encouragé,*

*A mes amies : **Ryma,Chaimaa, Maria, Hind ,Sarah**...ainsi que tous mes proches .*

Ihcene

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو اكتشاف وتحديد أخطاء الآلة غير المتزامنة، و أكثر تحديداً خطأ ماس كهربائي بين لفات الساكن. استناداً إلى إعدادات الآلة غير المتزامنة التي توفر معظم المعلومات حول حالة النظام ، فإن الإزاحات ثلاثية الطور بين تيار الخط والتوتر الطور هي أفضل مؤشرات للخطأ لهذه الدراسة. استخدمت هذه المؤشرات كمدخل لشبكة الخلايا العصبية من نوع بيرسبترون المتعدد الطبقات والتي سمحت لنظام التشخيص بتحديد الخطأ من بين الاطوار المعيب بدقة جيدة.

الكلمات المفتاحية: الآلة غير المتزامنة؛ ماس كهربائي؛ شبكة الخلايا العصبية؛ مؤشرات الخطأ.

Résumé :

Ce travail a pour but de détecter et localiser les défauts de la machine asynchrone plus particulièrement le défaut de court-circuit entre spire statorique. D'après les paramètres de la MAS qui fournissent la plupart d'information sur l'état du système, les décalages triphasés entre le courant de ligne et la tension de phase qui sont les meilleurs indicateurs de défaut pour cette étude. ces indicateurs sont utiliser comme entrée au réseau de neurone de type MLP qui a permis au système de diagnostic de localiser la phase défectueuse avec une bonne précision.

Mots clés : Machine asynchrone ; court-circuit ; les réseaux de neurone artificiels ; indicateurs de défaut.

Abstract :

The aim of this work is to detect and locate the faults of the asynchronous machine, more particularly the short-circuit fault between stator turns. Based on the MAS settings that provide the most information on the state of the system, it is the three-phase shifts between line current and phase voltage that are the best fault indicators for this study. These indicators are used as input to neural network type MLP which allowed the diagnostic system to locate the defective phase with good precision.

Keywords : the asynchronous machine; short-circuit; neural network; fault indicator.

Listes des acronymes et abréviations

a_s, b_s, c_s : Indices correspondants aux trois phases statoriques

a_r, b_r, c_r : Indices correspondants aux trois phases rotoriques

i_{abc}^s : Courants statoriques dans les trois phases [A]

i_{abc}^r : Courants rotoriques dans les trois phases [A]

ϕ_{abc}^s : Flux statoriques dans les trois phases [wb]

ϕ_{abc}^r : Flux rotorique dans les trois phases [wb]

θ : Angle de la transformation de park entre le stator et le rotor

V_{dqo}^s : Tension statorique dans le plan de Park [V]

V_{dqo}^r : Tension rotorique dans le plan de Park [V]

i_{dqo}^s : Courant statorique dans le plan de Park [A]

i_{dqo}^r : Courant rotorique dans le plan de Park [A]

R_s, R_r : Résistance d'une phase statorique et rotorique [ohm]

R_{dqo}^s : Résistance statorique de Park [ohm]

R_{dqo}^r : Résistance rotorique de Park [ohm]

l_s, l_r : inductance propre statorique et rotorique .

ω_r : Pulsation rotorique [rd/s]

C_e : Couple électromagnétique [Nm]

C_r : Couple résistant [Nm]

MAS: Machine asynchrone

ZCT : Passage par zéro

RNA : Réseaux de neurones artificiels

MLP : Perceptron multi couches

ITCS: court-circuit entre spire (inter turn short circuit)

Table des matières

Introduction général	1
Chapitre 1 Etat de l'art sur le diagnostic de défauts de la machine asynchrone	
1.1 Introduction	3
1.2 La machine asynchrone.....	3
1.3 Construction de la machine asynchrone.....	4
1.3.1 Le stator.....	4
1.3.2 Le rotor à cage	4
1.3.3 Les Paliers.....	5
1.4 Présentation des différentes défaillances de la machine asynchrone.....	5
1.4.1 Les statistiques des défauts.....	5
1.4.2 Défauts statoriques.....	5
1.4.3 Défauts rotoriques.....	8
1.4.4 Défaillances aux paliers.....	8
1.4.5 Défaut mécanique	10
1.5 Diagnostic.....	11
1.6 Les méthodes de diagnostics	12
1.6.1 Les méthodes de connaissances.....	12
1.6.2 Les méthodes de redondances analytiques.....	14
1.6.3 Les méthodes par l'analyse de signaux.....	15
1.7 Mise au point de méthodes de surveillance/détection.....	18
1.8 Diagnostic des défaillances : identification et localisation des défauts.....	18
1.9 Conclusion.....	19
Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MAS avec défaut	
2.1 Introduction.....	20
2.2 Hypothèse simplificatrices.....	20

2.3	Modélisation d'une MAS asymétrique.....	21
2.3.1	Equations électriques	21
2.3.2	Equation magnétiques.....	23
2.3.3	Equation mécanique.....	26
2.4	Simulation de la machine asynchrone saine	27
2.5	Simulation de la MAS asymétrique	31
2.6	Conclusion	34
 Chapitre 3 L'effet de défaut sur le déphasage entre le courant et la tension		
3.1	Introduction	35
3.2	Le déséquilibre des courants et tensions	35
3.2.1	Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne.....	36
3.3	Simulation des courants statoriques en présence de défauts.....	36
3.4	Organigramme de détection de défaut.....	38
3.5	Méthode du temps de passage à zéro (ZCT).....	39
3.6	Indicateur de défaut	42
3.6.1	L'effet de défaut sur le déphasage entre le courant et la tension statorique.....	42
3.6.2	Les données d'entrée d'entraînement simulées.....	47
3.7	Conclusion	49
 Chapitre 4 Diagnostic des défauts de la MAS par les réseaux de neurones		
4.1	Introduction.....	50
4.2	Le neurone formel.....	51
4.2.1	Principe de fonctionnement.....	51
4.2.2	Modélisation générale.....	51
4.3	Application des réseaux de neurone au diagnostic de la machine asynchrone.....	52

4.3.1	Choix des variables d'entrées.....	53
4.3.2	Choix d'architecture du réseau de neurones.....	53
4.3.3	Apprentissage des réseaux de neurones.....	54
4.4	L'organigramme de détection de défaut.....	55
4.5	L'approche RNA pour le diagnostic de ma MAS.....	56
4.5.1	Préparation d'un ensemble de données de formation adapté aux RNA....	56
4.5.2	Le modèle d'architecture RNA	57
4.5.3	Résultats d'apprentissage	58
4.5.4	Résultat d'apprentissage des sorties et les erreurs de RNA	59
4.6	Conclusion	61
	Conclusion générale	62
	Annexes.....	63
	Bibliographie	65

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Stator d'un moteur asynchrone.....	4
Figure 1.2. Rotor à cage.....	4
Figure 1.3. La répartition des pannes.....	5
Figure 1.4. Différents types de défauts statorique.....	6
Figure 1.5. Les catégories d'excentricité.....	11
Figure 1.6. Méthodes de diagnostic des machines électriques.....	12

Chapitre 2

Figure 2.1. Courants statoriques.....	28
Figure 2.2. Courants rotoriques.....	28
Figure 2.3. Couple électromagnétique.....	28
Figure 2.4. Vitesse mécanique.....	29
Figure 2.5. Flux statoriques de Park.....	29
Figure 2.6. Flux rotoriques de Park.....	29
Figure 2.7. Courant statorique dans Le plan de phase $i_d^s = f(i_q^s)$	30
Figure 2.8. Courants statoriques de Park.....	30
Figure 2.9. Courants statoriques.....	31
Figure 2.10. Courants rotoriques.....	31
Figure 2.11. Couple électromagnétique.....	32
Figure 2.12. Vitesse mécanique.....	32
Figure 2.13. Flux statoriques de Park.....	32
Figure 2.14. Flux rotoriques de Park.....	33
Figure 2.15. Courant statorique dans le plan de phase $i_d^s = f(i_q^s)$	33
Figure 2.16. Courants statoriques de Park.....	33

Chapitre 3

Figure 3.1. Organigramme de détection de défaut.....	39
Figure 3.2. Courant statorique de la MAS en régime permanent.....	40

Figure 3.3. Méthode de calcul de zéro approximatif.....	41
Figure 3.4. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase a_s	45
Figure 3.5. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase b_s	46
Figure 3.6. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase c_s	46
Figure 3.7. Ensemble de données d'entrée d'entraînement simulées.....	48
Chapitre 4	
Figure 4.1. Modèle d'un neurone artificiel.....	51
Figure 4.2. Organigramme de détection de défaut par le RNA.....	55
Figure 4.3. Schéma fonctionnel de la procédure de localisation des défauts.....	56
Figure 4.4. Schéma de RN dédié au diagnostic de défaut de court-circuit.....	57
Figure 4.5. Performance de RNA.....	58
Figure 4.6. Approximation de fonction training et test.....	59
Figure 4.7. La sortie pour un défaut sur la phase a_s	59
Figure 4.8. L'erreur de sortie ITSC sur la phase a_s	59
Figure 4.9. La sortie pour un défaut sur la phase b_s	60
Figure 4.10. L'erreur de sortie ITSC sur la phase b_s	60
Figure 4.11. La sortie pour un défaut sur la phase c_s	60
Figure 4.12. L'erreur de sortie ITSC sur la phase c_s	60

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Effet de défaut sur les trois courants statoriques.....37

Tableau 3.2. Les valeurs de ZCT dans la phase a en défaut, exprimé en seconde43

Tableau 3.3. Les valeurs de ZCT dans la phase b en défaut, exprimé en seconde43

Tableau 3.4. Les valeurs de ZCT dans la phase c en défaut, exprimé en seconde.....44

Introduction générale

La machine asynchrone s'est imposée dans l'industrie grâce à sa robustesse, sa fiabilité et son faible coût par rapport aux autres types de machines. Il n'en reste pas moins que, comme toute machine soumise à des efforts, elle est sujette à une défaillance entraînant un changement indésirable ou un arrêt inattendu, ce qui provoque des pertes économiques considérables. Pour éviter ces problèmes il s'agit de diagnostiquer et détecter le défaut. Nous avons concentré essentiellement, dans ce travail, sur le défaut de court-circuit de spire statoriques.

La première partie dans ce travail sera consacré à la présentation de la MAS et d'un ensemble de définitions de base concernant ces différentes défaillances. Ensuite, on va présenter quelques méthodes de diagnostic.

Dans la deuxième partie, on va présenter une modélisation et une simulation de la MAS lorsqu'elle fonctionne à l'état sain et à l'état asymétrique grâce à l'analyse des signaux.

La troisième partie représente la suite naturelle de la deuxième partie, on génère les courants et les tensions dans les différentes phases dans les deux conditions saines et présence de défaut d'ITSC pour extraire les décalages entre les courants de ligne et les tensions de phase dans le domaine temporelle et les transformer vers le domaine angulaire à l'aide de la méthode de ZCT. Les données sont générées pour différents couples de charge et différents niveaux de défauts.

Pour la dernière partie, nous choisissons le diagnostic par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle plus précisément par réseaux du neurone artificiel exploité pour la détection et la localisation de défauts ITSC. Nous utilisons les données générées précédemment sont utilisées dans les phases d'apprentissage et de test.

Chapitre 1 Etat de l'art sur le diagnostic de défaut de la machine asynchrone

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons commencer par la présentation de la machine asynchrone étudier puis, nous exposerons les différentes défaillances qui peuvent affecter la machine, les défauts statoriques, les défauts rotoriques et les défauts aux paliers, et défaut mécanique. Enfin, nous étalerons le diagnostic des méthodes les plus usitées, la surveillance la détection l'identification et localisation de défaut.

1.2 La machine asynchrone

La MAS est la machine plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car elle 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 vitesse 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 [1].

1.3 Construction de la machine asynchrone

1.3.1 Le stator

Le stator est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique ce qui est illustrés sur la figure (1.1). Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties: les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines.

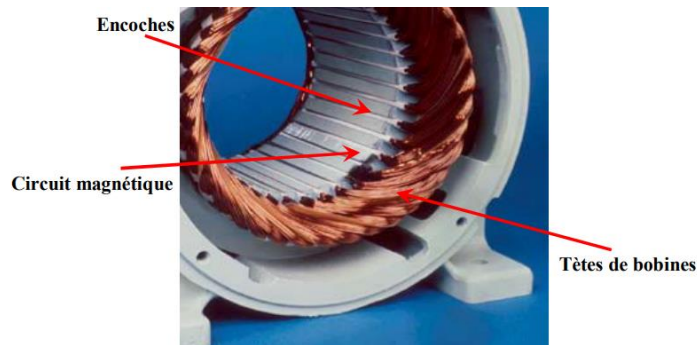


Figure 1.1. Stator d'un moteur asynchrone.

1.3.2 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. Cette cage qui est indiqué dans la figure (1.2) 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 [2].

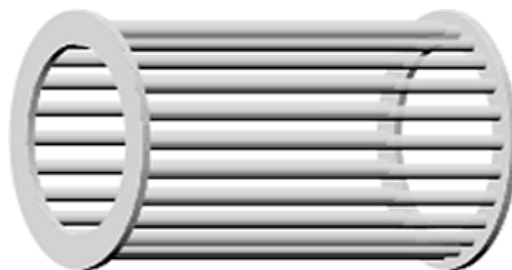


Figure 1.2. Rotor à cage.

1.3.3 Les Paliers

Les paliers, permettent la rotation de l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulées en fonte, sont fixées sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage [3].

1.4 Présentation des différentes défaillances de la MAS

1.4.1 Les statistiques des défauts

Ces défauts se répartissent selon la figure suivante :

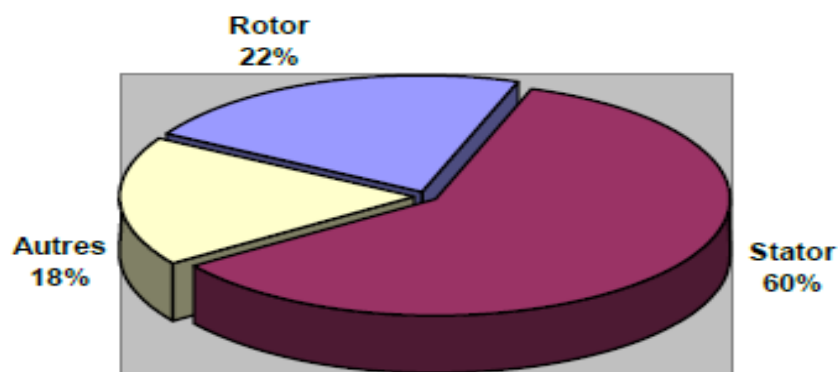


Figure 1.3. La répartition des pannes.

La figure (1.3) représente une étude statistique qui a été effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande des systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW).

1.4.2 Défaits statoriques

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines asynchrones ayant plusieurs types comme indique la figure (1.4). La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants. L'enroulement statorique d'une machine électrique est soumis à des efforts induits par une variété de facteurs, parmi les plus importants, une surcharge thermique, les vibrations mécaniques, les pics de tension provoqués par le réglage de fréquence...etc [1].

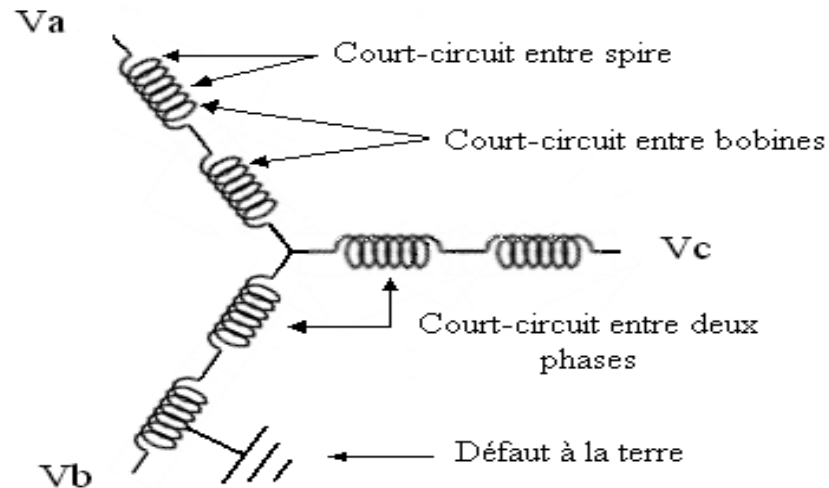


Figure1.4. Différents types de défauts statorique.

a Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [4]:

- dégradation de l'isolant à la fabrication
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation
- vibrations mécaniques
- vieillissement naturel des isolants
- fonctionnement dans un environnement sévère [4]

b Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

c Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît.

d Défauts de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

1.4.3 Défauts rotoriques

Les facteurs les plus importants pour les défaillances rotoriques sont dus aux phénomènes thermiques, mécaniques, électromécaniques, résiduels, dynamiques, environnementaux. Parmi ces défauts on cite :

a Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un défaut assez courant dans les machines électriques, Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique[5].La déformation de cette barre provoque une variation dans le couple électromécanique ainsi que des oscillations de la vitesse de rotation, en créant des vibrations mécaniques, c'est le fait d'une présence d'une anomalie dans le fonctionnement de la MAS. Cette rupture de barres est causée par des vibrations excessives, ou de large transitoire, de charges lourdes, aussi par la contamination du matériau rotorique par des éléments chimiques ou naturels environnementale telle que l'humidité, température etc.

b Rupture des anneaux de court-circuit

Ce défaut est assez fréquent que les ruptures de barres, il est due aux dilatations différentiels entre les barres et les anneaux, d'autre part, ils prennent en circulation des courants plus importants que peuvent supporter les barres, car ce sont des anneaux de court-circuit, de ce fait l'application de charges trop lourdes engendra un appel de grands courants ainsi cette pression d'intensité grande, causera une rupture d'une portion d'anneau et impliquera une fluctuation dans le courant de barres, ce qui engendre une création de modulations au niveau des courants statoriques similaire à celle causée par la rupture des barres.

1.4.4 Défaillances aux paliers

a Défauts roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface électromécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor.

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure du roulement et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont :

- l'usure due au vieillissement
- la température de fonctionnement élevée
- la perte de lubrification
- l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement)
- le défaut de montage
- les courants d'arbres (ShaftCurrent)

Les conséquences directes de cette défaillance sur les roulements sont :

- des trous dans les gorges de roulement intérieures et extérieures
- l'ondulation de leur surface de roulement
- décollement, effritement de surface provoqué par une surcharge

Sur le système, ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur [5].

b Défaillance du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus 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. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [6].

c Défaillances de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt immédiat de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de

l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi à une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance [6].

1.4.5 Défaut mécanique

a Excentricité

L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe dès sa fabrication. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est toléré [7].

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances. La machine asynchrone sera la plus sensible aux excentricités.

Trois catégories d'excentricité figure (1.5) sont généralement distinguées :

- ❖ **L'excentricité statique:** généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage [8].
- ❖ **L'excentricité dynamique:** correspond à un centre de rotation du rotor diffère du centre géométrique du stator mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Dans ce type d'excentricité, le centre du rotor n'est pas en son centre de rotation et de ce fait la position d'épaisseur minimale d'entrefer tourne avec le rotor. Parmi les causes de ce type d'excentricité, on cite : la flexion de l'arbre du rotor, l'usure ou le défaut d'alignement du roulement [8].
- ❖ **L'excentricité mixte:** est la plus fréquente, elle fait la combinaison des deux excentricités précédemment citées.

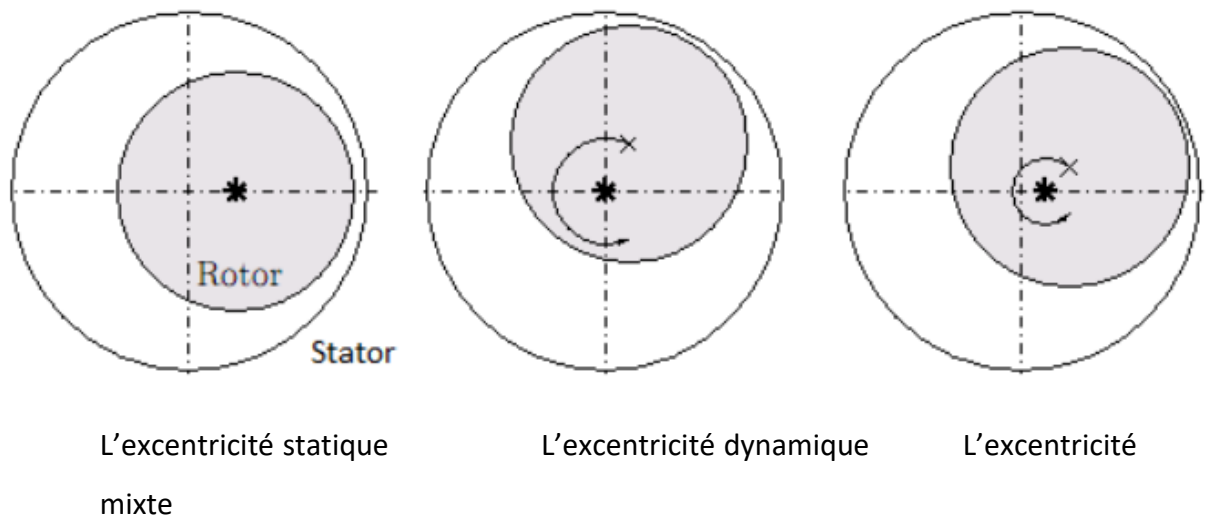


Figure 1.5. Les catégories d'excentricité.

b Défaut balourd

Quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible de faire coïncider l'axe de rotation avec le centre de gravité de chaque tranche élémentaire du rotor, ce qui caractérise le balourd. Il en résulte que l'arbre en rotation est soumis à des efforts centrifuges qui le déforment. Le balourd est un déséquilibre massique qui provient généralement du défaut d'usinage, d'assemblage et de l'échauffement dissymétrique du rotor lors du fonctionnement [9].

1.5 Diagnostic

Le mot diagnostic peut avoir plusieurs interprétations selon le contexte et le domaine d'application. L'objectif de la fonction diagnostic dans les procédés industriels est de rechercher les causes probables et de localiser une défaillance ou un défaut. Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires :

- la localisation permettant de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.
- l'identification qui consiste à déterminer les raisons qui ont mené à une situation anormale.

1.6 Les méthodes de diagnostics

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic [7], comme montre la figure (1.6).

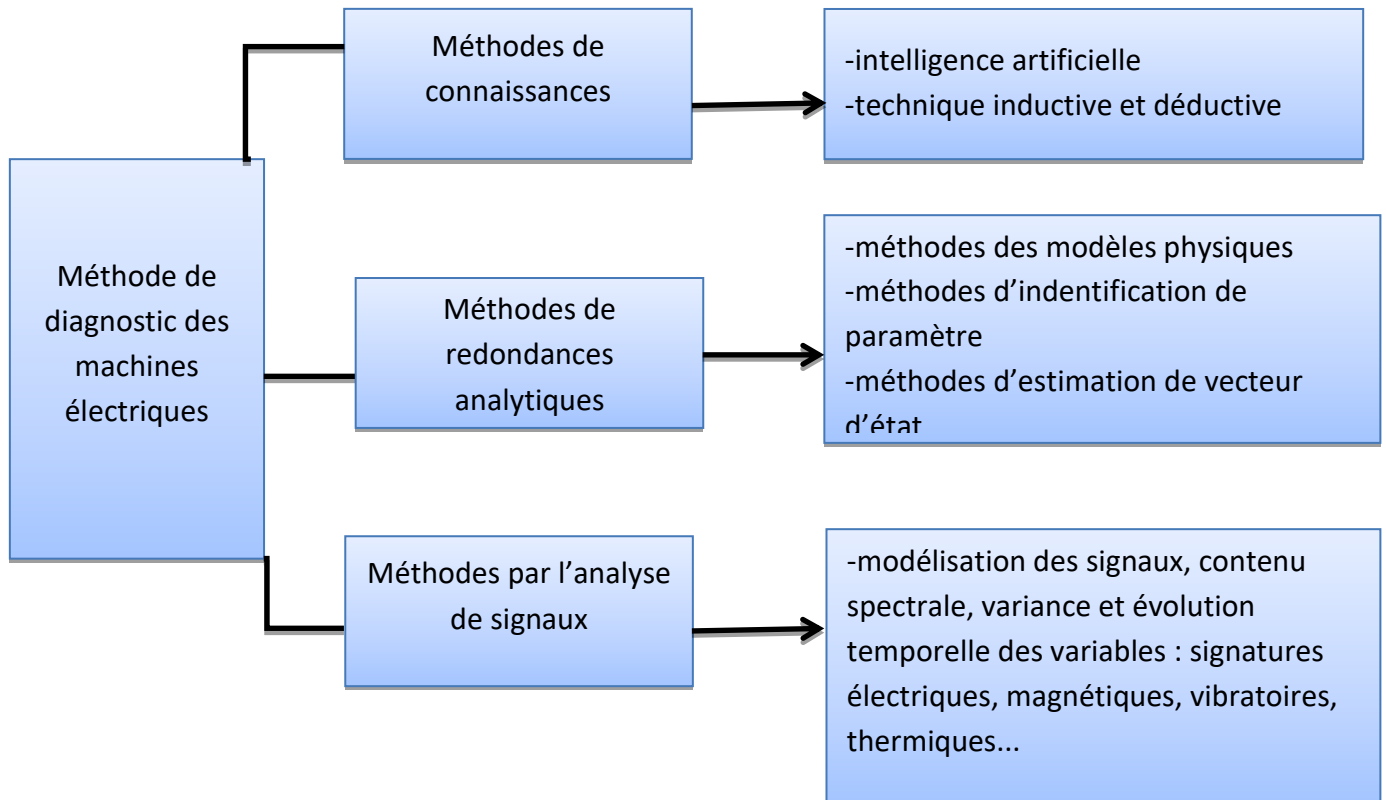


Figure 1.6. Méthodes de diagnostic des machines électriques.

1.6.1 Les méthodes de connaissances

Dans la littérature spécialisée plusieurs techniques de détection de défauts par ces méthodes sont présentées. Ces méthodes ne font pas appel au modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. En définitif, la seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience [7]. Les techniques d'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes basés sur experts, les réseaux de neurones, et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité. Cependant, les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au

diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens [10].

a Diagnostic par utilisation des techniques d'intelligence artificielle (IA)

Ces dernières années, le diagnostic de défaut des machines électriques se sont éloignées des techniques traditionnelles pour s'orienter vers des techniques dites d'intelligence artificielle (IA). Ces méthodes sont basées sur la connaissance a priori du système et utilisant un ensemble de règles et de faits (données manipulées par les règles) qui constituent, ce qu'on appelle la base de connaissance. Parmi ces méthodes, on peut regrouper en quatre grandes familles :

- méthodes de reconnaissance des formes
- diagnostic par systèmes experts
- diagnostic par logique floue
- diagnostic par réseaux de neurones [11]

b Diagnostic par les Méthodes inductives

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut.

c Diagnostic par les Méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. Les méthodes déductives doivent trouver quels sont les effets dans les systèmes. Une vérification des «effets trouvés par rapport aux effets possibles » permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut. Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant arrière. La connaissance "à priori" de la cause " défaut " implique la connaissance de certains effets [12].

d Redondance physique (matérielle)

La redondance physique consiste à utiliser plusieurs capteurs, actionneurs, processeur et logiciels pour mesurer et/ou contrôler une variable particulière. Un principe de vote majoritaire est appliqué sur les valeurs redondantes pour savoir s'il y a un défaut ou non. Elle entraîne un coût important en instrumentation mais fiable, sûr et simple à implanter.

1.6.2 Les méthodes de redondances analytiques

Ces méthodes se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes: les méthodes de l'espace de parité, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état [10].

a Diagnostic des défauts par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En effet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé.

Les premiers travaux relatant de l'estimation de paramètres ont débuté avec des modèles relativement simples (modèle de Park par exemple) utilisés depuis plusieurs années pour la commande des machines électriques. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certains cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance. L'étape suivante est donc nécessairement le passage à un modèle de connaissance plus fin de la machine, tout en gardant la possibilité d'identifier les paramètres souhaités. Ces modèles peuvent être des modèles triphasés, qui s'affranchissent de l'hypothèse d'une machine magnétiquement équilibrée, ou encore des modèles à n phases, capables de refléter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences.

b Techniques d'estimation d'état

Ces méthodes utilisent les observateurs pour la reconstruction de l'état du système en connaissant son modèle mathématique. Généralement, les observateurs sont utilisés dans les systèmes de contrôle pour réduire l'incohérence entre les systèmes modélisés et mesurés causée par les bruits ou les erreurs de modèle. Ils peuvent être utilisés pour le diagnostic et la détection des défauts si les paramètres du processus sont connus et les défauts peuvent être modélisés comme des changements de variables d'état du système surveillé. De nombreux chercheurs ont concentré leurs efforts sur l'utilisation d'un observateur pour la détection des défauts. Les cassures de barres provoquent une augmentation dans la résistance rotorique apparente. En se basant sur cette hypothèse, le filtre de Kalman a été utilisé pour l'estimer. Puis la comparer avec sa valeur nominale pour détecter les ruptures de barres. L'observateur à mode glissant est utilisé dans pour la détection en ligne du défaut de cassure des barres rotoriques[13].

1.6.3 Les méthodes par l'analyse de signaux

Le principe des méthodes d'analyse de signal repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [14]. La première étape dans cette approche concerne naturellement la modélisation des signaux. Il s'agira par la suite de les caractériser dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc...[14]. L'analyse de ces grandeurs quantifiables fidèlement attribuée aux signaux des défauts reste la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts dans les machines électriques.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement, les vibrations, etc. Ces symptômes sont la manifestation flagrante d'une modification des caractéristiques électriques et mécaniques de la machine. Une lecture sur les travaux précédents confirme l'existence de plusieurs techniques de détection de défauts par traitement de leurs signaux [7]. Le défaut étant traduit par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation, ces méthodes se

trouvent bien adaptées à la détection de défauts. Exigeant uniquement un capteur de courant ou/et un capteur de vitesse, l'analyse spectrale est de loin la méthode de diagnostic la plus économique et la plus rapide, d'où son succès auprès des industriels. L'analyse spectrale représente la méthode la plus usitée pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les courts-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. Pratiquement, la surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques, comme la puissance instantanée, et plus particulièrement le courant statorique, soit les vibrations mécaniques, le couple électromagnétique [10].

a Diagnostic par mesures de vibration mécanique

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [15].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1.1)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la Fmm et de la perméance (P).

$$B_s = Fmm \cdot P \quad (1.2)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et

l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode [15].

b Diagnostic par l'analyse du flux magnétique

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques.

c Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé du moteur [1].

d Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Car la puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase (oscillations plus importantes et plus visibles). Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [15].

e Diagnostic par mesures des courants statorique

Cette méthode encore appelée MCSA « Motor Current Signal Analyses », est liée à l'analyse fréquentiel (FFT) du courant statorique afin d'identifier les fréquences caractéristiques d'un défaut. Sachant qu'en présence de défauts, des raies spectrales de faibles amplitudes apparaissent.

f Diagnostic par l'analyse du Vecteur de Park

Il existe deux versions de cette méthode, la première utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculés à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou : $i_d = f(i_q)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut [15].

La deuxième version de cette technique est appelée l'Approche Etendue du Vecteur de Park, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park ($\sqrt{(i_d(t))^2 + (i_q(t))^2}$). Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défauts de roulement.

1.7 Mise au point de méthodes de surveillance/détection

La mise au point de méthodes de surveillance/détection se nourrit de ces éléments, les exploite, pour mettre au point des techniques permettant de mettre en évidence, au cours du fonctionnement du système, les prémices ou l'occurrence d'un défaut. Comme nous l'avons déjà évoqué, les méthodes de surveillance/détection s'appuient généralement sur des mesures directes ou indirectes de grandeurs liées au système en fonctionnement. L'objectif est de chercher l'apparition de signatures des défauts surveillés et de générer automatiquement, c'est-à-dire sans recours à l'expertise humaine, des indicateurs informant de cette apparition [16].

1.8 Diagnostic des défaillances : identification et localisation des défauts

L'étape de diagnostic consiste à analyser les données issues de la surveillance pour tenter d'identifier et de localiser la ou les causes probables de la défaillance. Les méthodes de diagnostic peuvent utiliser toutes les connaissances disponibles sur leur relation de cause à effet. Cette étape fournit des informations permettant de déterminer le degré de criticité du défaut et de cibler les moyens d'action possibles pour le contenir [16].

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel de la constitution de la machine asynchrone, Puis une classification des défaillances statoriques, rotoriques et mécaniques. Ensuite nous avons abordé le diagnostic suivi d'une liste non exhaustive de ces différentes méthodes qui ont pour but de détecter et localiser le défaut.

Chapitre 2 Modélisation et simulation de la MAS

avec défaut

2.1 Introduction

Le modèle mathématique est l'un des objectifs les plus importants dans le cadre de diagnostic des machines électriques.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurueil en présence de défaut d'asymétrie entre spires, ensuite nous aborderons la simulation des modèles de la machine établis dans la première partie d'où on va donner et interpréter les résultats obtenus par la simulation dans les cas saine et asymétrie puis on va analyser le comportement de la machine dans les deux cas .La simulation est effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink.

2.2 Hypothèse simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont:

- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques [17].

2.3 Modélisation d'une MAS asymétrique

Dans le repère triphasé, les trois vecteurs a_s, b_s et c_s sont orienté selon les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Il est de même pour le rotor.

L'axe a_s est souvent considéré comme référence, et l'angle θ définit la position du rotor par rapport au stator [17].

Prenant f_a, f_b et f_c le rapport du nombre de spires retranché au nombre total de spires avec :

$$f_a = \frac{n_a}{N_s}, f_b = \frac{n_b}{N_s}, f_c = \frac{n_c}{N_s}$$

Tel que : n_a, n_b et n_c les nombres de spires retranché pour chaque phase.

2.3.1 Equations électriques

En tenant compte des hypothèses mentionnées précédemment les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} V_{abc}^s = R_{abc}^s i_{abc}^s + \frac{d}{dt} \phi_{abc}^s \\ 0 = R_{abc}^r i_{abc}^r + \frac{d}{dt} \phi_{abc}^r \end{cases} \quad (2.1)$$

Les grandeurs $V_{abc}^s, i_{abc}^s, \phi_{abc}^s$ sont des vecteurs de dimension 3×1 définis comme suit :

$$V_{abc}^s = \begin{bmatrix} V_a^s \\ V_b^s \\ V_c^s \end{bmatrix} i_{abc}^s = \begin{bmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_c^s \end{bmatrix} \phi_{abc}^s = \begin{bmatrix} \phi_a^s \\ \phi_b^s \\ \phi_c^s \end{bmatrix}$$

Celle du rotor sont :

$$i_{abc}^r = \begin{bmatrix} i_a^r \\ i_b^r \\ i_c^r \end{bmatrix} \phi_{abc}^r = \begin{bmatrix} \phi_a^r \\ \phi_b^r \\ \phi_c^r \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances des enroulements statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$R_{abc}^s = \begin{bmatrix} r_{as} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cs} \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances du stator.}$$

Pour $r_{as} = r_{bs} = r_{cs} = r_s$ la machine devient symétrie.

$$R_{abc}^r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances du rotor.}$$

r_s : Résistance d'une phase du stator. r_r : Résistance d'une phase du rotor.

$$P_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_a) & \cos\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_a) & -\sin\left(\theta_a - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

L'application de la transformation de Park aux différentes grandeurs triphasées se fait de la manière suivante :

$$X_{dqo} = P_a X_{abc} \quad (2.2)$$

X_{dqo} : est une grandeur de Park

X_{abc} : est une grandeur triphasée

$P_a = P_s$ pour le stator et $P_a = P_r$ pour le rotor.

En appliquant la transformation de Park à l'équation (2.1) on obtient :

a Pour le stator

$$P_s V_{abc}^s = P_s \left(R_{abc}^s i_{abc}^s + \frac{d}{dt} \phi_{abc}^s \right) \quad (2.3)$$

La matrice de tension statorique devient :

$$P_s V_{abc}^s = P_s R_{abc}^s P_s^{-1} (P_s i_{abc}^s) + \frac{d}{dt} (P_s \phi_{abc}^s) \quad (2.4)$$

Nous aboutirons à l'équation des tensions statoriques dans le repère de Park

$$V_{dqo}^s = R_{dqo}^s i_{dqo}^s + \frac{d}{dt} \phi_{dqo}^s \quad (2.5)$$

b Pour le rotor

$$0 = P_r \left(R_{abc}^r i_{abc}^r + \frac{d}{dt} \phi_{abc}^r \right) \quad (2.6)$$

Avec :

$$P_r \frac{d}{dt} \phi_{abc}^r = \frac{d}{dt} (P_r \phi_{abc}^r) - \left(\frac{d}{dt} P_r \right) \phi_{abc}^r \quad (2.7)$$

Le rotor est symétrique

Nous aboutissons à l'équation des tensions rotoriques dans le repère de Park

$$0 = R_{dqo}^r i_{dqo}^r - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_{dqo}^r + \frac{d}{dt} \phi_{dqo}^r \quad (2.8)$$

Finalement, on trouve :

$$\begin{cases} V_{dqo}^s = R_{dqo}^s i_{dqo}^s + \frac{d}{dt} \phi_{dqo}^s \\ 0 = R_{dqo}^r i_{dqo}^r - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \phi_{dqo}^r + \frac{d}{dt} \phi_{dqo}^r \end{cases} \quad (2.9)$$

2.3.2 Equation magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone. Ces relations s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} \phi_{abc}^s = L_{abc}^{ss} i_{abc}^s + L_{abc}^{sr} i_{abc}^r \\ \phi_{abc}^r = L_{abc}^{rs} i_{abc}^s + L_{abc}^{rr} i_{abc}^r \end{cases} \quad (2.10)$$

L_{abc}^{ss} : Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases statoriques.

L_{abc}^{rr} : Matrice des inductances propres et mutuelles entre phases rotoriques.

L_{abc}^{sr} :Matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

L_{abc}^{rs} :Matrice des inductances mutuelles entre phases rotoriques et statoriques.

L_{ls} :Inductance de fuite statorique.

L_{lr} : Inductance de fuite rotorique

L_{ms} : Inductance de magnétisation statorique.

Pour définir les éléments des inductances d'une machine asymétriques, supposons que les phases du stator a_s, b_s et c_s ont des nombres spires donnés par N_a, N_b et N_c , respectivement, et que les phases de rotor ont des nombres spires donnés par $N_{ar} = N_{br} = N_{cr} = N_r$.

$$L_{abc}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{asas} & L_{asbs} & L_{ascs} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} \end{bmatrix}$$

$$L_{asas} = \frac{N_a^2}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3} L_m \right) = N_a^2 L_{mls} \quad (2.11)$$

$$L_{bsbs} = N_b^2 L_{mls} \quad (2.12)$$

$$L_{cscs} = N_c^2 L_{mls} \quad (2.13)$$

Avec :

$$L_{mls} = \frac{1}{N_s^2} \left(L_{ls} + \frac{2}{3} L_m \right) \quad (2.14)$$

$$L_{ms} = \frac{2}{3} L_m \quad (2.15)$$

Si le stator est symétrique, les inductances propres des phases a_s, b_s et c_s sont égales :

$$L_{asas} = L_{bsbs} = L_{cscs} = L_{ls} + \frac{2}{3} L_m = L_{ls} L_{ms} \quad (2.16)$$

Pour la même raison les inductances mutuelles du stator sont égales :

$$L_{asbs} = L_{ascs} = L_{bsas} = L_{bscs} = L_{csas} = L_{csbs} = -\frac{1}{2} L_{ms} \quad (1.17)$$

Les matrices des inductances sont exprimées par :

$$L_{abc}^{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

Et :

$$L_{abc}^{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Le rotor est supposé symétrique, les inductances propres des phases a_r , b_r et c_r sont égales:

$$L_{arar} = L_{brbr} = L_{cr cr} = L_{lr} + \frac{2}{3}L_m = L_{lr}L_{mr} \quad (2.18)$$

Pour la même raison les inductances mutuelles du rotor sont égales

$$L_{arbr} = L_{arcr} = L_{brar} = L_{brcr} = L_{crar} = L_{crbr} = -\frac{1}{3}L_{mr} \quad (2.19)$$

$$\text{Avec } L_{mr} = \frac{2}{3}L_m \quad (2.20)$$

La matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques dépendent de la position angulaire θ (stator-rotor). Elle s'écrit :

$$L_{abc}^{sr} = \begin{bmatrix} L_{asar} \cos(\theta) & L_{asbr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{ascr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{bsar} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{bsbr} \cos(\theta) & L_{bscr} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{csar} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{csbr} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{cscr} \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$L_{abc}^{rs} = L_{abc}^{srT} \quad (2.21)$$

Les coefficients L_{asar} , L_{asbr} , L_{ascr} , L_{bsbr} , L_{bscr} , L_{csar} , L_{csbr} , L_{cscr} sont les valeurs crêtes des inductances mutuelles stator-rotor.

a Pour le stator

$$P_s \phi_{abc}^s = P_s (L_{abc}^{ss} i_{abc}^s + L_{abc}^{sr} i_{abc}^r) \quad (2.22)$$

$$\phi_{d_{qo}}^s = P_s L_{abc}^{ss} P_s^{-1} i_{d_{qo}}^s + P_s L_{abc}^{sr} P_r^{-1} i_{d_{qo}}^r \quad (2.23)$$

b Pour le rotor

$$P_r \phi_{abc}^r = P_r (L_{abc}^{rs} i_{abc}^s + L_{abc}^{rr} i_{abc}^r) \quad (2.24)$$

$$\phi_{d_{qo}}^r = P_r L_{abc}^{rs} P_s^{-1} i_{d_{qo}}^s + P_r L_{abc}^{rr} P_r^{-1} i_{d_{qo}}^r \quad (2.25)$$

Finalement, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{d_{qo}}^s = L_{d_{qo}}^{ss} i_{d_{qo}}^s + L_{d_{qo}}^{sr} i_{d_{qo}}^r \\ \phi_{d_{qo}}^r = L_{d_{qo}}^{rs} i_{d_{qo}}^s + L_{d_{qo}}^{rr} i_{d_{qo}}^r \end{cases} \quad (2.26)$$

2.3.3 Equation mécanique

L'étude des caractéristiques dynamiques de la MAS fait introduire des variations non seulement des grandeurs électriques (tension, courant, flux) mais aussi des grandeurs mécaniques (couple, vitesse).

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - f_v \Omega \quad (2.27)$$

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant imposé par la charge mécanique.

f_v : Couple des frottements visqueux.

Ω : Vitesse de rotation.

J : Moment d'inertie.

P : Nombre de paires de pole.

$$\text{Avec : } P\Omega = \omega \quad (2.28)$$

Le couple électromécanique est donné par l'équation suivante :

$$C_e = P [i_{abc}^s]^T \left[\frac{d}{d\theta} L_{abc}^{sr} \right] [i_{abc}^r] \quad (2.29)$$

$$\text{On a } i_{abc}^s = P_s^{-1} i_{dqo}^s \quad (2.30)$$

$$\text{Avec } [i_{abc}^s]^T = [P_s^{-1} i_{dqo}^s]^T \quad (2.31)$$

$$\text{Alors } [i_{abc}^r] = [P_r^{-1}] [i_{dqo}^r] \quad (2.32)$$

On remplace dans l'équation (2.29) :

$$Ce = P [i_{abc}^s]^T [P_s] \left[\frac{d}{d\theta} L_{abc}^{sr} \right] [P_r^{-1}] [i_{dqo}^r] \quad (2.33)$$

2.4 Simulation de la machine asynchrone saine

Après avoir présenté la modélisation de la machine asynchrone, nous nous intéressons à la simulation du modèle qui permet d'avoir une idée globale sur ses performances. La MAS est alimentée directement par le réseau triphasé équilibré et ses paramètres sont donnés en annexe.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} * \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin(2\pi f * t - 2\pi/3) \\ \sin(2\pi f * t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \text{ Avec : } f = 50\text{Hz}$$

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. A l'instant $t= 0.6\text{s}$ la machine été soumise à un couple résistant nominale $Cr=3.8\text{Nm}$, le couple électromagnétique vient équilibrer le couple de charge, la vitesse diminue, le courant augmente et atteint sa valeur nominale.

Les résultats de simulations effectués sous MATLAB/Simulink, sont présentés par les figures (2.1) à (2.8) :

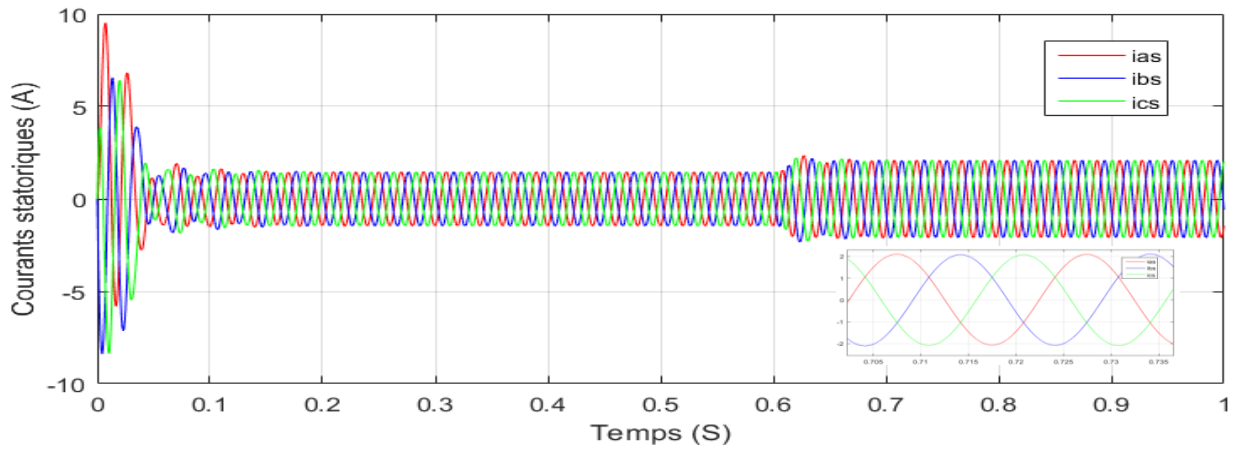


Figure 2.1. Courants statoriques.

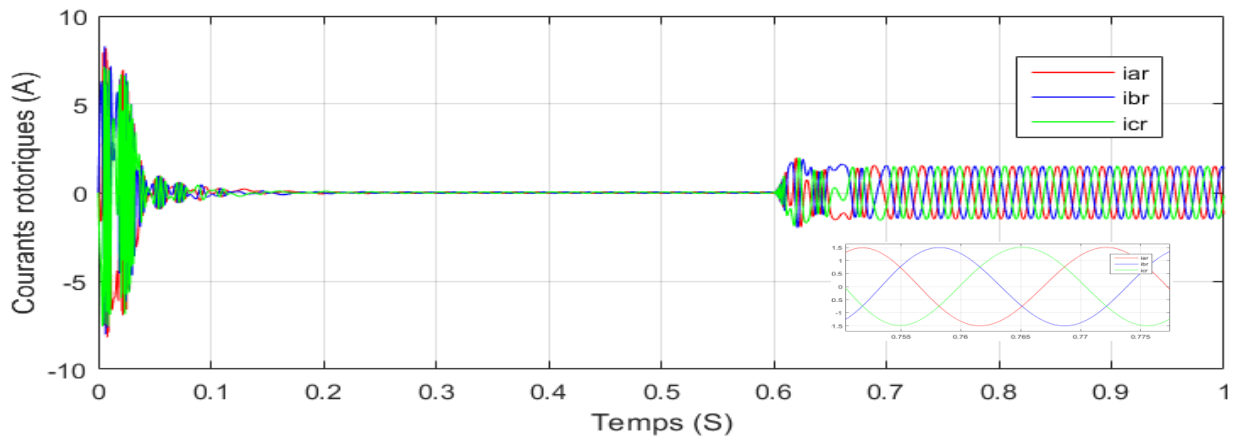


Figure 2.2. Courants rotoriques.

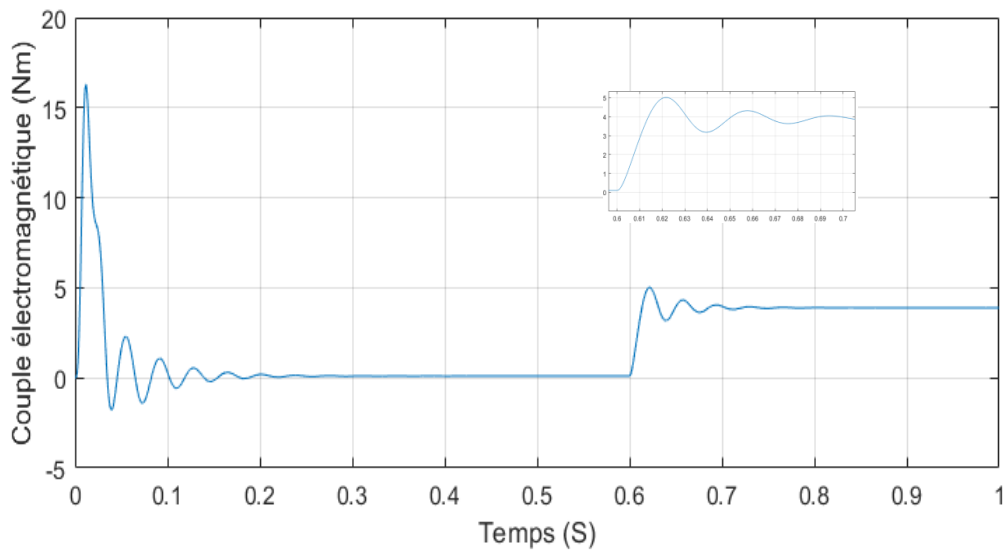


Figure 2.3. Couple électromagnétique.

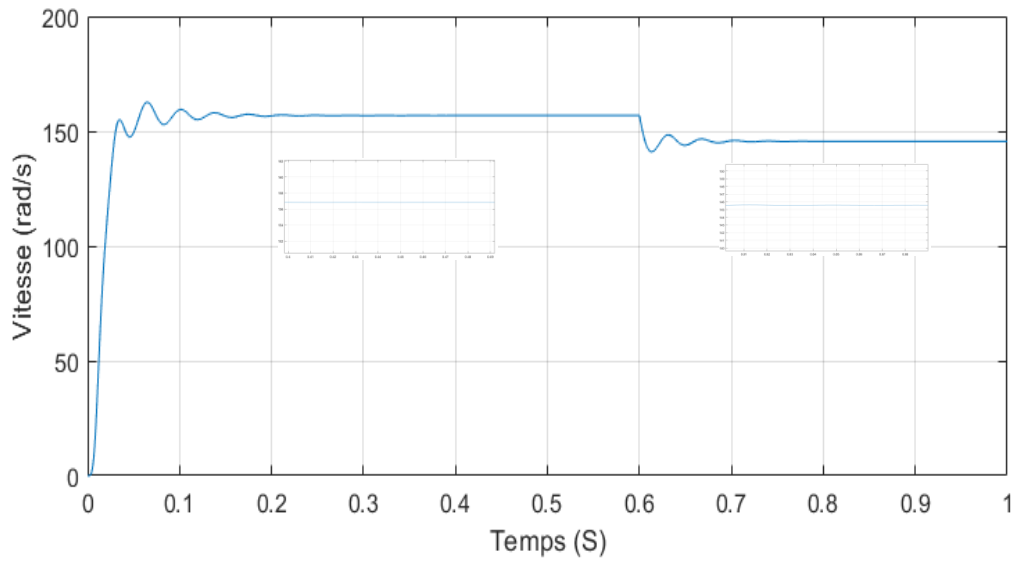


Figure 2.4. Vitesse mécanique.

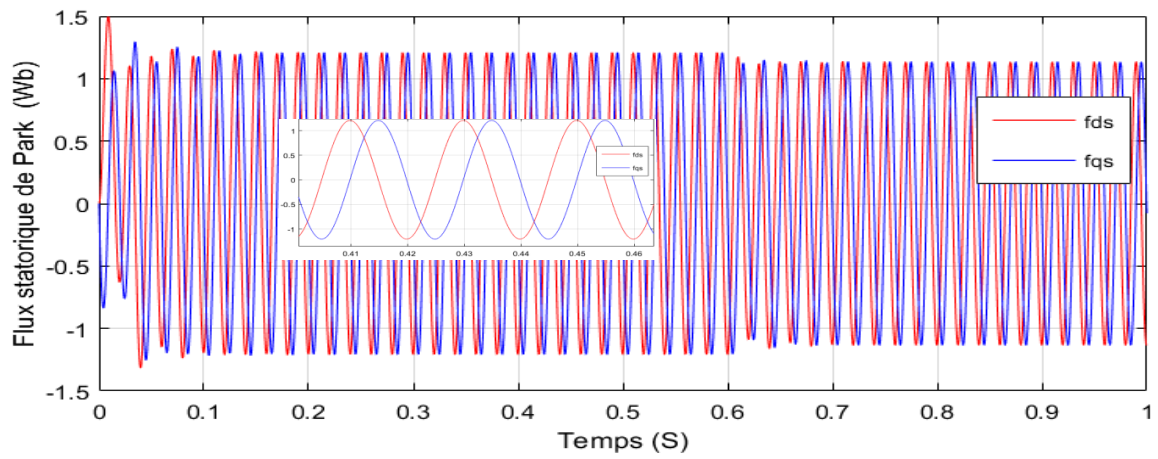


Figure 2.5. Flux statoriques de Park.

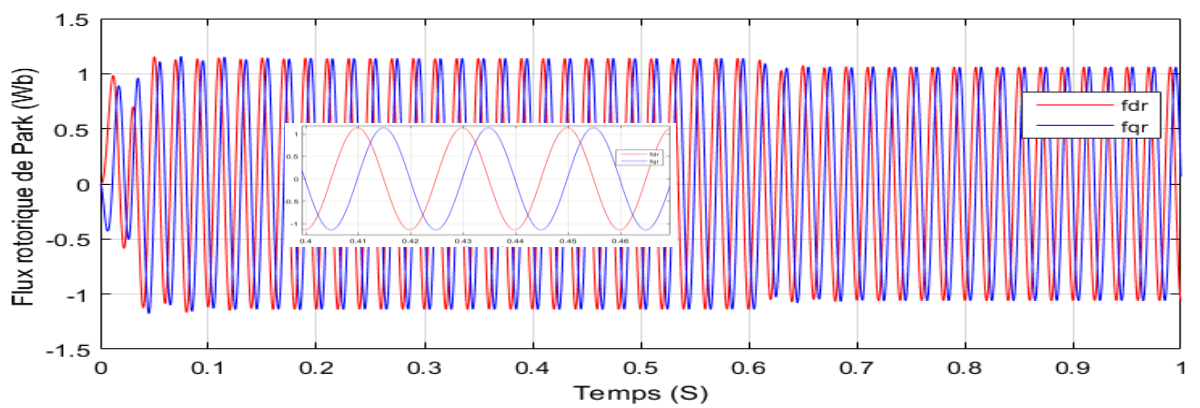


Figure 2.6. Flux rotoriques de Park.

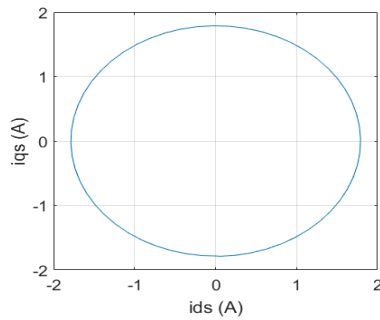


Figure 2.7. Courant statorique dans le plan de phase $i_d^s = f(i_q^s)$.

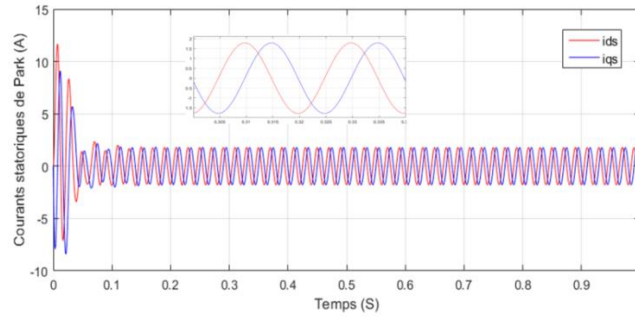


Figure 2.8. Courants statoriques de Park.

D'après les résultats des figures on peut interpréter que :

- ✚ On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pendant une durée de $t=0.3s$, pour les différents grandeurs de la machine.
- ✚ Les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage. Cette amplitude diminue au bout de quelques alternances pour donner une forme sinusoïdale d'amplitude constante de $1.45A$ qui définit le courant nécessaire à la magnétisation de la machine à vide, figure (2.1).
- ✚ Les courants rotoriques de démarrage sont importants, ce qui est dû à l'appel de puissance pour pouvoir démarrer la machine puis ce dernier se stabilise à une valeur à vide presque nulle, figure(2.2).
- ✚ Au démarrage, le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de $16.28Nm$ cela est nécessaire pour vaincre l'inertie du moteur, puis se rétablit à une valeur très faible pour compenser les pertes mécaniques à vide (charge nulle), figure (2.3).
- ✚ Les oscillations de la vitesse dans les premiers instants de démarrage présentent un accroissement régulier, le régime établi est atteint au bout de $t = 0.3s$ à $156.84 rad/s$, figure (2.4).
- ✚ On visualise que la courbe de Lissajous à une forme circulaire centré à l'origine et de diamètre égale à l'amplitude de courant statorique à vide, figure (2.7) et (2.8).
- ✚ Avec l'application de la charge ($3.8Nm$) à la machine à $t = 0.6s$, les pulsations de courants statoriques augmentent jusqu'à $2A$, le couple

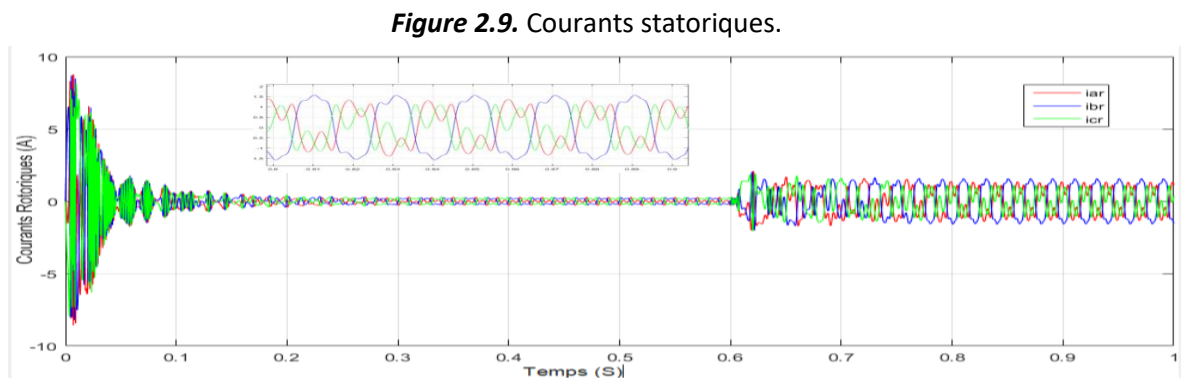
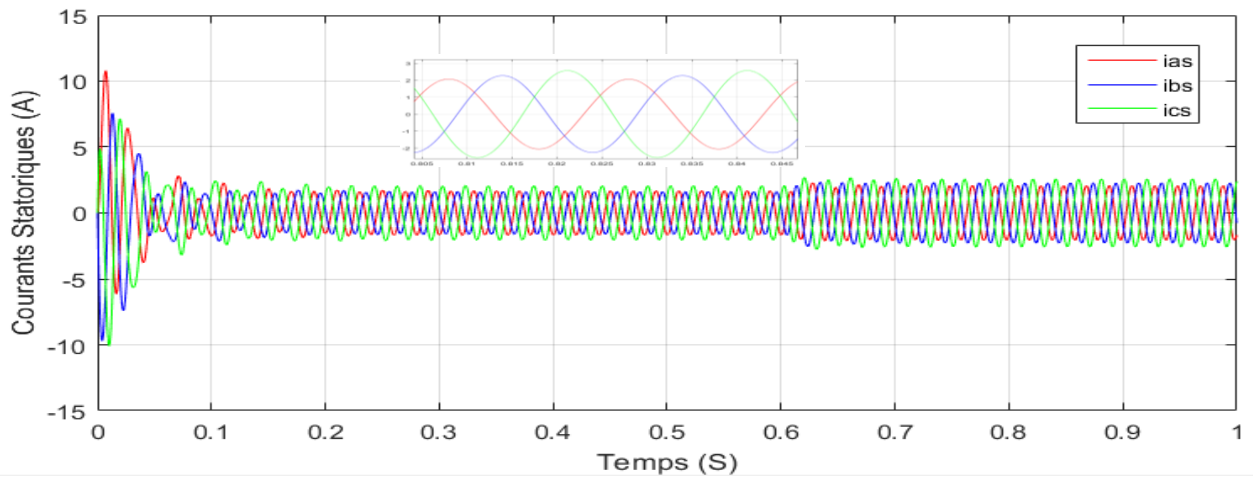
électromagnétique atteint la valeur de C_r et la vitesse diminue au-dessous de sa valeur nominale à 145.58 rad/s.

2.5 Simulation de la MAS asymétrique

Dans cette partie nous allons montrer le comportement d'une machine asymétrique sur l'évolution temporelle avec ces des différents grandeurs par rapport à la machine saine.

La simulation de cette machine se fera dans les mêmes conditions que la machine saine. La machine présente 30 spires retranchées dans la phase as , 50 spires dans la phase bs et 70 spires dans la phase cs .

Les résultats obtenus par simulation sont présentés dans les figures (2.9) à (2.16) :



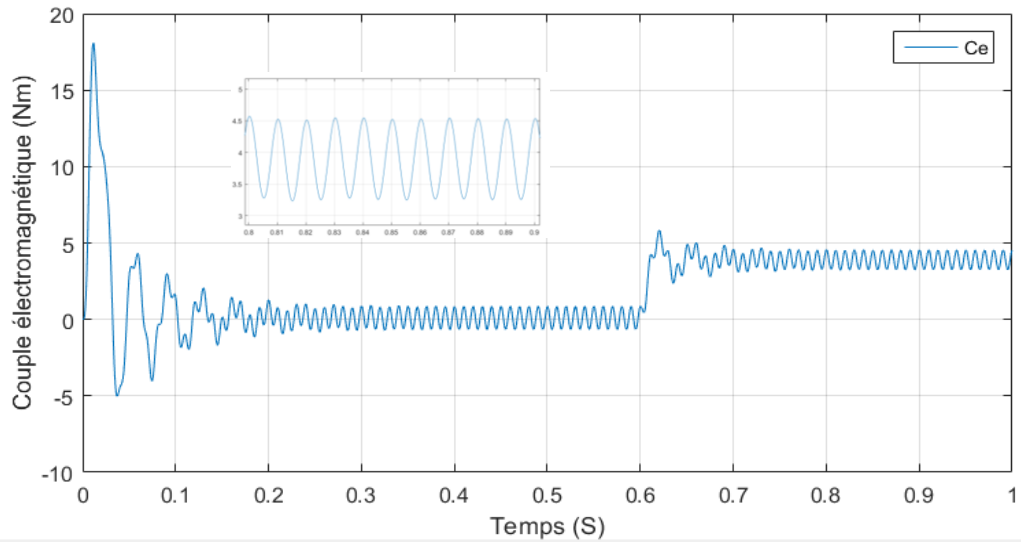


Figure 2.11. Couple électromagnétique.

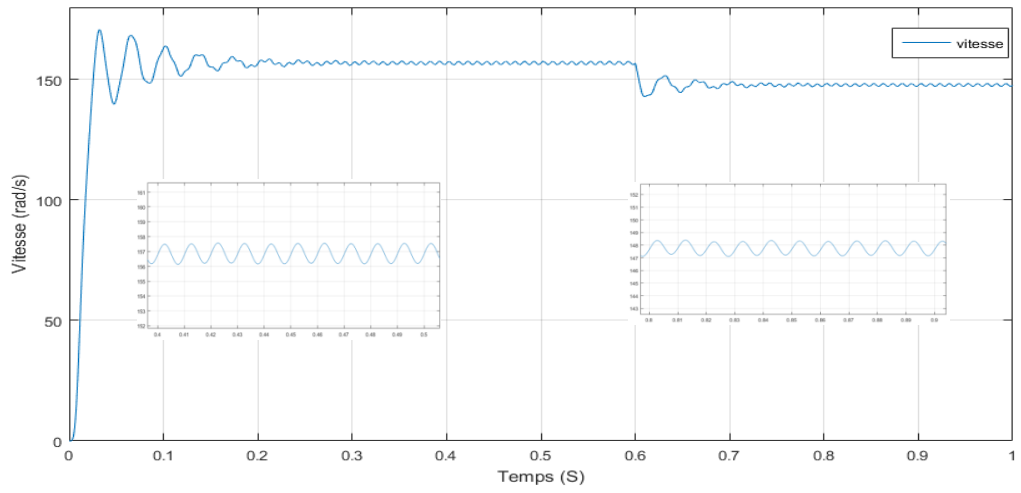


Figure 2.12. Vitesse mécanique.

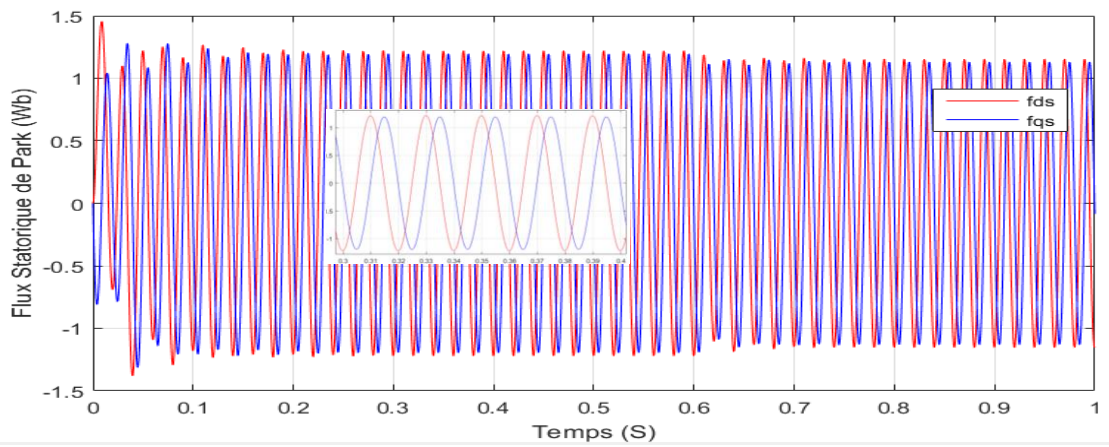


Figure 2.13. Flux statoriques de Park.

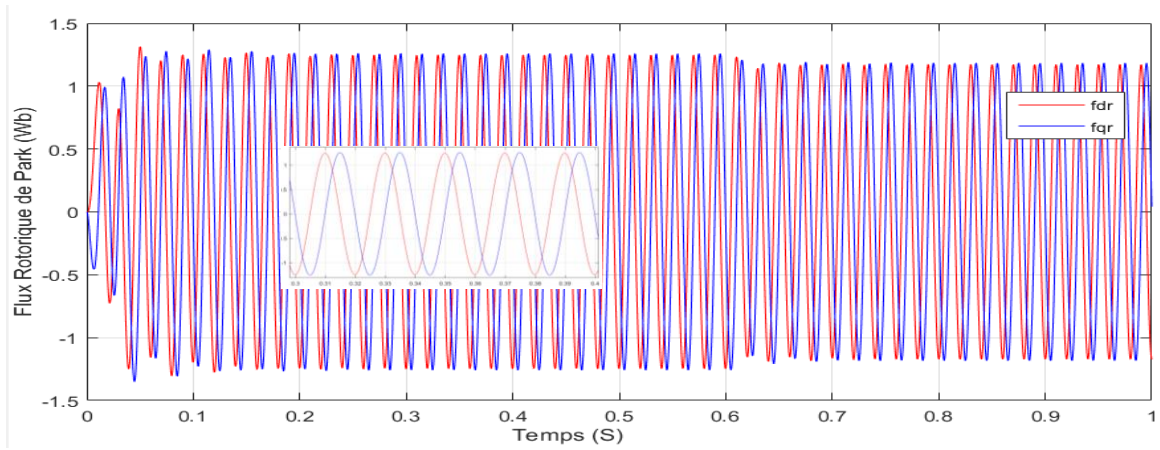


Figure 2.14. Flux rotoriques de Park.

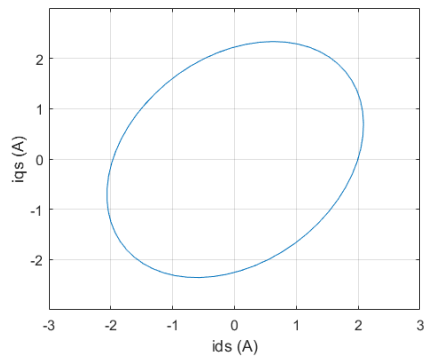


Figure 2.15. Courant statorique dans le plan de phase $i_a^s = f(i_q^s)$.

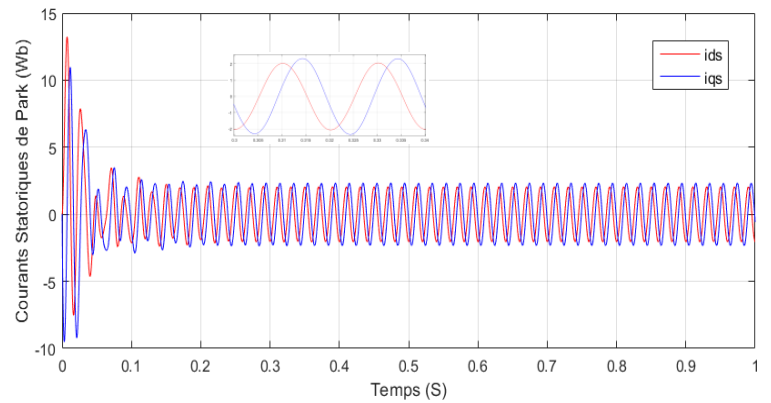


Figure 2.16. Courants statoriques de Park.

D'après les résultats des figures on peut interpréter que :

- ✚ La machine présente une asymétrie sur les trois phases. Nous remarquons un déséquilibre qui se manifeste sous forme une augmentation importante au niveau des courants statoriques dans les trois phases qui dépassent la valeur de $1.46A$ à $1.68A$ dans la phase as , $1.61A$ dans la phase bs et $2.06A$ dans la phase cs ce qui est illustré dans la figure (2.9).

- ✚ On visualise une déformation dans l'allure des courants rotoriques à cause de l'application de changement de nombre de spires des bobinages, figure (2.10).
- ✚ Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de $18.15Nm$. À $t = 0.3s$ on remarque une apparition d'ondulation sur l'allure en régime permanent, figure (2.11).
- ✚ On analyse évolution régulière de la vitesse au démarrage et s'établit à $157.5 rad/s$, son évolution en régime permanent apparaitre une légère ondulation à $t = 0.3s$ figure (2.12) qui dépend essentiellement de l'inertie J de l'ensemble machine-charge ceci sous-entend d'intenses vibrations mécaniques.
- ✚ Pour le cas d'une machine asymétrique le diamètre de Lissajous change (ellipse) à cause de présence des fluctuations créées, la figure (2.15) et (2.16) montre la variation de diamètre de la courbe de Lissajous selon le type de défaut.

2.6 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter un modèle décrivant la machine asynchrone asymétrique dans laquelle les phases statoriques n'ont pas les mêmes nombre de spires. Cette modélisation est basée sur l'application de la transformation de Park qui a pour but de simplifier le modèle triphasé en un modèle biphasé, cette transformation conduit à des relations indépendantes de temps et à la réduction de l'ordre d'équations de la machine.

Ensuite, nous avons validés par simulation le comportement de la machine asynchrone saine et asymétrique. Les résultats obtenus confirment l'étude théorique de la première partie. Une machine asynchrone saine peut se présenter comme un cas particulier de la machine asymétrique.

Chapitre 3 L'effet de défaut sur le déphasage

entre le courant et la tension

3.1 Introduction

L'étude des défauts dans les machines électriques est un domaine qui a pris une place importante depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels.

Dans ce chapitre et à l'aide du chapitre précédant, nous allons premièrement étudier le comportement des courants statoriques de la MAS en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide sous un système équilibré de tensions triphasées. Ensuite nous présenterons l'étude du comportement des déphasages triphasés que nous allons extraire dans le domaine temporel à l'aide de la méthode de passage par zéro (ZCT) et les transformer vers le domaine angulaire en présence de défaut court-circuit entre spires et sous différentes conditions de charge.

3.2 Le déséquilibre des courants et tensions

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré.

Le déséquilibre des tensions peut être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques. On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre augmente en conséquence de l'augmentation de la dysmétrie de la charge. [18].

3.2.1 Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne

Un défaut entre spires dans le bobinage du stator de machines électriques provoque un courant de circulation dans les spires en défaut dont l'amplitude peut être très importante. Si le défaut reste non détecté, il se propage et peut aboutir à défauts de type spire-spire ou alors spire-masse. L'augmentation de la chaleur due au court-circuit peut également conduire à la dégradation totale de l'enroulement du stator. En effet, le courant circulant dans les spires en court-circuit est plusieurs fois plus important que le courant nominal. L'augmentation de la température qui s'en suit entraîne la destruction en cascade des isolants et par effet cumulatif, la destruction complète de la machine.

D'une façon générale, à la suite d'un court-circuit, apparaissent des vibrations et des oscillations de couple synonymes de présence de nouvelles composantes dans le couple électromagnétique, et par conséquent dans les courants statoriques [14].

3.3 Simulation des courants statoriques en présence de défauts

En fonctionnement normal et dans des conditions équilibrées, les tensions de phase et les courants de ligne sont égaux en amplitude et décalé de 120° électrique. Cependant, sous le fonctionnement en défaut, les courants statoriques sont inégaux ainsi que leurs déphasages.

La simulation de la machine asynchrone est faite à l'aide de la modélisation du chapitre N°2 et sous l'environnement de MATLAB /Simulink. L'objectif est de voir clairement l'évolution des courants statoriques entre les trois phases (a_s, b_s, c_s) sous un défaut de court-circuit de 125 spires sur 528 à l'instant $t=0.5s$ et on va présenter la simulation à vide sous une tension sinusoïdale équilibrée. Les paramètres de la MAS sont donnés en annexe.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 220\sqrt{2} * \begin{bmatrix} \sin(2\pi f * t) \\ \sin(2\pi f * t - 2\pi/3) \\ \sin(2\pi f * t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \text{ Avec : } f = 50Hz$$

Les résultats obtenus par simulation sont présentés dans le tableau (3.1).

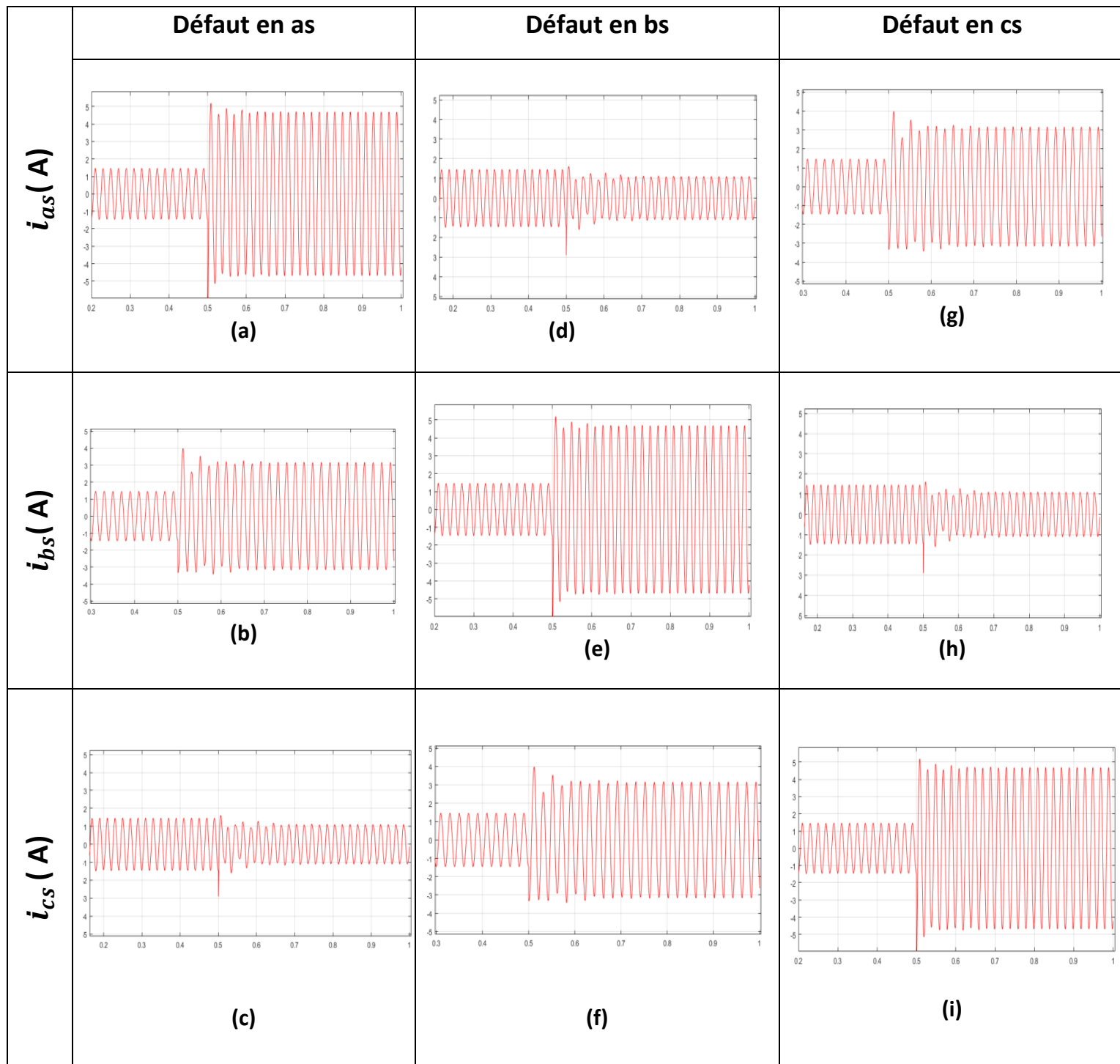


Tableau 3.1. Effet du défaut sur les trois courants statoriques.

D'après les résultats obtenus dans le tableau (3.1) on peut interpréter que :

- ✚ Lorsqu'un défaut se produit sur l'une des phases, une augmentation importante apparaît au niveau des amplitudes des courants statoriques particulièrement dans la phase correspondante de $4.6A$. Les autres courants statoriques subissent de plus petites influences de $3.1A$ et de $1.1A$ ce qui est illustré dans le tableau (3.1).
- ✚ Nous remarquons que le courant de phase en défaut atteint presque 3 fois le courant nominal de la machine.
- ✚ On observe aussi des modifications des valeurs des courants sont réalisées selon une permutation circulaire en sens direct ($i_{as} \rightarrow i_{bs} \rightarrow i_{cs}$).
- ✚ Il est donc clair, qu'un défaut de court-circuit influence principalement le courant statorique sur la valeur crête de la phase défectueuse.

3.4 Organigramme de détection de défaut

La MAS est alimentée par une source triphasée équilibrée, nous avons mesurées les courants et les tensions statoriques correspondantes dans chaque instants, ces derniers seront calculés par la méthode de ZCT qui nous a permis d'extraire les décalages temporels ensuite on les a transformé à des décalages angulaires qui seront utiles dans le traitement.

L'organigramme suivant présente l'évolution du diagnostic de la MAS afin de calculer les indicateurs de défaut.

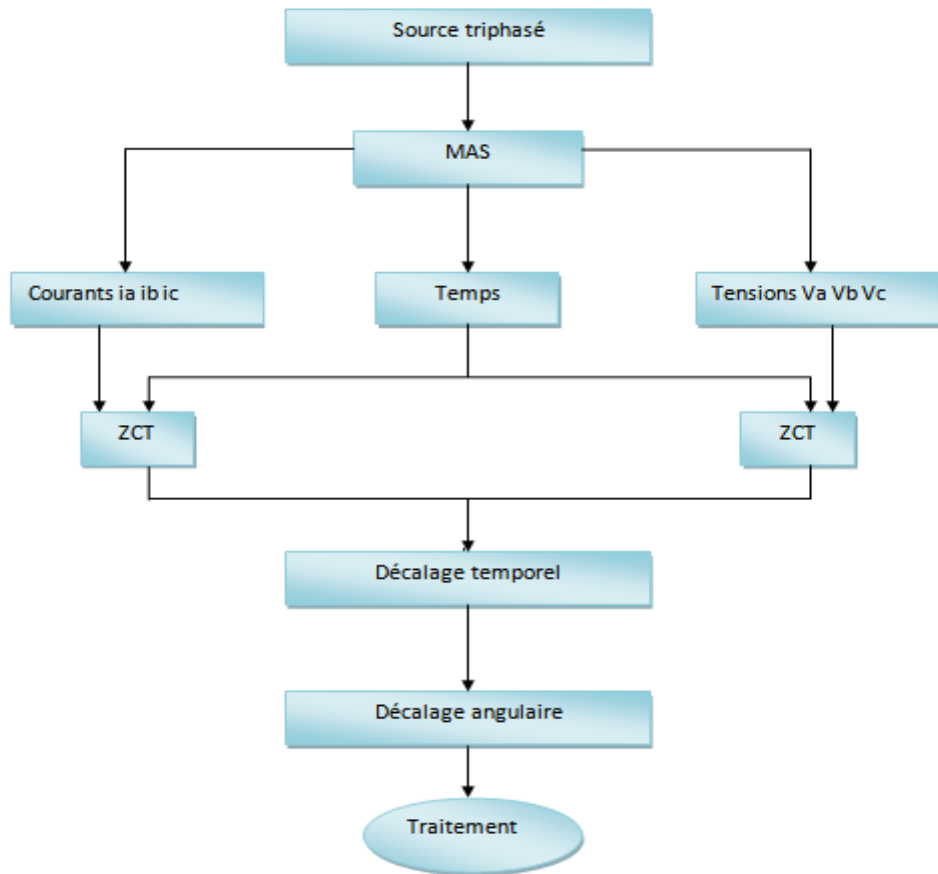


Figure 3.1. Organigramme de détection de défaut

3.5 Méthode du temps de passage à zéro (ZCT)

Grâce à la surveillance des temps de passage par zéro successifs ZCT, la méthode a été appliquée avec succès dans la mesure de la vitesse. Elle a été appliquée aussi pour la détection des défauts de court-circuit de spires. Le signal ZCT est défini comme l'intervalle de temps entre deux points de passage à zéro successifs du courant du stator, donné par [19] :

$$T_{ZC}(n) = t(n) - t(n - 1) \quad (3.1)$$

T_{ZC} : Le signal ZCT .

$t(n)$: Le moment où l'échantillon actuel est égal à zéro.

Si le moteur tourne à une vitesse constante sous une tension d'alimentation équilibrée et dans le cas sain de la MAS, l'espacement entre les passages par zéro successifs est égal. On n'a simulé Le courant statorique dans le cas sain de la MAS et on a pris le zoom dans le régime permanent ce qui est illustré dans la figure (3.2).

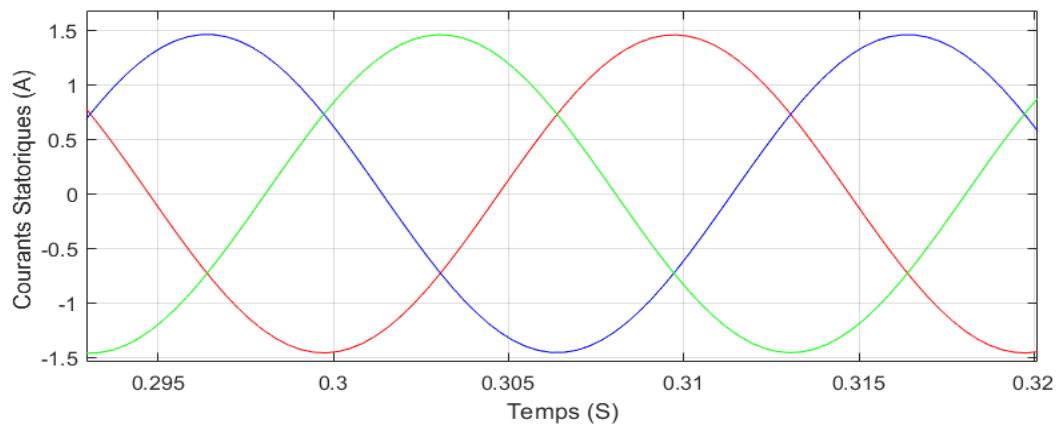


Figure 3.2. Courants statoriques de la MAS en régime permanent.

La fréquence d'alimentation est de 50 Hz et la fréquence d'échantillonnage du signal de courant est de 1 kHz. Dans une application réelle, il est impossible de trouver le temps pour lequel le courant est exactement égal à zéro en raison de l'échantillonnage discret. Ainsi, la figure (3.3) schématise le calcul des points zéro approximatifs. Supposons que le courant est linéaire dans un petit intervalle de temps (c'est-à-dire un temps d'échantillonnage), entre les instants d'échantillonnage [19]:

$$t(n - 1) \text{ Et } t(n), I(n - 1) \times I(n) < 0. \quad (3.2)$$

Sur la base de cette hypothèse, l'équation suivante est donnée par :

$$\frac{I(n)-0}{I(n)-I(n-1)} = \frac{t(n)-T(k)}{t(n)-t(n-1)} \quad (3.3)$$

Le temps approximatif $T(k)$ peut être calculé par l'équation [19] :

$$T(k) = t(n) - \frac{I(n)[t(n)-t(n-1)]}{I(n)-I(n-1)} \quad (3.4)$$

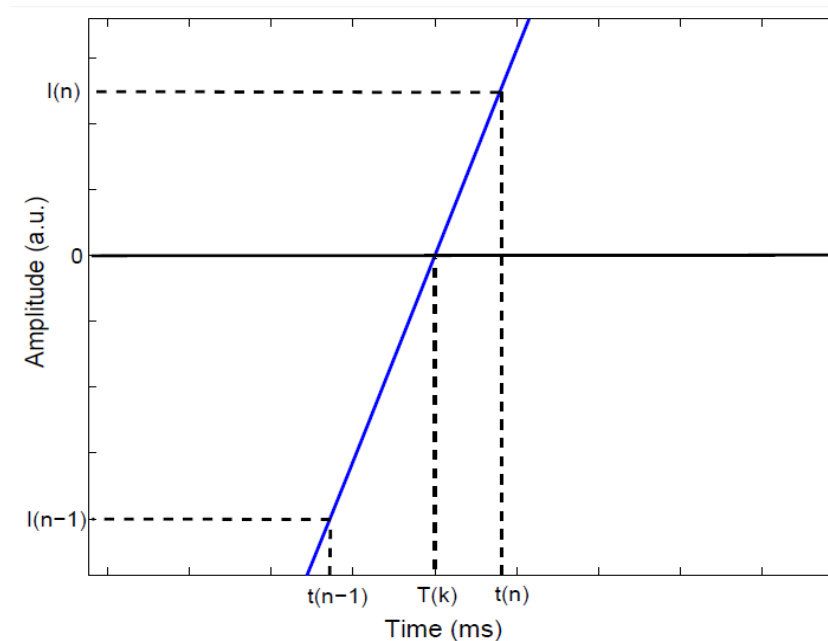


Figure 3.3. Méthode de calcul de zéro approximatif.

Dans notre étude nous avons utilisé la *ZCT* à partir de l'analyse temporelle (Comparaison des données). Cette méthode consiste à comparer des données de mesures pour un état sain et pour un état en présence de défaut et identifier ainsi l'anomalie.

3.6 Indicateur de défaut

Un défaut de court-circuit sur une des trois phases (a_s, b_s, c_s) se manifeste comme illustré par les figures du tableau (3.1). Les trois déphasages entre le courant de ligne et les tensions de phase correspondante sont affectés par les défauts considérés. En effet, on a visualisé dans la simulation des courants statoriques en présence de défaut ITSC sur une des trois phases, un déséquilibre au niveau des amplitudes et des déphasages des courants apparait, en supposant que la tension d'alimentation soit équilibrée. On va considérer ce déséquilibre comme indicateurs de défaut. Pour cela, on fait une analyse de l'effet du défaut sur ces déphasages.

3.6.1 L'effet de défaut sur le déphasage entre le courant et la tension statorique

Notre étude est établie pour trouver le meilleur choix d'indicateur de défaut ITSC. Dans notre approche nous avons sélectionné la variation du déphasage entre les tensions de phases et les courants de ligne, après avoir fait la simulation des courants en présence de défaut.

Pour mieux visualiser l'effet du défaut sur la MAS, nous avons fait une étude sur les déphasages afin de voir le changement significatif de leurs valeurs entre la tension de phase (qui subit peu de changements dus à une alimentation déséquilibrée) et les courants de ligne de la MAS.

Nous avons calculé les déphasages entre les courants de ligne et les tensions de phase correspondantes, en utilisant la méthode ZCT. Et cela, en fonction du nombre de spires en court-circuit sans aucune charge. Les tableaux de (3.2) à (3.4) illustrent les valeurs calculées par la ZCT. Nous avons tracé sur les figures (3.3), (3.4) et (3.5), les caractéristiques des trois déphasages simulés (ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c) pour des défauts sur les phases a_s, b_s, c_s .

Phase en défaut	Nombre de défaut	ZCT		
		a	b	c
Phase (a) en défaut	1	0.3147	0.3214	0.3280
	2	0.3147	0.3214	0.3280
	3	0.3147	0.3215	0.3280
	4	0.3146	0.3215	0.3280
	5	0.3146	0.3215	0.3280
	6	0.3146	0.3216	0.3280
	7	0.3146	0.3216	0.3280
	8	0.3146	0.3216	0.3280
	9	0.3145	0.3216	0.3279
	10	0.3145	0.3217	0.3279
	11	0.3145	0.3217	0.3279
	12	0.3145	0.3217	0.3279
	13	0.3145	0.3217	0.3279
	14	0.3144	0.3218	0.3278
	15	0.3144	0.3218	0.3278

Tableau 3.2. Les valeurs de ZCT dans la phase a en défaut, exprimées en secondes.

Phase en défaut	Nombre de défaut	ZCT		
		a	b	c
Phase (b) en défaut	1	0.3282	0.3148	0.3213
	2	0.3282	0.3147	0.3213
	3	0.3281	0.3147	0.3214
	4	0.3281	0.3146	0.3215
	5	0.3280	0.3146	0.3215
	6	0.3280	0.3146	0.3216
	7	0.3280	0.3146	0.3216
	8	0.3280	0.3145	0.3216
	9	0.3279	0.3145	0.3217

	10	0.3279	0.3145	0.3217
	11	0.3279	0.3145	0.3217
	12	0.3279	0.3145	0.3217
	13	0.3279	0.3144	0.3218
	14	0.3278	0.3144	0.3218
	15	0.3278	0.3143	0.3219

Tableau 3.3. Les valeurs de ZCT dans la phase b en défaut, exprimées en secondes.

Phase en défaut	Nombre de défaut	ZCT		
		a	b	c
Phase (c) en défaut	1	0.3214	0.3281	0.3147
	2	0.3214	0.3281	0.3147
	3	0.3215	0.3280	0.3147
	4	0.3215	0.3280	0.3146
	5	0.3215	0.3280	0.3146
	6	0.3216	0.3280	0.3146
	7	0.3216	0.3280	0.3146
	8	0.3216	0.3289	0.3146
	9	0.3216	0.3279	0.3146
	10	0.3217	0.3279	0.3145
	11	0.3217	0.3279	0.3145
	12	0.3217	0.3279	0.3145
	13	0.3217	0.3279	0.3145
	14	0.3218	0.3278	0.3144
	15	0.3219	0.3278	0.3143

Tableau 3.4. Les valeurs de ZCT dans la phase c en défaut, exprimées en secondes.

Après avoir tiré les valeurs de ZCT qui sont calculé dans le domaine temporel on les transforme vers le domaine angulaire pour calculer le déphasage par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{zct_v - zct_i}{T} \times 360 \quad (3.5)$$

Après avoir calculé les déphasages nous avons obtenus les figures (3.4) à (3.6)

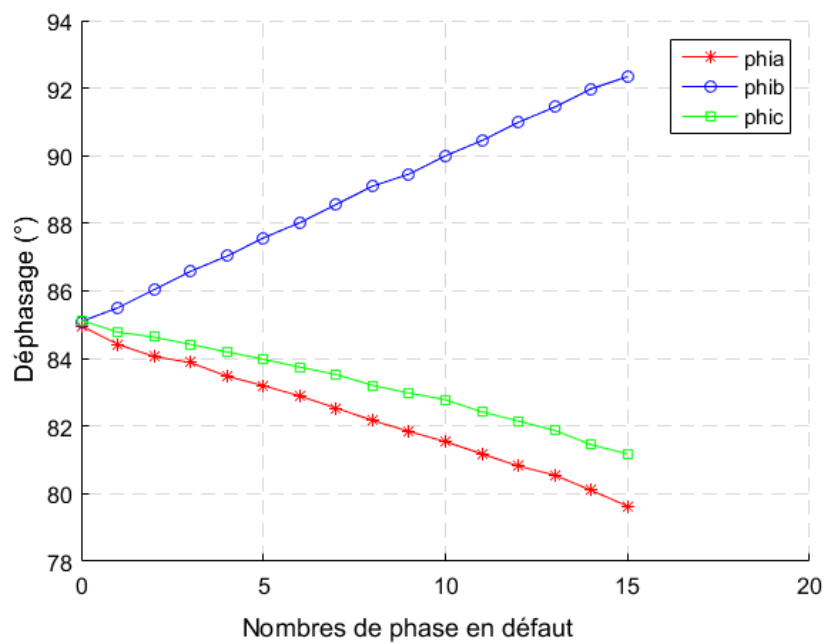


Figure 3.4. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase a_s .

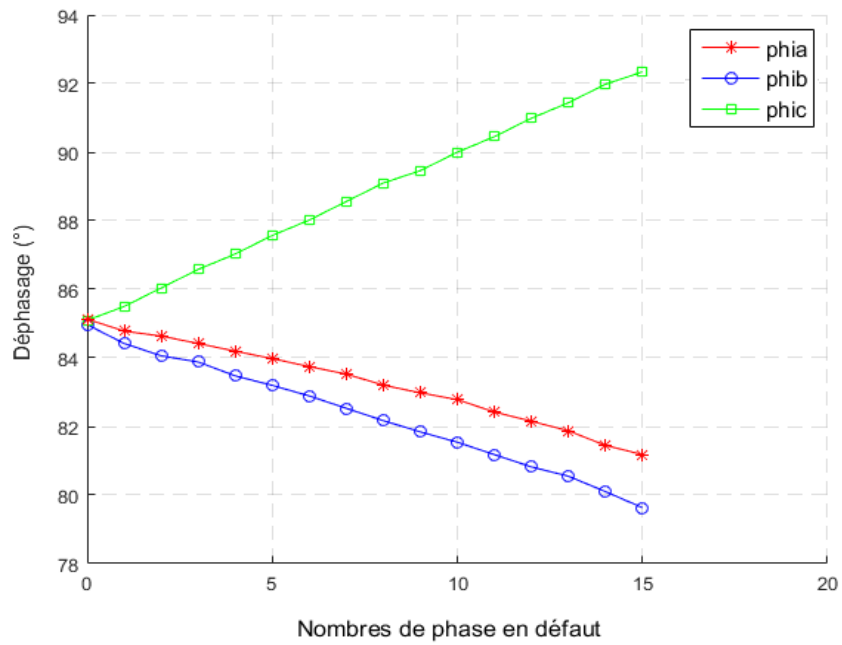


Figure 3.5. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase b_s .

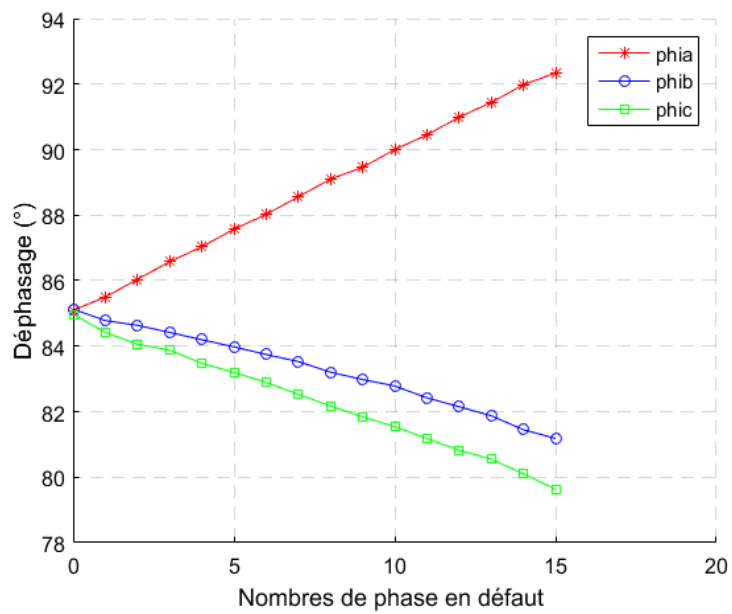


Figure 3.6. Caractéristiques de déphasage en fonction de défaut sur la phase c_s .

D'après les résultats obtenus dans les figures (3.4), (3.5) et (3.6) on peut interpréter que :

- ✚ Pour un défaut de nombre (n) de spires en défaut sur la phase a_s ou b_s ou c_s comme illustre les figures (3.4), (3.5) et (3.6) les trois déphasages sont parfaitement distincts et ne présentent aucun croisement entre eux.
- ✚ On remarque que le déphasage de la phase en défaut est plus faible.
- ✚ plus le nombre de spire est important plus l'écart entre les déphasages s'agrandit.
- ✚ pour une alimentation triphasée selon le sens direct l'évolution des déphasages en cas d'un défaut sur une des phases (a_s, b_s ou c_s) s'effectue selon une permutation circulaire dans le sens indirect de rotation respectivement dans l'ordre croissant $(\phi_a \phi_c \phi_b)$ $(\phi_b \phi_a \phi_c)$ $(\phi_c \phi_b \phi_a)$.
- ✚ On peut également noter que, dans le cas d'un défaut statorique sur l'une des trois phases, la plus petite valeur des décalages triphasés est généralement sur la phase où le défaut s'est produit. Avec cet indice, nous pouvons localiser la phase défectueuse.

3.6.2 Les données d'entrée d'entraînement simulées

Les données d'entrée sont collectées grâce à des simulations par MATLAB. Les données collectées ci-dessus seront utiles dans les chapitres suivants pour étudier les conditions de défaut entre spires. Pour atteindre la localisation de la phase défectueuse de la machine asynchrone les données d'entraînement doivent représenter la gamme des conditions de fonctionnement, qui contiennent toutes les occurrences de défaut possibles et même cas sains.

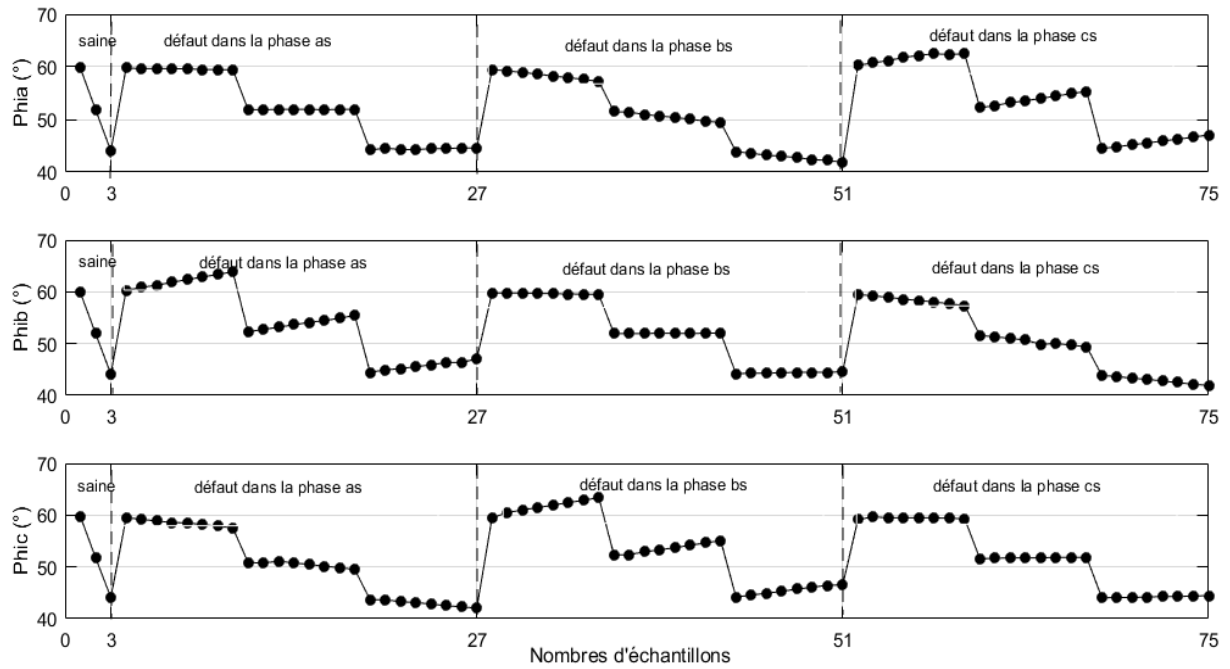


Figure 3.7. Ensemble de données d'entrée d'entraînement simulées.

À cet effet, l'ensemble de données d'entrée, qui sont illustré sur la figure (3.7), est composé d'une gamme de plusieurs exemples dans différentes conditions de fonctionnement de la MAS. Pour réaliser cette tâche on procède d'utiliser un algorithme comme suit :

- 3 échantillons sont utilisés pour un fonctionnement sain de la machine opérant pour divers valeur de couple de charge ($C_r = 2Nm$, $C_r = 2.8Nm$, $C_r = 3.8Nm$)
- 24 échantillons sont utilisés pour un fonctionnement défaut dans la phase a_s de la machine opérant pour divers valeur de couple de charge $C_r = 2Nm$, $C_r = 2.8Nm$ et $C_r = 3.8Nm$.
- 24 échantillons sont utilisés pour un fonctionnement défaut dans la phase b_s de la machine opérant pour divers valeur de couple de charge $C_r = 2Nm$, $C_r = 2.8Nm$ et $C_r = 3.8Nm$.
- 24 échantillons sont utilisés pour un fonctionnement défaut dans la phase c_s de la machine opérant pour divers valeur de couple de charge $C_r = 2Nm$, $C_r = 2.8Nm$ et $C_r = 3.8Nm$.

Tous ces exemples sont utilisés dans les chapitre représentent les différents cas de fonctionnement de la MAS suivants : sain (trois points) d'un nombre impaire de phase en court-circuit (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 et 15) sur chaque phase statorique [24 (8 × 3) points]. Ainsi, un total de 75 (24 × 3 + 3) échantillons d'apprentissage a été collectées et seront utiles dans le chapitre suivant pour étudier les conditions de défaut entre les spires du stator.

3.7 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter l'effet de défaut sur le déphasage entre la tension phase et le courant de ligne correspondants.

On a premièrement fait la simulation de la MAS en présence de défaut de court-circuit de 125 spires pour extraire les courants statoriques dans les trois phases (a_s, b_s ou c_s) qu'on a visualisé un déséquilibre au niveau d'amplitude et de déphasage.

Après qu'on prend le déphasage comme indicateur de défaut nous avons calculé les valeurs de passage par zéro (ZCT) pour un court-circuit entre 0 et 15 spires dans le domaine temporel et on les a transformés en valeurs angulaire afin de tracer les caractéristiques de déphasage en fonction de défaut.

Chapitre 4 Diagnostics des défauts de la MAS

par les réseaux de neurones

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exploiter les réseaux de neurones artificiels (RNA) pour diagnostiquer le court-circuit entre spires. On utilise ces derniers par rapport à d'autres techniques en raison de leur généralisation ce qui signifie qu'ils sont capables de fonctionner de manière satisfaisante même en cas de défaut de faible amplitude. Les réseaux de neurones peuvent effectuer des détections de défauts basées sur des mesures et un entraînement sans avoir besoin de modèles mathématiques complexes et rigoureux.

Pour la détection de nombreux défauts des informations redondantes sont disponibles et peuvent être utilisées pour obtenir des résultats précis. Ce concept peut être facilement implémenté dans un RNA en exploitant ses entrées parallèles et ses capacités de traitement pour améliorer la robustesse des performances du réseau.

Dans ce chapitre, l'application de différents paradigmes de réseaux de neurones (RNA) sont choisis tels que réseau neuronal perceptron multicouche pour la détection et la localisation des défauts de court-circuit de spires statoriques.

Les entrées des réseaux de neurone doivent être les indicateurs significatifs du défaut. Le meilleur choix de l'indicateur approprié de défaut est de trouver les paramètres qui fournissent la plupart d'information sur l'état du système.

Pour le diagnostic de défauts du stator de la MAS, la méthode présentée au chapitre 3 semble préférable par rapport à d'autres indicateurs. Nous avons donc utilisé les trois décalages entre les courants de ligne et les tensions de phase correspondantes comme entrées des réseaux de neurones.

4.2 Le neurone formel

Un neurone est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée, à valeurs bornées.

Les variables sur lesquelles opère le neurone sont habituellement désignées sous le terme d'entrée du neurone. La valeur de la fonction est désignée comme sortie.

Le neurone formel peut être représenté comme la figure (4.1) [20] :

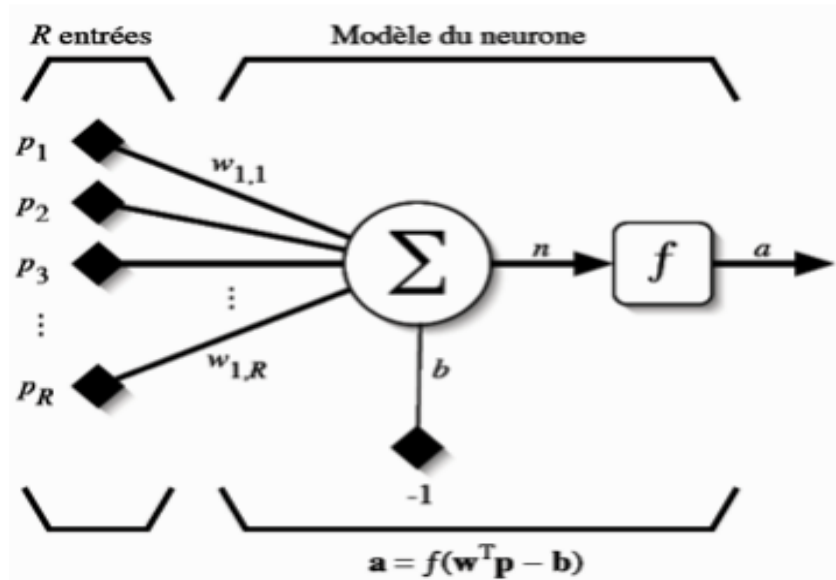


Figure 4.1. Modèle d'un neurone artificiel

4.2.1 Principe de fonctionnement

Chaque entrée est affectée d'un poids. Le passage des entrées dans le corps du neurone se fait en deux étapes. La première étape consiste à faire une somme pondérée des entrées par les poids respectifs des connexions sur lesquelles ces entrées se propagent. La seconde étape consiste à calculer l'image de cette somme pondérée par une fonction de transfert binaire. Le résultat obtenu provoque ou non le déclenchement d'un potentiel d'action suivant le dépassement d'un seuil, et sert à son tour d'entrée à d'autres neurones.

4.2.2 Modélisation générale

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel est illustré à la figure (4.1). Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat (n) de cette somme est ensuite transformé par une

fonction de transfert (f) qui produit la sortie (a) du neurone. En suivant les notations présentées à la section précédente, les (R) entrées du neurone correspondent au vecteur (p)

$$p = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_r]^T,$$

Alors que w représenté les poids synaptiques du neurone avec

$$w = [w_{1,1} \ w_{1,2} \ \dots \ w_{1,r}]^T,$$

La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum w_{i,j} p_j - b \tag{4.1}$$

$$= w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,r} p_r - b \tag{4.2}$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = w^T p - b \tag{4.3}$$

Cette sortie correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais b du neurone. Le résultat n de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone. Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil n , alors l'argument de f devient positif (ou nul), sinon il est négatif.

On peut faire un parallèle entre ce modèle mathématique et certaines informations que l'on connaît à propos du neurone biologique [20].

4.3 Application des RNA au diagnostic de la MAS

Les RNA sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. On distingue plusieurs applications de réseau de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des défauts de machines asynchrone: diagnostic de court-circuit, du déséquilibre des tensions, de l'usure de roulements, du défaut d'excentricité d'entrefer et de ruptures de barre de rotor [11].

Dans notre cas, les réseaux du neurone sont exploités pour diagnostiquer le court-circuit entre spires statoriques.

4.3.1 Choix des variables d'entrées

La condition fondamentale pour l'implémentation réussie d'une technique de diagnostic de défaut basée sur les RNA est d'avoir une base de données riche et appropriée, qui est placée en entrée pour chaque défaut. Les entrées des RNA doivent être les indicateurs significatifs du défaut. Le meilleur choix de l'indicateur approprié de défaut est de trouver les paramètres qui fournissent le plus d'information sur l'état du système.

Différents types d'indicateurs sont utilisés par les chercheurs pour la phase d'apprentissage du RNA à savoir : le décalage entre le courant et la tension, l'amplitude et la fréquence des raies de la densité spectrale de puissance des courants de Park i_{ds} et i_{qs} , le courant statorique et la vitesse de rotation, l'amplitude des harmoniques et le glissement.

Pour le diagnostic de l'ITSC d'une MAS, le décalage entre courant et tension correspondante est préférable aux autres. Nous allons donc utiliser le décalage entre les courants de ligne et les tensions de phase dans les trois phases (a_s, b_s, c_s) de la MAS comme entrées du RNA.

4.3.2 Choix d'architecture du réseau de neurones

Le réseau de neurones artificiel (RNA) est un ensemble de neurones formels associés en couches et fonctionnant en parallèle. Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse à la couche suivant. L'information donnée au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée à la couche de sortie, en passant soit par aucune, une ou plusieurs couches cachées. Il existe deux grandes catégories de structures dans la littérature :

- Les réseaux non bouclés (statique ou non récurrent)
- Les réseaux bouclés (dynamique ou récurrent)

Un perceptron (MLP) est un réseau de neurones artificiel du type *feedforward*, c'est-à-dire à propagation directe (non récurrent).

4.3.3 Apprentissage des réseaux de neurones

Après le choix d'indicateur et la structure de réseau, la troisième étape consiste une base de données d'apprentissage qui doit être assez représentative en qualité et en quantité des différents modes de fonctionnement de la machine.

On distingue deux types d'apprentissage : Un apprentissage « supervisé » et un apprentissage « Non supervisé ».

a L'apprentissage supervisé

L'apprentissage « supervisé » pour les RNA, consiste à calculer les poids synaptiques de telle manière que les sorties du réseau soient, pour les exemples utilisés lors de l'apprentissage, aussi proches que possibles des sorties "désirées". Ils peuvent être la classe d'appartenance de :

- La forme que l'on veut classer
- La valeur de la fonction que l'on veut approcher
- La sortie du processus que l'on veut modéliser
- La sortie souhaitée du processus à commander

On connaît donc, en tout point ou seulement en quelques points les valeurs que doit avoir la sortie du réseau en fonction des entrées correspondantes : C'est en ce sens que l'apprentissage est "supervisé"

b L'apprentissage non supervisé

Un réseau de neurones non bouclé peut être également utilisé dans un but de visualiser ou d'analyser des données : On dispose d'un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grande dimension et l'on cherche à les regrouper selon des critères de ressemblance qui sont inconnus à priori. Ce type de tâches est connu en statistique sous le nom de méthodes "d'agrégation". On peut utiliser les réseaux de neurones non bouclés pour réaliser une tâche assez voisine : A partir des données décrites par des vecteurs de grande dimension, on cherche à trouver une représentation de ces données dans un espace de dimension beaucoup plus faible (typiquement de dimension 2) tout en conservant les "proximités" ou "ressemblances" entre ces derniers. Il n'y a pas là, donc de "professeur", puisque c'est au réseau de

découvrir les ressemblances entre les éléments de la base de données, et de les traduire par une proximité dans la "carte" de dimension qu'il doit produire [21].

4.4 l'organigramme de détection de défaut

L'organigramme suivant présente l'évolution de diagnostic de la MAS afin de détecter la phase en cas de défaut ou en cas sain.

On extrait de la MAS les grandeurs courants et tensions statoriques en fonction de temps puis on calcule chaque passage par zéro par la méthode de ZCT qui nous a permis d'avoir des décalages temporels, ces derniers on les transforme au décalages angulaires qui vont être utiles pour la base de données de RNA, le RNA fait son traitement afin détecter et localiser la phase saine et la phase en défaut .

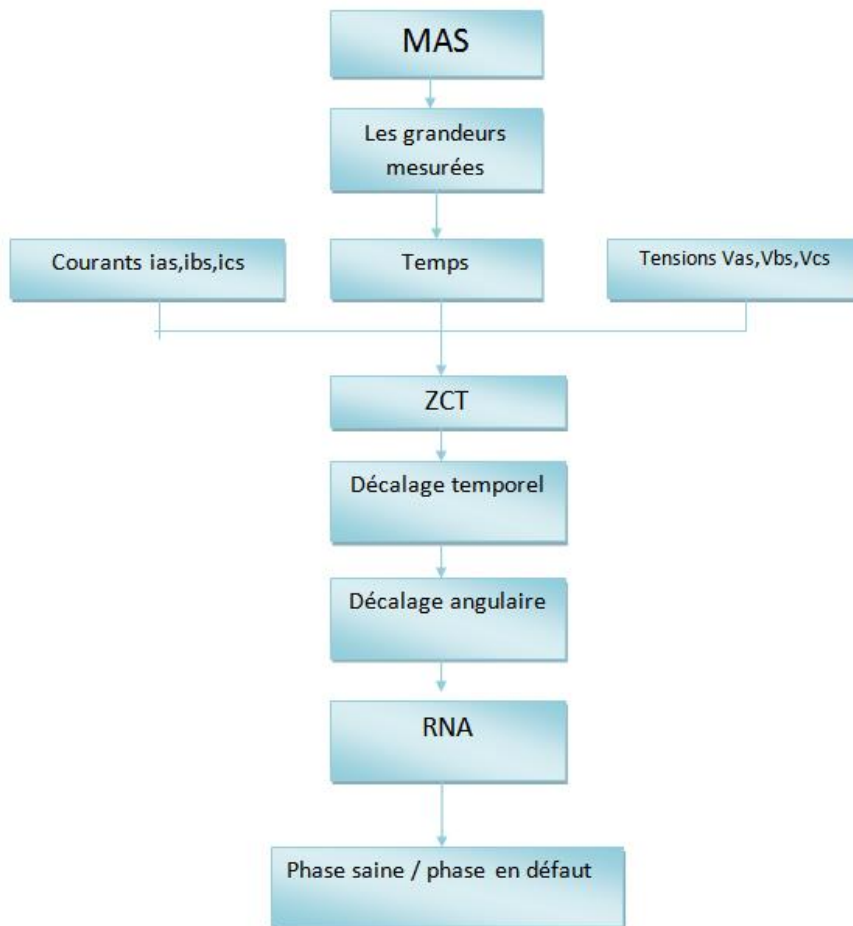


Figure 4.2. Organigramme de détection de défaut par le RNA

4.5 L'approche RNA pour le diagnostic de la MAS

La figure (4.3) montre le schéma de principe de la procédure de détection et localisation des défauts ITSC d'une machine asynchrone.

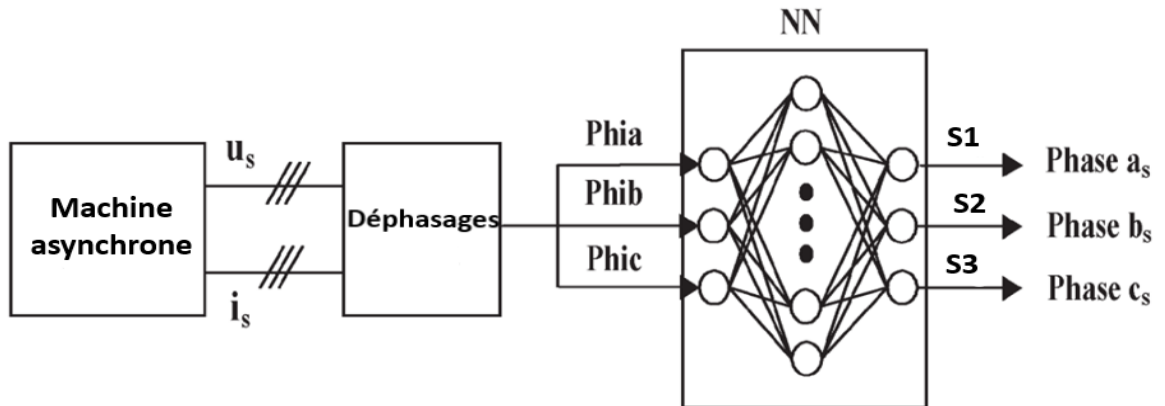


Figure 4.3. Schéma fonctionnel de la procédure de localisation des défauts.

4.5.1 Préparation d'un ensemble de données adaptées aux RNA

Nous avons constitué un ensemble de données d'apprentissage afin d'entraîner le réseau. La base de données est constituée des courants et tensions statoriques, obtenues pour différentes situations de fonctionnement de la MAS, à savoir, différents niveaux de défauts ITSC et différentes conditions de charge ; déjà présentés dans le chapitre 3.

Les sorties souhaitées (S_i) fournies par le RNA sont définies comme ci-dessous :

- $S1 = 1$ pour un court-circuit en phase a_s ; sinon, $S1 = 0$
- $S2 = 1$ pour un court-circuit en phase b_s ; sinon, $S2 = 0$
- $S3 = 1$ pour un court-circuit en phase c_s ; sinon, $S3 = 0$

Par conséquent, les états de sortie du RNA sont définis comme suit :

- [0; 0; 0] Pas de défaut (état sain)
- [1; 0; 0] Défaut survenu à la phase a_s
- [0; 1; 0] Défaut survenu à la phase b_s
- [0; 0; 1] Défaut survenu à la phase c_s

4.5.2 Le modèle d'architecture RNA

Les meilleures performances d'apprentissage sont obtenues à travers un bon choix de la structure du réseau de neurones. Après plusieurs tests d'apprentissage, le réseau que nous avons créé pour notre système est de type MLP et est caractérisée par l'architecture suivante :

- une couche d'entrée ($phia$, $phib$ et $phic$),
- une couche de sortie (défaut dans la phase a_s , b_s et c_s), composée d'un neurone et dont la fonction de transfert est de type linéaire, pour la décision.
- trois couches cachées. La première est composée de cinq neurones dont la fonction de transfert est de type tangente hyperbolique. La seconde couche est composée de sept neurones et la troisième est composée de six neurones dont la fonction de transfert est de type sigmoïde. et de type linéaire pour le neurone de la couche de sortie.

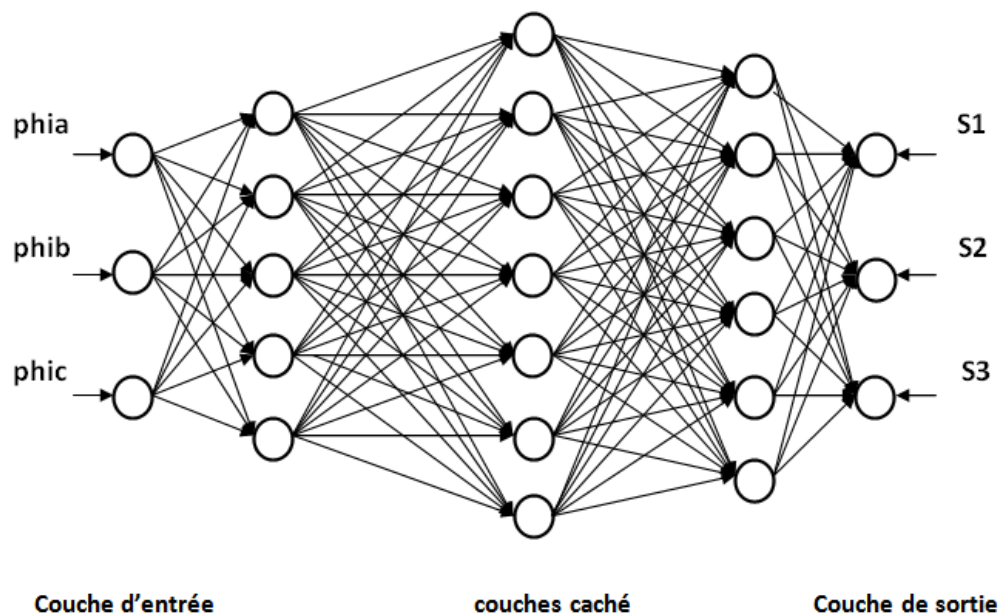


Figure 4.4. Schéma de RN dédié au diagnostic de défaut de court-circuit.

4.5.3 Résultats d'apprentissage

Nous avons évalués les performances d'apprentissage du réseau de neurones par l'erreur quadratique moyenne « Mean Square Error » (MSE). Le RNA atteint une valeur faible de 8.6027×10^{-15} au bout de 7000 itérations qui est illustré dans la figure (4.5). Le réseau a localisé la phase en défaut avec une bonne précision.

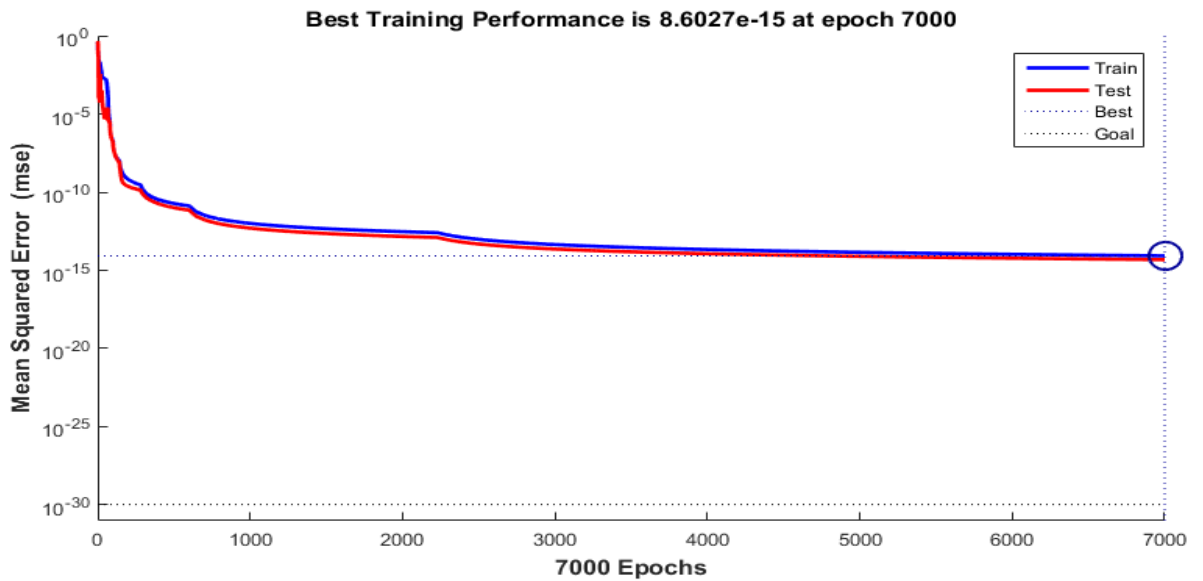


Figure 4.5. Performance du RNA proposé.

On a obtenus, d'après la fenêtre Régression qui se trouve dans « nntstraintool », un bon apprentissage qui est droit dans le but $R=1$. Par conséquent, le réseau est capable de localiser correctement le défaut de court-circuit entre spires comme le montre la figure (4.6).

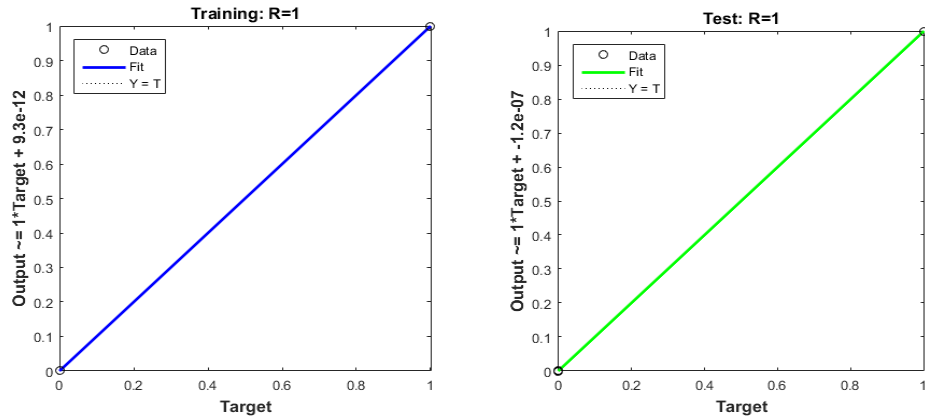


Figure 4.6. Approximation de fonction training et test.

4.5.4 Résultat d'apprentissage des sorties et les erreurs de RNA

Après le succès de la phase d'apprentissage du RNA proposé, on aborde la phase de test. Le RNA a détecté la présence de défaut dans chaque phase. Les figures (4.7) à (4.12) illustrent ce résultat. A S1 correspond le défaut dans la phase a_s , à S2 correspond le défaut dans la phase b_s et S3 celui dans la phase c_s . Puis on a utilisé un histogramme de l'erreur pour indiquer l'erreur de chaque sortie du réseau.

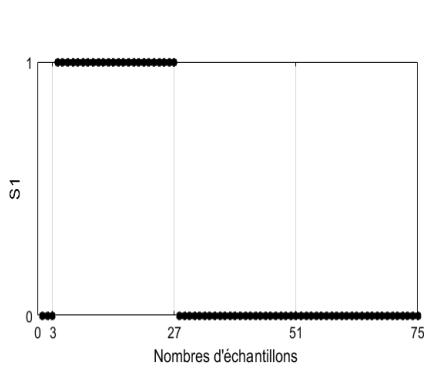


Figure 4.7. la sortie pour un défaut sur la phase a_s

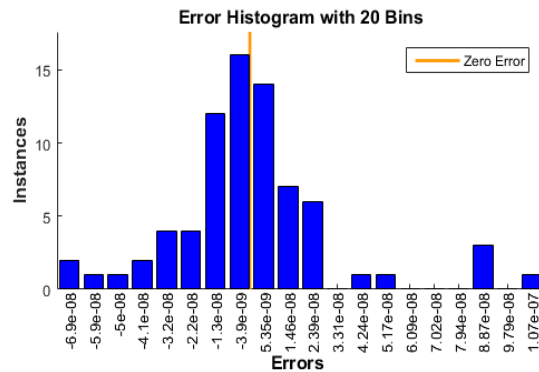


Figure 4.8. L'erreur de sortie ITSC sur la phase a_s

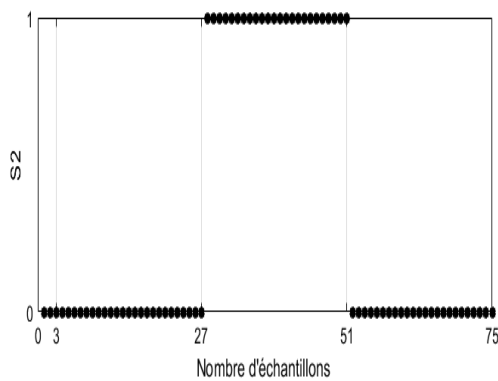


Figure 4.9. La sortie pour un défaut sur la phase bs

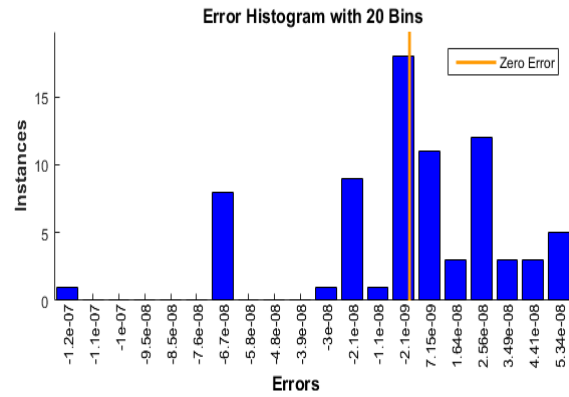


Figure 4.10. L'erreur de sortie ITSC sur la phase bs

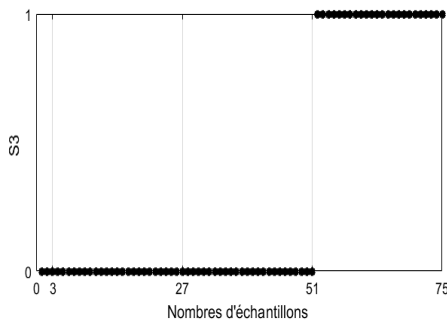


Figure 4.11. La sortie pour un défaut sur la phase cs

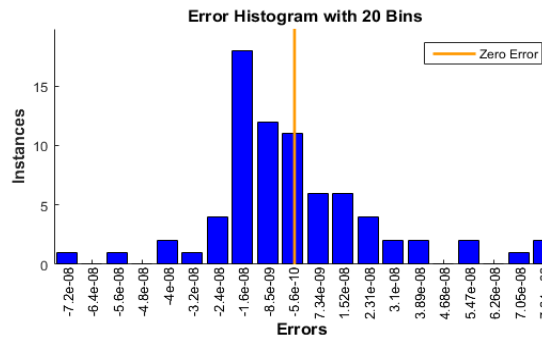


Figure 4.12. L'erreur de sortie ITSC sur la phase cs

D'après les résultats obtenus dans les figures (4.7) à (7.12) on peut interpréter que :

- Les figures (4.7) et (4.8) montrent la sortie et l'erreur du réseau en cas de défaut de court-circuit qui se produit sur la phase a_s de la MAS. La figure (4.7) décrit que la sortie du réseau est une valeur binaire (soit 0 soit 1 pour une phase saine et une phase en défaut respectivement). Si le défaut se produit sur la phase a_s , alors la sortie $S1$ correspond à la valeur binaire 1 et les autres sorties sont nulles. D'après la figure (4.7), il est clair que le réseau a bien appris les données d'entrée. Par conséquent, l'erreur qui est la différence entre la valeur cible et la sortie réelle est -3.9×10^{-9} qui est illustré sur la figure (4.8).

- ✚ Les figures (4.9) et (4.10) montrent la sortie et l'erreur du réseau en cas de défaut de court-circuit qui se produit sur la phase b_s de la MAS. La figure (4.9) décrit que la sortie du réseau est une valeur binaire (soit 0 soit 1 pour une phase saine et une phase en défaut respectivement). Si le défaut se produit sur la phase b_s , alors la sortie S2 correspond à la valeur binaire 1 et les autres sorties sont nulles. D'après la figure (4.9), il est clair que le réseau a bien appris les données d'entrée. Par conséquent, l'erreur qui est la différence entre la valeur cible et la sortie réelle est -2.1×10^{-9} qui est illustré sur la figure (4.10).
- ✚ Les figures (4.11) et (4.12) montrent la sortie et l'erreur du réseau en cas de défaut de court-circuit qui se produit sur la phase c_s de la MAS. La figure (4.11) décrit que la sortie du réseau est une valeur binaire (soit 0 soit 1 pour une phase saine et une phase en défaut respectivement). Si le défaut se produit sur la phase c_s , alors la sortie S3 correspond à la valeur binaire 1 et les autres sorties sont nulles. D'après la figure (4.11), il est clair que le réseau a bien appris les données d'entrée. Par conséquent, l'erreur qui est la différence entre la valeur cible et la sortie réelle est -5.6×10^{-10} qui est illustré sur la figure (4.12).

4.6 Conclusion

Nous avons analysé dans l'environnement nntool/MATALAB le diagnostic de la MAS par les réseaux de neurones. Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre le principe de fonctionnement d'un neurone formel ainsi que son modèle mathématique. Ensuite, on a appliqué les RNA pour diagnostiquer les défauts ITSC de la MAS. Nous avons constitué la base de données, pour l'apprentissage et le test du RNA, avec les résultats obtenus dans le chapitre trois. Le RNA proposé est de type MLP {1, 3, 1} c'est-à-dire constitué d'une couche d'entrée, une couche de sortie et 3 couches cachées. Les résultats fournis par le RNA sont dans l'ensemble satisfaisants.

Conclusion générale

Le travail mené dans ce mémoire a été consacré au diagnostic des défauts de la machine asynchrone en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle basée sur les RNA. Le type de défauts considéré au cours de cette étude est le court-circuit entre spires statoriques.

En général, le bon fonctionnement d'une telle approche de diagnostic nécessite une bonne connaissance du système. Cette connaissance se traduit par la disponibilité d'une base de données importante et significative. Ainsi pour mener cette étude, un modèle de simulation de machine asynchrone à l'état sain et tenant compte des défauts statoriques est utilisé.

En effet, l'examen des résultats d'une analyse de l'impact de chaque défaut sur les variables de la machine a permis de choisir les variables qui indiquent au mieux l'apparition de défauts au sein de la machine.

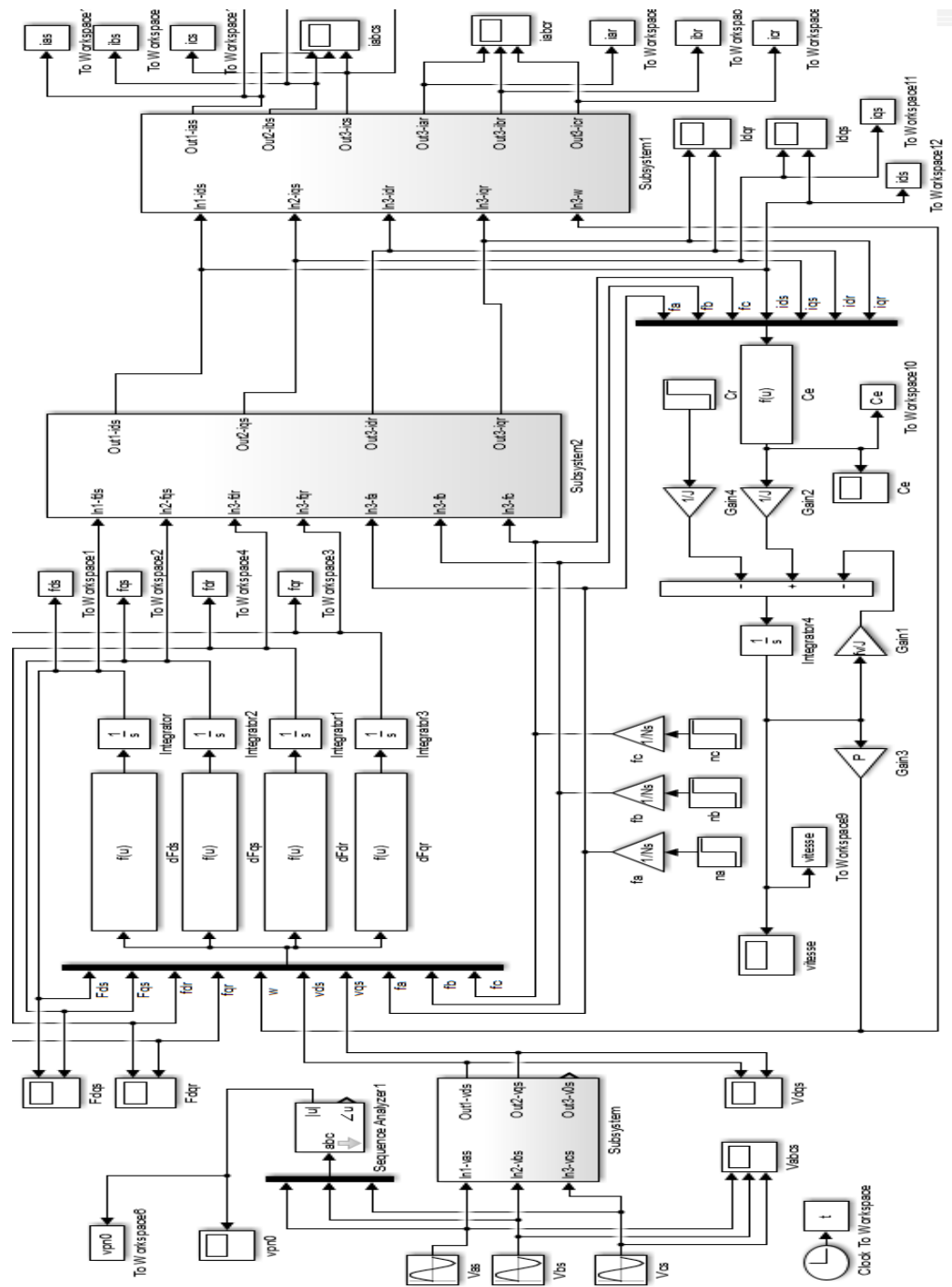
Le choix de l'analyse du courant statorique de la machine comme étant une variable sur laquelle on se base, pour extraire un indicateur efficace du défaut de court-circuit qui est le décalage entre le courant de ligne et la tension de phase correspondante. Pour mettre en œuvre le diagnostic de la MAS, une approche par les réseaux neurones est adoptée. Les résultats ont montré que l'apprentissage des RNA a permis au système de diagnostic des défaut statorique de détecter les phase défectueuse avec une bonne précision.

Grâce aux résultats obtenus, on peut conclure que l'exploitation des indicateurs des défauts a permis d'élaborer un système de surveillance automatique à base de RNA.

Les paramètres de la machine asynchrone

Tension maximal (V)	220 $\sqrt{2}$
Courant nominal (A)	1.6
Nombre de spires par phase	528
Nombre de paires de pole	2
Moment d'inertie	0.00177007
Coefficient visqueux	0.0006437777
Résistance statorique (Ω)	13.6324
Résistance rotorique (Ω)	13.3072
Résistance de défaut (Ω)	1.3
Fréquence (Hz)	50
Inductance mutuelle (H)	0.6380
Inductance de fuit statorique (H)	0.0388
Inductance de fuit rotorique (H)	0.0388

Digramme MATLAB/Simulink utilisé pour la simulation de la machine asynchrone



Bibliographie

- [1] CHAHMI Abdelghani : 'Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic', thèse de doctorat en machine électrique, université de science et technologie d'Oran, 2017.
- [2] KECHIDA Ridha : 'Contrôle et diagnostic d'une machine à induction sans capteur en utilisant des techniques avancées d'analyse et de traitement', thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2017.
- [3] Laib Kenza : 'Diagnostic des machines asynchrones par utilisation des capteurs de courant (MCSA)', mémoire de master en instrumentation, Université de Bejaïa-2017.
- [4] Olivier ONDEL : 'DIAGNOSTIC PAR RECONNAISSANCE DES FORMES : APPLICATION A UN ENSEMBLE CONVERTISSEUR, MACHINE ASYNCHRONE', thèse de doctorat en génie électrique, L'ÉCOLE DOCTORALE ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE DE LYON, 2006.
- [5] A.Ibrahim : 'contribution au diagnostic de machine électromécanique : Exploitation des signaux électrique et de la vitesse instantanée', thèse de doctorat en génie électrique, Université de Saint Etienne, 2009.
- [6] G.Didier : 'modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillance', thèse de doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2004.

- [7] HALEM Noura : 'Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis', thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2015.
- [8] BESSOUS Noureddine : 'Contribution au Diagnostic des Défauts dans les Machines Asynchrone: Comparaison entre l'analyse vibratoire et l'analyse de courant d'alimentation', thèse de doctorat en électrotechnique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2017.
- [9] Omar DJEBILI : 'Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécanique tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement', thèse de doctorat en génie mécanique, Université de REIMS CHAMPAGNE ARDENNE, 2013.
- [10] ANDRIAN CEBAN : 'Méthode globale de diagnostic des machines électriques-thèse de doctorat génie électrique', Université Lille de Nord de France, Ecole doctorale SPI, 2012.
- [11] BESSAM Besma : 'Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes', thèse de doctorat Automatique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2016.
- [12] BELHAMDI Saad : 'Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par des différentes techniques de commande', thèse de doctorat électrotechnique- Université Mohamed Khider de Biskra, 2014.
- [13] Tarek AMEID : 'Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction', thèse de doctorat génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [14] Babak VASEGHI : 'Contribution à l'étude des machines électrique en présence de défaut entre spires. Modélisation réduction du courant de défaut', thèse de doctorat en génie électrique, Institut Nationale De L I.N.P.L, 2009.
- [15] SAHRAOUI Mohamed : 'Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones', thèse de doctorat électromécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2010.
- [16] MAKARA KHOV : 'Surveillance et diagnostic des machines asynchrones à aimants permanents : Détection des courts circuits par suivi paramétrique', thèse de doctorat systèmes automatique, Université de Toulouse, France, 2009.

- [17] SAID WATIK et LAMRI CHAHINEZ : 'Modélisation de la machine asynchrone asymétrique et en présence de défauts', Mémoire de Master Machine Electrique - Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2019.
- [18] Vanya Lgnatova : 'méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique application creu de tension et à la pollution harmonique', thèse de doctorat énergie électrique', université de Joseph Fourier, France, 2006.
- [19] Fang Duan : 'problems in industrial induction motors', Mémoire de Master télécommunication, université Adelaide, Australie, 2010.
- [20] Kifouch Abdelssalem et Amariche Idriss : 'Modélisation de la machine asynchrone par réseau de neurones artificiels', Mémoire d'ingénieur d'état en électronique, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2008.
- [21] Chamekhn Abdessalem : 'Optimisation des procédés de mise en forme par les réseaux de neurones artificiels', thèse de doctorat en génie mécanique, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie, 2007.

