

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université

Amar Thelidji de Laghouat



Faculté de Technologie Département

d'Electrotechnique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Présenté par

Kharbache ElHoucine

Makrane zakaria

THEME

⋮
**Diagnostic des défauts des machines asynchrones par emploi de
l'intelligence artificielle**

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr. Ameer Aissa

Pr

Président

Mr. Rogti Fatiha

Pr

Examinatrice

Mr. Bessedik Sid Ahmed

Pr

Rapporteur

« Année Universitaire 2021 / 2022 »

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, le bon DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Tout d'abord, nous tenons ainsi à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à **Mr Bessedik Sid Ahmed** pour les conseils précieux, les orientations, et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nous remercions également les membres de jury **Mr Ameur Aissa** et **Ms Rogti Fatiha** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté de technologie de l'université de Laghouat, qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Nous voudrions associer à nos remerciements toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail. A ce jeu, il est impossible de ne pas oublier des noms. On voudrait présenter d'avance nos excuses à ceux qui pourraient alors subir les affres de l'oubli.

Enfin, nous tiens remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre projet final et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les
Sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa
Présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression
De mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de
Sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en
Sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le
Soutient permanent venu de toi.

À Mes professeurs de département d'électrotechnique qui doivent voir dans ce
Travail la fierté d'un savoir bien acquis.

À toute ma famille,
À tous mes amis (es) et collègues,
À tous ceux qui me sont chers et proches,
À tous ceux qui ont semé en moi à tout point de vue,
À tous ceux que j'aime.

Makrane zakaria

Kharbache Elhoucine

ملخص

على الرغم من موثوقية الآلة غير المتزامنة (MAS) وقوتها ، فإنها تخضع على حساب تشغيلها لعدد معين من القيود ذات الطبيعة المختلفة (الكهربائية والميكانيكية والبيئية) ، وهذا الأخير يتسبب في حالات فشل يمكن أن تؤدي إلى توقفات غير مجدولة. للتغلب على هذه المشكلة ، تم اقتراح مجموعة متنوعة من تقنيات الصيانة التنبؤية كوسيلة للمراقبة من أجل اكتشاف الأخطاء التي تؤثر على الآلات غير المتزامنة. الهدف من هذا العمل هو توفير نهج فعال قائم على الذكاء الاصطناعي قادر على اكتشاف أخطاء الجزء الثابت والدوار في الآلات غير المتزامنة ذات القفص السنجابي.

الكلمات المفتاحية: الآلة غير المتزامنة، العيوب ، الذكاء الصناعي

Résumé

Malgré la fiabilité de la machine asynchrone (MAS) et sa robustesse, elle subit au cout de son fonctionnement, un certain nombre de contraintes de différents nature (électrique, mécanique et environnement), ces dernières induisent des défaillances qui peuvent conduire à des arrêts non programmés. Pour surmonter ce problème, une variété de techniques de maintenance prédictive comme moyen de surveillance ont été proposées afin d'arriver à détecter les défauts affectant les machines asynchrones. Le but de ce travail est d'offrir une approche basée sur l'intelligence artificielle efficace et capable de détecter les défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones à cage d'écureuil.

Mots clés : machines asynchrones, Défauts, l'intelligence artificielle

Abstract

Despite the reliability of the asynchronous machine (MAS) and its robustness, it undergoes at the cost of its operation, a certain number of constraints of different nature (electrical, mechanical and environment), the latter induce failures which can lead to unscheduled stops. To overcome this problem, a variety of predictive maintenance techniques as a means of monitoring have been proposed in order to detect faults affecting asynchronous machines. The aim of this work is to provide an effective artificial intelligence-based approach capable of detecting stator and rotor faults in squirrel-cage asynchronous machines.

Keywords: asynchronous machines, faults, artificial intelligence

Liste Des Symboles Et Des Abréviations

LISTE DES SYMBOLES

Symboles liés à la machine asynchrone

u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	Tensions statoriques suivant les axes as , bs et cs
u_{dq}	Composantes d et q des tensions statoriques
$\underline{u}_{\alpha\beta_s}$	Composantes α et β des tensions statoriques
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques suivant les axes as , bs et cs
i_{dq}	Composantes d et q des courants statoriques
i_{dqm}	Composantes d et q du courant magnétisant
i_{dqcc}	Composantes d et q du courant de court-circuit dans les spires Court-circuitées
$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$	Flux statoriques suivant les axes as , bs et cs
$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$	Flux rotoriques suivant les axes as , bs et cs
ϕ_{dq}	Composantes d et q du flux statorique
ϕ_{dqr}	Composantes d et q du flux rotorique
$\underline{\Phi}_{\alpha\beta_m}$	Composantes α et β du flux magnétisant
$\underline{\Phi}_{\alpha\beta_f}$	Composantes α et β du flux de fuite statorique
R_s	résistance statorique
R_r	résistance rotorique
L_{sp}	inductance propre d'une phase statorique
L_{rp}	inductance propre rotorique
L_s	inductance cyclique statorique
L_r	inductance cyclique rotorique
L_m	inductance mutuelle cyclique stator-rotor
L_f	inductance de fuite
L_{cc}	inductance propre de la bobine de court-circuit B_{cc}
M_s	inductance mutuelle entre deux phases du stator

Liste des symboles et des abréviations

M_r	inductance mutuelle entre deux phases du rotor
N_b	nombre total de barres au rotor
N_{bc}	nombre de barres cassées au rotor
N_{cc}	nombre de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
N_s	nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut
μ_{cck}	pourcentage de spires en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
η_0	pourcentage de barres cassées
θ_{cck}	angle de repère du bobinage en court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
θ_r	angle électrique de la position du rotor
$Q(\theta_{cc})$	matrice donnant l'angle du bobinage en court-circuit
Q_{ccl}	quadripôle représentant un défaut de court-circuit de la $k^{\text{ième}}$ phase
p	nombre de paires de pôles
ω	vitesse angulaire électrique du rotor
Ω	vitesse de l'arbre moteur, égale à ω/p
ω_a	vitesse angulaire du repère de référence
g	glissement de la machine
C_{em}	couple électromagnétique
C_r	couple résistif
f_v	coefficient de frottement visqueux
J	moment d'inertie

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviations liées à la machine asynchrone

MAS	Machine asynchrone
Fem	Force électromotrice
TF	Transformé de Fourier
IA	Intelligence Artificielle
RDF	Reconnaissance De Formes
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion

Liste Des Figures

Figures	Chapitre I	pages
I.01	Eléments de constitution d'une machine asynchrone	04
I.02	Stator d'une machine asynchrone	05
I.03	Rotor à cage	06
I.04	Rotor bobiné	06
I.05	Vue éclatée d'un roulement à billes	07
I.06	Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	08
I.07	Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage	09
I.08	Répartition des pannes des machines de faibles et moyennes puissances	09
I.09	Répartition des pannes des machines de fortes puissances	10
I.10	Différents types de défauts statorique	10
I.11	Défaut de Court-circuit entre spires	12
I.12	Defaut deux barres cassées	14
I.13	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil; rupture d'anneau de court-circuit	14
I.14	L'excentricité statique et dynamique	15
I.15	L'excentricité mixte	16
I.16	Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement billes	16
I.17	Méthodes de diagnostic des machines électriques.	17
I.18	les methods de connaissance	18
I.19	Schéma de principe de la méthode par l'analyse de signaux	21
I.20	Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement billes	21
I.21	Le capteur d'émission acoustique de type WD	22
Figures	Chapitre II	
II.01	Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor	27
II.02	Principe de la transformation de Park	29
II.03	Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor	32
II.04	Modélisation de la machine asynchrone sous Matlab/Simulink	34
II.05	Courbe des courants	36

Liste des Figures

II.06	Courbe de couple	37
II.07	Courbe de vitesse	38
II.08	Court-circuit de spires sur la phase b_s du stator	39
II.09	Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator	42
II.10	Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques	43
II.11	Modèle Matlab/Simulink de la machine avec défaut statorique	46
II.12	Courbe des courants avec défaut statorique	47
II.13	Courbe de couple avec défaut statorique	48
II.14	Courbe de vitesse avec défaut statorique	49
II.15	Modélisation par dipôles élémentaires du rotor en défaut	50
II.16	Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone dans le repère de Park	52
II.17	Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone	53
II.18	Modèle Matlab/Simulink de la machine avec défaut rotorique	55
II.19	Courbe des courants avec défaut rotorique	56
II.20	Courbe de couple avec défaut rotorique	57
II.21	courbe de vitesse avec défaut rotorique	58
II.22	Modèle de défauts mixte stator/rotor de la machine asynchrone	59
II.23	Schéma bloc de moteur avec défaut mixte	61
II.24	Courbe des courants avec défaut mixte	62
II.25	Courbe de couple avec défaut mixte.	63
II.26	Courbe de vitesse avec défaut mixte.	63
Figures	Chapitre III	
III.01	Résultat de simulation de courant en régime transitoire et permanent du moteur sain en charge ($C_r=5Nm$)	66
III.02	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court- circuit de 5 spires et son zoom.	67
III.03	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court- circuit de 18 spires et son zoom	68

Liste des Figures

III.04	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court- circuit de 25 spires et son zoom.	69
III.05	Résultat de simulation du courant rotorique en régime transitoire et permanent Avec 2 barres cassées et son zoom	70
III.06	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 5 spires et 2 barres cassees et son zoom	71
III.07	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 18 spires et 2 barres cassees et son zoom.	72
III.08	Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 25 spires et 2 barres cassees et son zoom	73
III.09	Synoptique du système de diagnostic de défauts électriques par réseaux de neurones	74
III.10	Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble d'apprentissage	75
III.11	Variation de degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble de teste	76
III.12	Vatiation de l'erreur absolue (test)	77
Figures	Annexe	
IV.01	Représentation d'un neurone artificiel.	78
IV.02	Définition des couches d'un réseau multicouche	79
IV.03	Réseau à connexions locales	79
IV.04	Réseau à connexions récurrentes	80
IV.05	Réseau à connexions complète	80
IV.06	Modèle de reseau neurone	81

Table des Matière

Table des Matière

Introduction générale

Chapitre I : Etat De l'art des différentes Technique de diagnostic

I.1 Introduction :	3
I.2 Constitution de la machine asynchrone :	4
I.2.1 Le stator :	5
I.2.2 Le rotor:	5
I.2.3 Les organes mécaniques	7
I.3 Les défaillances des machines asynchrones.	8
I.3.1Défaillances au stator :	10
I.3.2Défaillances au rotor.....	13
I.3.3Défaillances mécaniques	16
I.4 Les Différentes méthodes de diagnostics des machines électriques	17
I.4.1 Les méthodes de connaissances.....	18
I.4.2 Les méthodes de redondances analytiques	19
I.4.3 Les méthodes par l'analyse de signaux	20
I.5 Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation de la machine Asynchrone

II.1	Introduction :	22
II.2	Modélisation du fonctionnement de la machine saine :	26
II.2.1	Hypothèses de départ :	26
II.2.2	Schéma d'un moteur asynchrone triphasé :	26
II.2.3	Equations électriques de la machine asynchrone :	27
II.2.4	Transformation biphasée de Park :	29
II.2.5	Modèle de la machine dans le repère de Park :	30
II.2.6	Simulation de la machine saine	33
II.2.7	Résultats de simulation en fonctionnement saine :	35
II.3	Modèle de défauts statoriques :	38
II.3.1	Modélisation du défaut stator dans le repère de Park :	38
II.3.2	Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator :	40
II.3.3	Généralisation du modèle de défaut statorique :	42
II.3.4	Simulation du modèle de défaut statorique :	44
II.3.5	Résultats de simulation du modèle de défaut statorique :	47
II.3.6	Modèle de défauts rotoriques :	49
II.4	Modélisation du rotor en défaut :	50
II.4.1	Modélisation du défaut de rupture des barres :	51
II.4.2	Schéma électrique équivalent :	52
II.4.3	simulation du modèle de défauts rotoriques :	54
II.4.4	Résultats de simulation du modèle de défauts rotoriques :	55
II.5	Modèle de défaut simultané stator/rotor :	58
II.5.1	Modèle global de la machine asynchrone en défaut stator/rotor :	58
II.5.2	Simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor	60
II.5.3	Résultats de simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor :	61
II.6	Conclusion :	64

Chapitre III: Application de l'approche réseau de neurones au diagnostic de la MAS

III.1	Introduction :	65
III.2	Détection des défauts par le réseau de neurones:	65
	III.2.1 Extraction de signatures de défauts.....	65
	III.2.2 Construction de la base d'apprentissage et de test.....	74
III.3	Resultants de simulation:	75
III.4	Conclusion :	77

Conclusion generale	84
----------------------------	-----------

Références bibliographique

Introduction générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus consulté dans le milieu industriel. La demande de ce type des machines est due sa robustesse mécanique, sa simplicité de construction et son faible coût d'achat. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de façon anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

La surveillance d'un dispositif implique le diagnostic des défauts : il consiste en la détection d'un changement anormal dans le comportement ou l'état d'un système et dans la localisation de sa cause. Le but est de garantir la sécurité et la continuité de service et d'enregistrer les événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience.

Les systèmes de surveillance permettront de fournir des informations sur le fonctionnement de la machine aux opérateurs qui l'exploitent. Ils sont capable aussi de provoquer dans les cas graves un arrêt de la machine ou de permettre au système de productions de continuer de fonctionner en mode dégradé en cas de problème ne nécessitent pas un arrêt immédiat.

Ce travail s'inscrit dans le domaine du diagnostic des défauts électriques de la machine asynchrone à cage en utilisant une technique intelligente à base des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre présentera la construction de la machine asynchrone et les différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines électriques ainsi que les méthodes de diagnostic des défauts. Ce mémoire est organisé en quatre chapitres complémentaires : Le premier chapitre présente construction de la machine asynchrone et les différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines électriques ainsi que les méthodes de surveillance d'apparition de ces défauts.

- Le deuxième chapitre exposera la modélisation de la machine asynchrone en fonctionnement sain et défectueux : défaut statorique du type court-circuit entre spires et défaut de rupture de barres rotorique, et les résultats de simulation.
- Dans le troisième chapitre discutera l'application d'une approche de surveillance intelligente basée sur les réseaux RNA pour diagnostiquer et analyser l'état de la machine asynchrone.

Une conclusion générale donnera une synthèse du travail réalisé et récapitulera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées. [1].

Chapitre I :

**Etat de l'art de différentes techniques de
diagnostic.**

Chapitre 1

Etat de l'art de différentes techniques de diagnostic.

Sommaire:

I.1 Introduction :	3
I.2 Constitution de la machine asynchrone :	4
I.2.1 Le stator :	5
I.2.2 Le rotor:	5
I.2.3 Les organes mécaniques	7
I.3 Les défaillances des machines asynchrones.	8
I.3.1Défaillances au stator :	10
I.3.2Défaillances au rotor.....	13
I.3.3Défaillances mécaniques	16
I.4 Les Différentes méthodes de diagnostiques des machines électriques	17
I.4.1 Les méthodes de connaissances.....	18
I.4.2 Les méthodes de redondances analytiques	19
I.4.3 Les méthodes par l'analyse de signaux	20
I.5 Conclusion	24

I.1 Introduction :

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

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [2-3].

Il existe plusieurs procédures de diagnostic. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, aussi à sa complexité. Ainsi deux principales familles de procédures sont utilisées dans le domaine du diagnostic en génie électrique à savoir les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori et sans connaissance a priori.

Ce chapitre est organisé en trois sections principales présentant :

- La constitution des machines asynchrones,
- Les différents types de défauts pouvant survenir,
- Les techniques de diagnostic des machines électriques.

I.2 Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- le stator (partie fixe) constitué de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- le rotor (partie tournante) constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

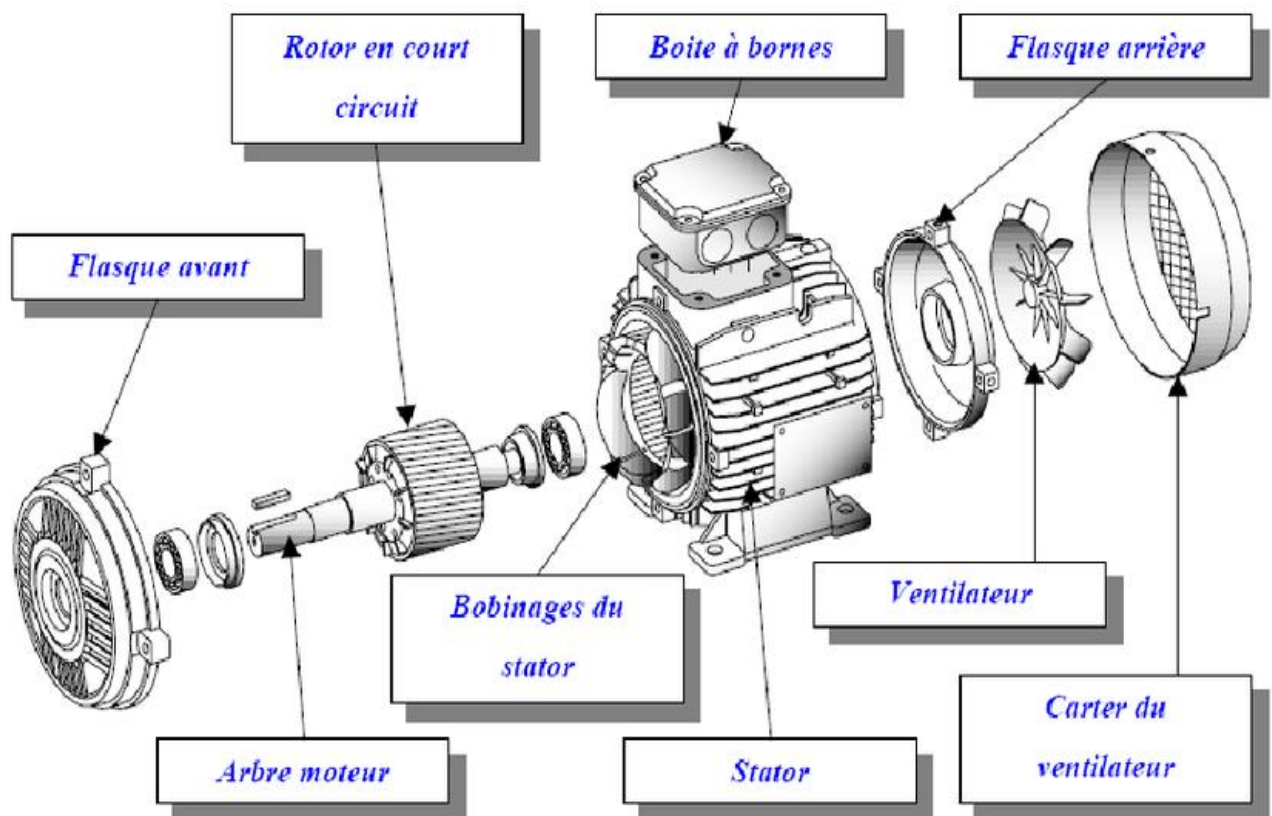


Figure I.01. Eléments de constitution d'une machine asynchrone.

I.2.1 Le stator :

Partie fixe comprenant trois enroulements identiques répartis sur un circuit magnétique feuilleté (tôle en acier au silicium pour diminuer les pertes par hystérésis et par courant de Foucault, en général ces tôles sont isolées par oxydation ou par un vernis isolant). Les enroulements sont constitués de conducteurs logés dans des encoches du circuit magnétique. Ces enroulements seront alimentés par le réseau via la plaque à bornes.

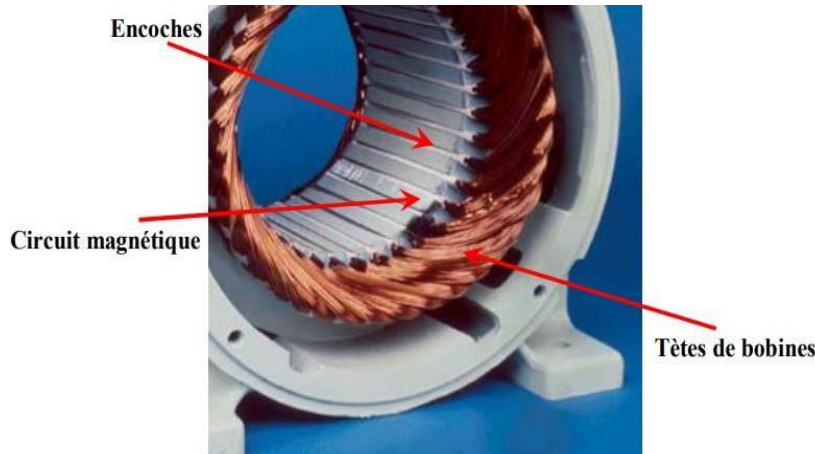


Figure I.02: Stator d'une machine asynchrone

I.2.2 Le rotor:

Secondaire, où est la partie mobile autour de l'axe de symétrie de la machine, qui peut être soit bobiné (fermé sur lui-même), soit à cage d'écureuil. Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'une barre rotorique à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor. Elles sont réalisées, généralement, de l'alliage de l'aluminium ou du cuivre. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Le moteur à cage d'écureuil est plus simple à construire que son homologue à rotor bobiné et, de plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service [4].

I.2.2.1 rotor à cage (d'écureuil):

L'ensemble à l'aspect d'une cage cylindrique dont à chaque bout une couronne métallique est raccordée dans laquelle se trouve un empilement de tôles dont l'axe du moteur passe au centre [5].



Figure I.03: Rotor à cage.

I.2.2.2 rotor bobiné :

Comme pour le rotor à cage il est constitué de tôles empilées, mais des encoches sont pratiquées pour le passage du bobinage qui lui même est raccordé en une extrémité en bout d'arbre sur des bagues l'autre extrémité du bobinage est connecté ensemble (point milieu du couplage étoile). Sur les bagues viennent frotter les balais (aussi appelé les collecteurs) qui sont raccordés au dispositif de démarrage (résistance) [5].



Figure I.04: Rotor bobiné

I.2.3 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion, des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, et des efforts de torsion. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques.

Les roulements à billes se composent généralement de deux bagues, une intérieure et l'autre extérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de roulements tournants (figure I.05). Ces roulements sont insérés à chaud sur l'arbre, Permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage

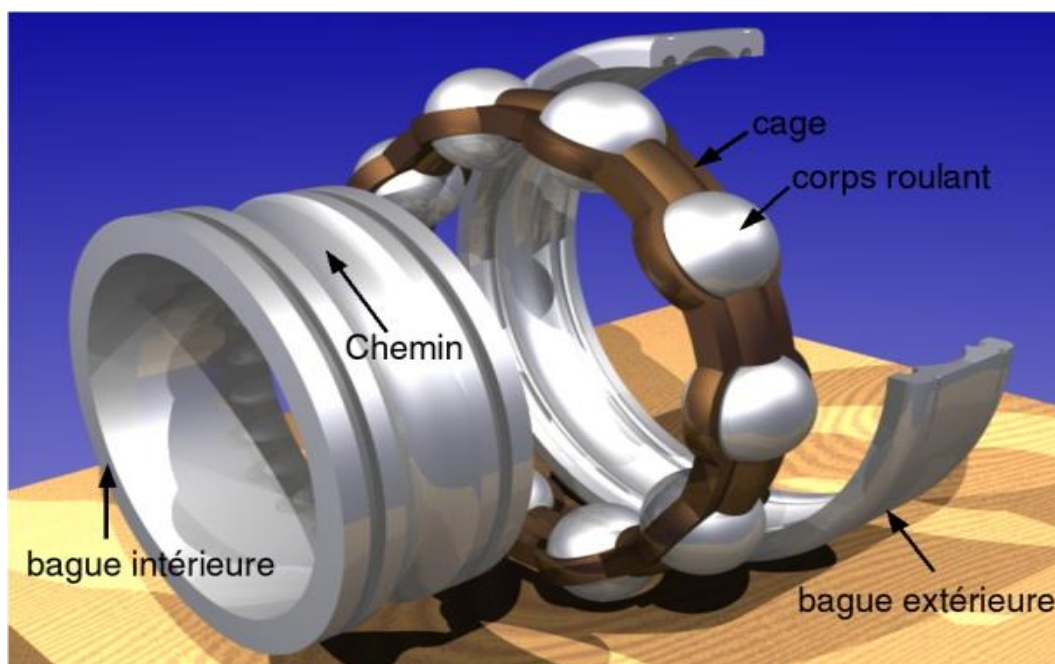


Figure I.05: Vue éclatée d'un roulement à billes

L'ensemble ainsi établi à savoir le stator, le rotor et les organes mécaniques, constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [6].

I.3 Les défaillances des machines asynchrones.

Bien que la MAS à cage d'écureuil soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. La diversité de leurs origines peut entraîner des erreurs sur leur nature et localisation. De ce fait, la bonne connaissance des mécanismes des défauts à surveiller et de leurs conséquences sur les signaux relevés un parfait diagnostic.

Les défauts peuvent être dus à diverses causes naturelles ou artificielles, prévisibles ou intempestives, internes, externes ou mixtes; qui sont très souvent reliés entre eux :

- Thermiques (surcharge, température ambiante élevée, . . .).
- Électriques (diélectrique, phénomène transitoire, . . .).
- Mécaniques (bobinage, vibrations. . .).
- Environnementales (agression, humidité . . .).

Ces défauts peuvent se classer en deux familles principales,

- Les causes internes, (Fig. I.06)
- Les causes externes, (Fig. I.07)

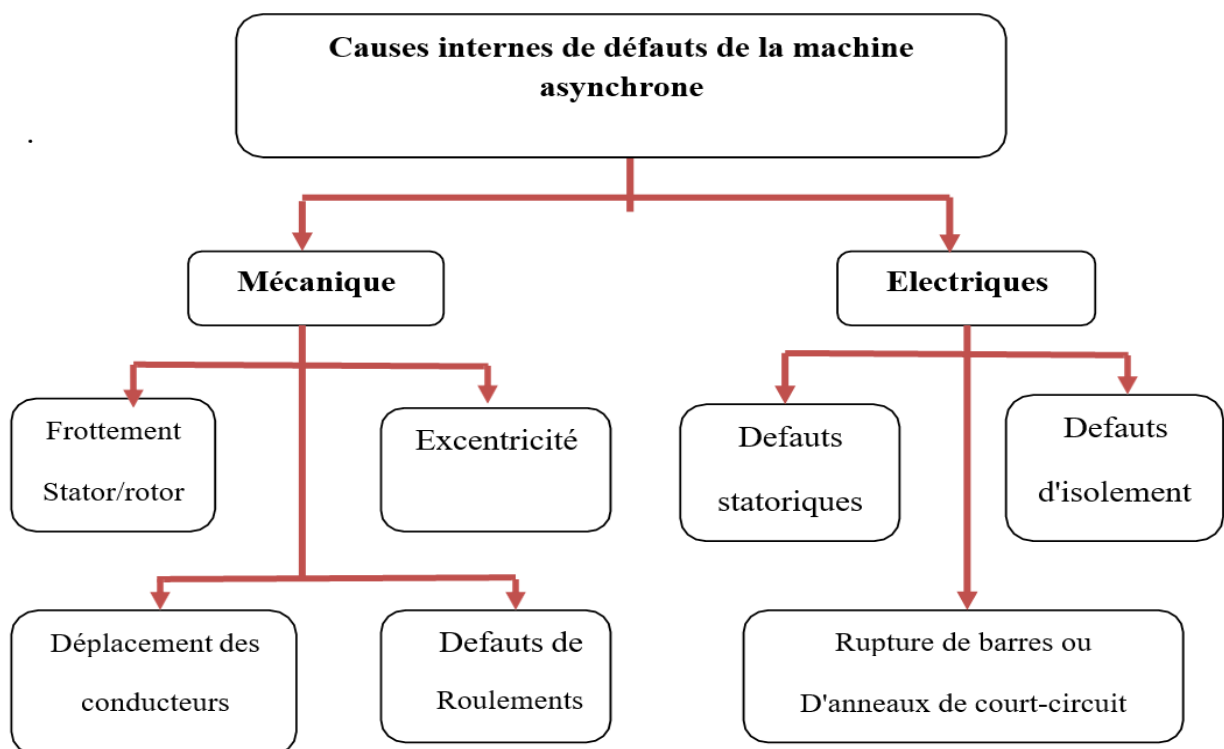


Figure I.06: Causes internes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [7]

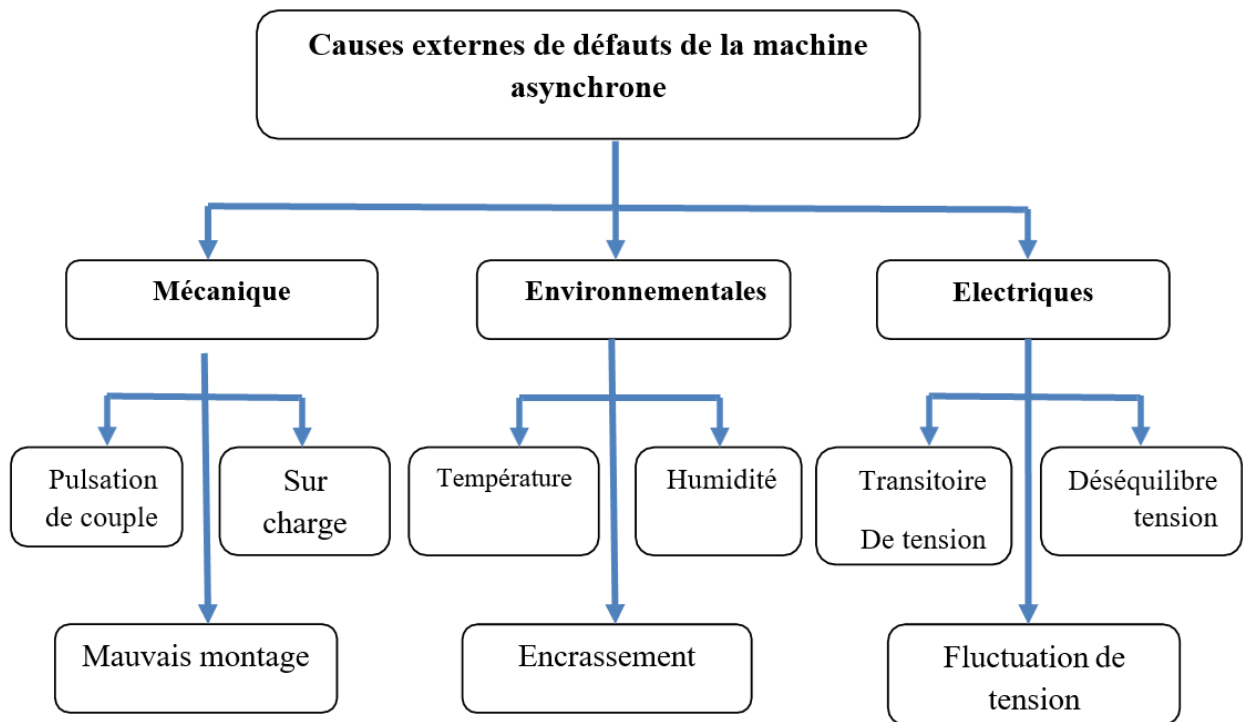


Figure I.07: Causes externes de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage [7].

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de faible et moyenne puissance (50KW à 200KW), a donné les résultats suivants (Fig. I.08) :

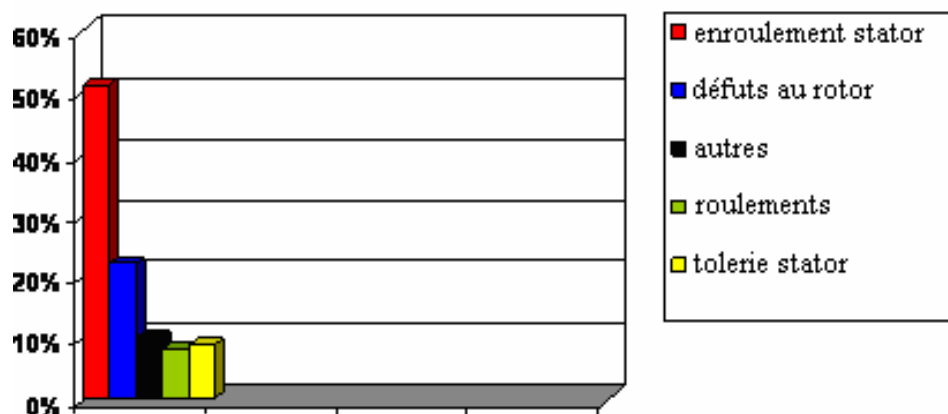


Figure I.08: Répartition des pannes des machines de faibles et moyennes puissances [8].

Les défauts statoriques sont les plus rencontrés dans ces types de machines.

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (100KW à 1MW) a donné les résultats suivants (Fig. I.09) :



Figure I.09: Répartition des pannes des machines de fortes puissances [8].

I.3.1 Défaillances au stator :

Les défaillances au stator représentent environ de 40% à 60% des défauts des machines asynchrones ayant plusieurs types comme indique la figure (I.10). 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.

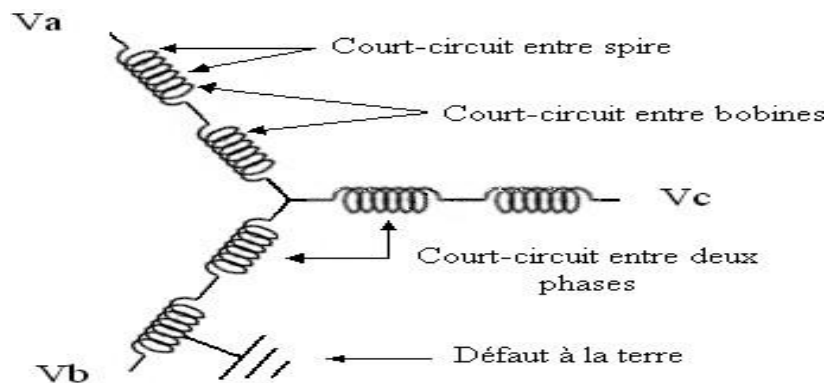


Figure I.10 : Différents types de défauts statorique.

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit :

- Défaut d'isolant.
- Court-circuit entre spires.
- Court-circuit entre phases.
- Court-circuit phase/bâti.
- Déséquilibre d'alimentation.
- Défaut de circuit magnétique.

I.3.1.1 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. Les différentes causes pour ce type de défaut sont :

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

I.3.1.2 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 légère 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 et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2^{ème} court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

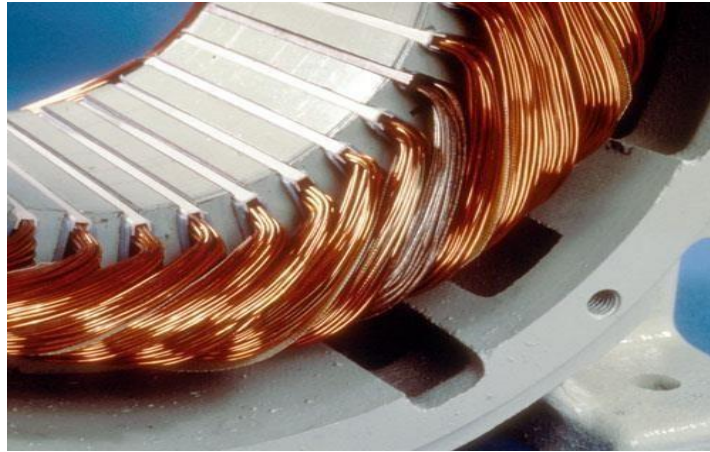


Figure I.11 : Défaut de Court-circuit entre spires.

I.3.1.3 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. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I.3.1.4 Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

I.3.1.5 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.

I.3.2 Défaillances au rotor :

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit :

- Rupture de barres.
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.
- Excentricité statique et dynamique.

I.3.2.1 Ruptures de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [9].



Figure 1.12 : Défaut deux barres cassées

I.3.2.2 Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [10].

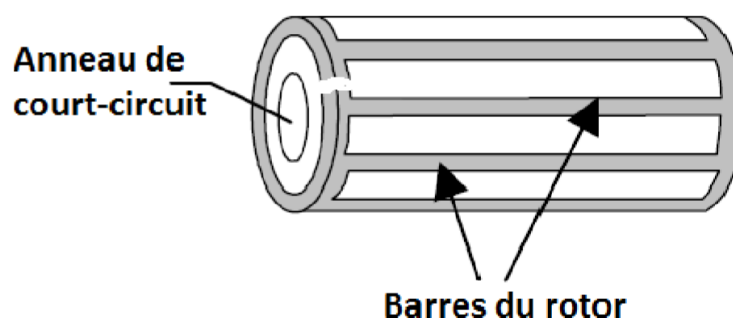


Figure 1.13 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil; rupture d'anneau de court-circuit.

I.3.2.3 Excentricité statique et dynamique:

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité, L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator [11].

Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [11].

- Trois cas d'excentricité sont généralement distingués:

I.3.2.3.1 L'excentricité statique :

Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques (Figure (I.14-a)).

I.3.2.3.2 L'excentricité dynamique:

Corresponds, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator (Figure (I.14-b)). Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.

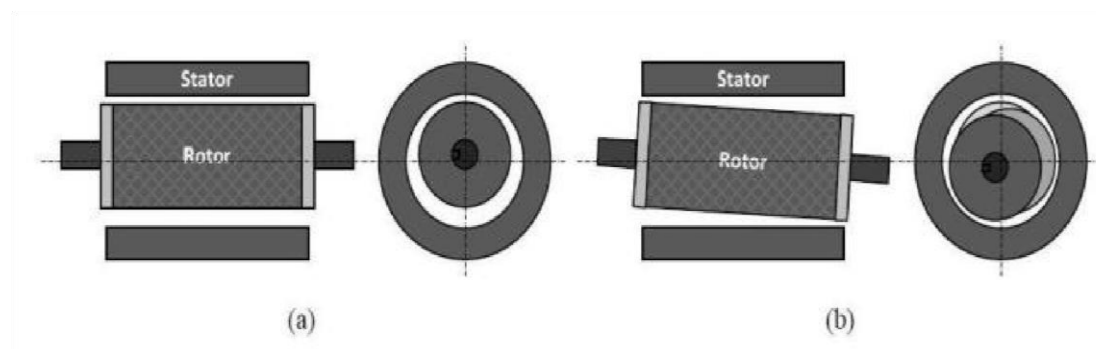


Figure I.14 : L'excentricité statique et dynamique [12].

I.3.2.3.3 L'excentricité mixte :

C'est la somme les deux cas (Figure (I.15)):

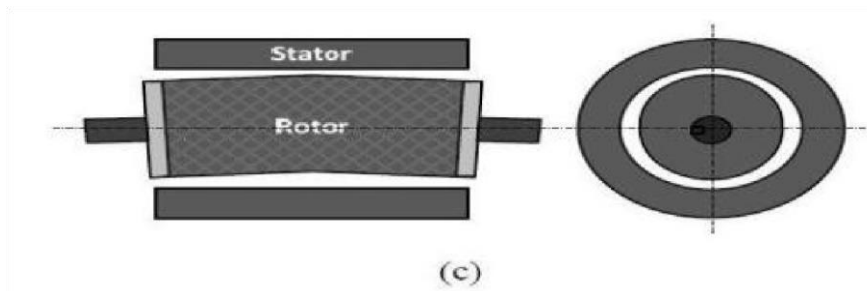


Figure I.15 : L'excentricité mixte [12].

I.3.3 Défaillances mécaniques

I.3.3.1 Défauts de roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques et assurent la fonction de guidage en rotation.

Les roulements peuvent être endommagés par des causes comme :

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable, ...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides, ...
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement,
- Mauvais alignement du rotor,
- courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques,

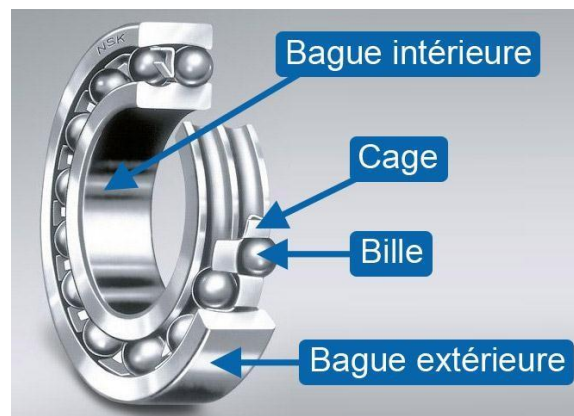


Figure I.16 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement billes .

I.4 Les Différentes méthodes de diagnostics des machines électriques :

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.

Les méthodes de diagnostics sont couvertes par une somme appréciable de travaux. Un consensus semble être établi pour définir trois méthodologies de diagnostic [13], comme montre la (Figure I. 17):

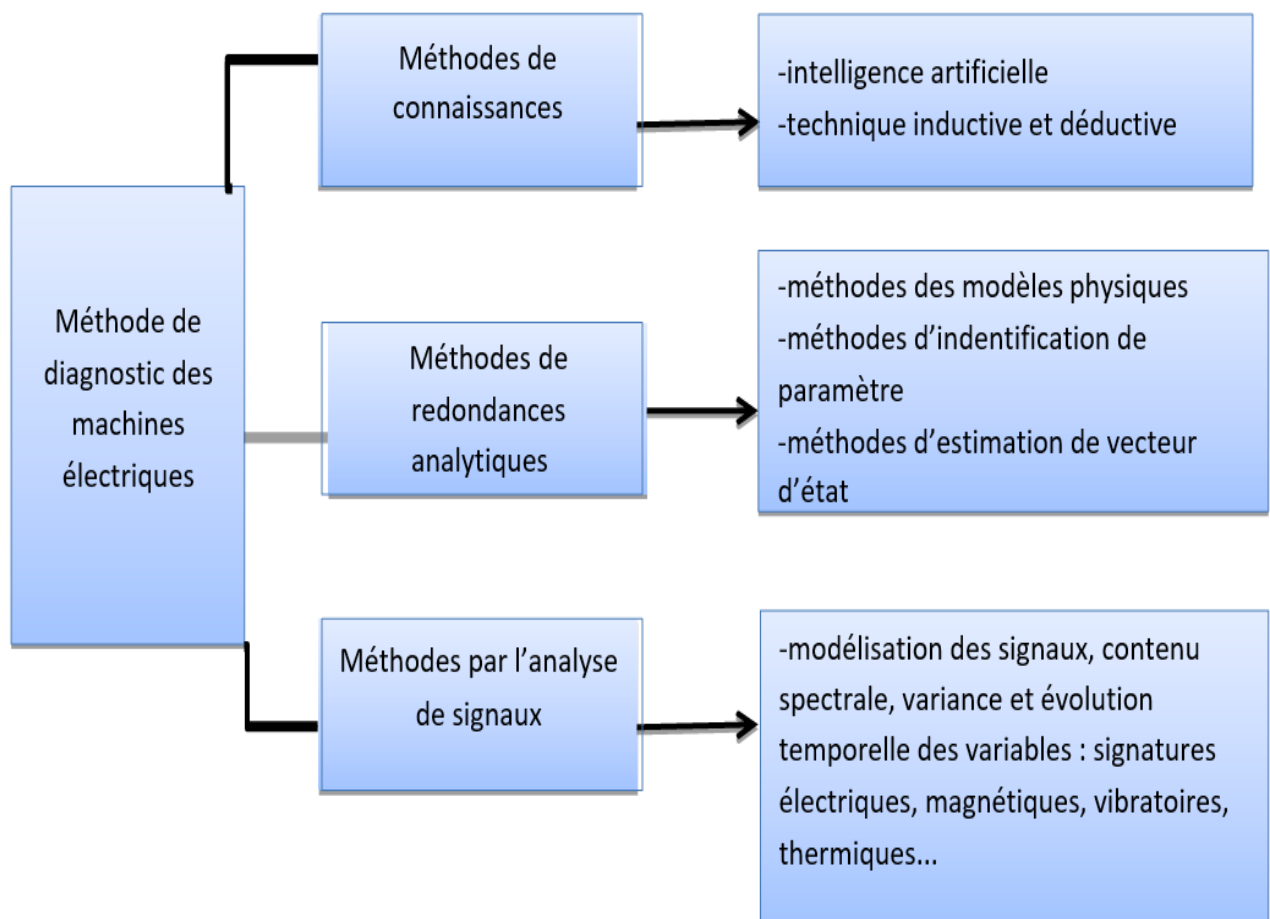


Figure I.17: Méthodes de diagnostic des machines électriques.

I.4.1 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 [13]. 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 [14].

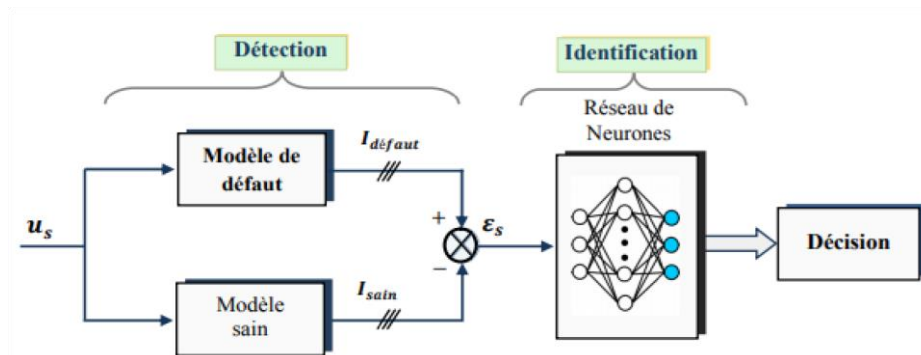


Figure I.18: les méthodes de connaissance

I.4.1.1 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 [15].

I.4.1.2 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.

I.4.1.3 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 [16].

I.4.2 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 [14].

I.4.2.1 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.

I.4.2.2 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 certain 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.

I.4.2.3 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 du 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 étendu 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 [17].

I.4.3 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. La première étape dans cette approche concerne la modélisation des signaux en les caractérisant dans le domaine fréquentiel, en déterminant leur contenu spectral, leur variance, etc... [18-19].

L'apparition d'un défaut est 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 temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques. Dans la littérature, sont présentées plusieurs techniques de détection de défauts par traitement du signal [20-21]. Le traitement du signal est utilisé depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les défauts rotoriques [20, 21-22]. 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 (figure I.19). Cependant, cette méthode se prête uniquement au diagnostic à vitesse constante et principalement sur des machines alimentées par le réseau à fréquence constante.

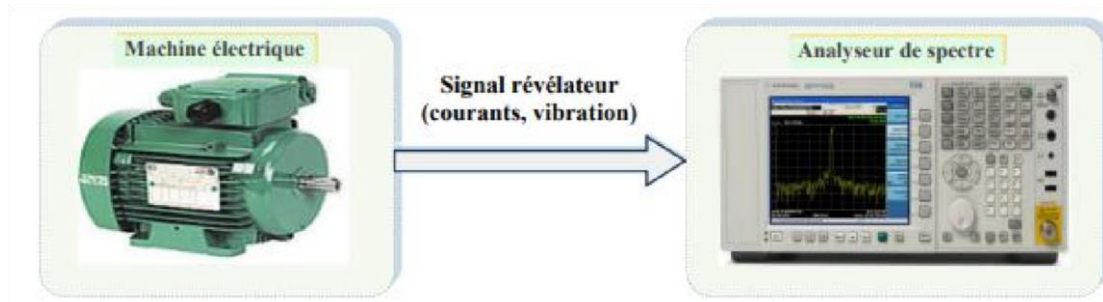


Figure I.19 : Schéma de principe de la méthode par l'analyse de signaux

Ces méthodes ont l'avantage de l'indépendance de l'analyse par rapport aux fluctuations internes du système. D'autre part, l'information contenue dans les signaux, n'étant pas filtrée par la modélisation, reste intacte.

I.4.3.1 Diagnostic par mesures de vibration mécanique

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

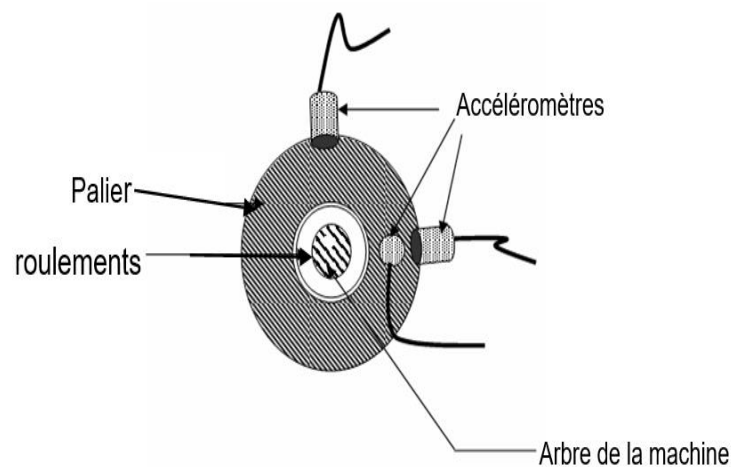


Figure I.120 : Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement billes

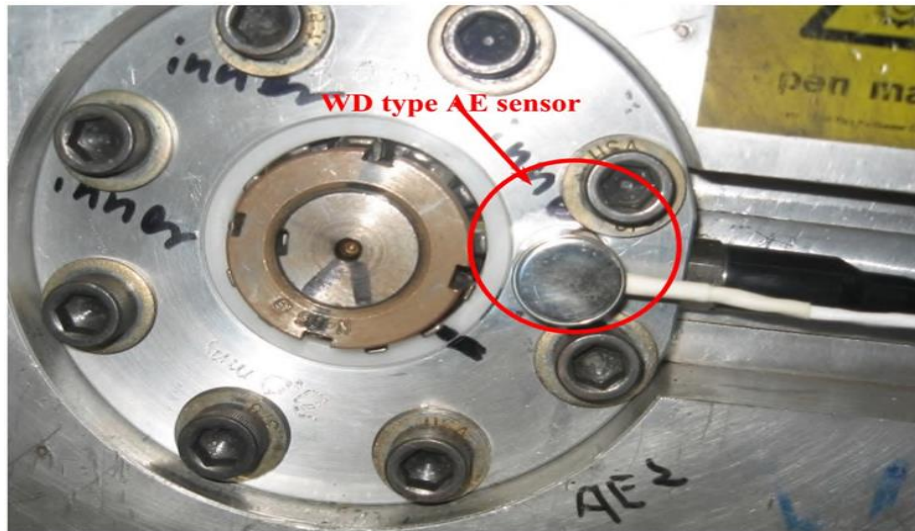


Figure I.21: Le capteur d'émission acoustique de type WD

Les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts fréquemment rencontrés, notamment ceux mécaniques. Cependant, ces analyses vibratoires comportent certains inconvénients :

- Problème d'accessibilité,
- Difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut.

De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux

I.4.3.2 Diagnostic par l'analyse du flux magnétique

La conversion électromécanique de l'énergie est localisée dans l'entrefer. Cette conversion est donc affectée par tout déséquilibre magnétique, mécanique, électrique ou électromagnétique au rotor ou au stator.

Le flux d'entrefer et par-là même l'induction magnétique dans cet entrefer, le flux embrassé dans les enroulements statoriques ou encore le flux de fuite dans l'axe du rotor sont des paramètres qui, à cause de leur sensibilité à tout déséquilibre de la machine, méritent d'être analysés. Ces grandeurs sont difficilement mesurables mais des études ont été menées pour extraire des signatures spécifiques à certains défauts.

Le flux axial est toujours présent dans les machines électriques à cause des dissymétries inhérentes à leur fabrication. L'étude des variations de flux peut donc être une solution pour détecter et localiser un défaut à travers de l'utilisation de bobines exploratrices placées à l'extérieur de la machine, perpendiculairement à l'axe du rotor.

I.4.3.3 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 [7]..

I.4.3.4 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 [23].

I.4.3.5 Diagnostisc par mesure des courants statorique

Cette méthode encore appelée MCSA « Motor Curent 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.

I.5 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 II

Modélisations de la machine asynchrone à cage.

Chapitre 2

Modélisations de la machine asynchrone à cage.

Sommaire

II.1	Introduction :	25
II.2	Modélisation du fonctionnement de la machine saine :	26
II.2.1	Hypothèses de départ :	26
II.2.2	Schéma d'un moteur asynchrone triphasé :	26
II.2.3	Equations électriques de la machine asynchrone :	27
II.2.4	Transformation biphasée de Park :	29
II.2.5	Modèle de la machine dans le repère de Park :	30
II.2.6	Simulation de la machine saine	33
II.2.7	Résultats de simulation en fonctionnement saine :	35
II.3	Modèle de défauts statoriques :	38
II.3.1	Modélisation du défaut stator dans le repère de Park :	38
II.3.2	Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator :	40
II.3.3	Généralisation du modèle de défaut statorique :	42
II.3.4	Simulation du modèle de défaut statorique :	44
II.3.5	Résultats de simulation du modèle de défaut statorique :	47
II.3.6	Modèle de défauts rotoriques :	49
II.4	Modélisation du rotor en défaut :	50
II.4.1	Modélisation du défaut de rupture des barres :	51
II.4.2	Schéma électrique équivalent :	52
II.4.3	simulation du modèle de défauts rotoriques :	54
II.4.4	Résultats de simulation du modèle de défauts rotoriques :	55
II.5	Modèle de défaut simultané stator/rotor :	58
II.5.1	Modèle global de la machine asynchrone en défaut stator/rotor :	58
II.5.2	Simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor	60
II.5.3	Résultats de simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor :	61
II.6	Conclusion :	64

II.1 Introduction

La modélisation des machines électriques est un processus essentiel pour diagnostiquer et contrôler leur fonctionnement. En général, les méthodes numériques et analytiques sont les deux méthodes de calcul les plus utilisées dans la modélisation des machines électriques [24,25-26].

La machine asynchrone présente en plus d'un comportement dynamique conventionnel, un comportement dû au défaut. Ainsi, ces études ont permis l'élaboration de modèles permettant le découplage de deux Modes :

- Le mode commun, image du comportement sain de la machine, est exprimé dans le repère triphasé ou dans le repère de Park, et tire ses paramètres des composants électriques de la machine.
- Le mode différentiel est une partie supplémentaire, due à la présence d'un défaut et permet d'exprimer l'écart entre le mode commun et le fonctionnement défaillant de la machine.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la modélisation de deux types de défauts électriques de la machine asynchrone à cage, le défaut de court-circuit entre spires au stator et le défaut de rupture de barres au rotor.

II.2 Modélisation du fonctionnement de la machine saine :

Dans cette section, nous allons considérer le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous admettons par contre que sa structure rotorique est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné. Le champ tournant induit des courants rotoriques dans les barres de la cage d'écureuil (ou bobinage) : ces courants induits provoquent un couple permettant au rotor de tourner à une vitesse voisine de celle du champ tournant, mais nécessairement inférieure.

La mise en équation de la machine asynchrone avec les hypothèses retenues étant classique, nous ne mentionnerons que les points qui nous semblent essentiels et les choix qui nous sont propres par rapport à ce qui se fait habituellement.

II.2.1 Hypothèses de départ :

Le modèle de la MAS est établi en tenant compte des hypothèses de base suivantes [26-27] :

- la machine est symétrique à entrefer constant,
- la répartition dans l'entrefer de la force magnétomotrice et du flux est sinusoïdale,
- le circuit magnétique n'est pas saturé et à perméabilité constante,
- les pertes fer par hystérésis et courants de Foucault, l'effet de peau et les effets de dentures sont négligeables, - l'effet des encoches est négligé.

L'ensemble de ces hypothèses permet ainsi de s'appuyer sur des propriétés telles que l'additivité des flux, la constance des inductances propres ou sur une loi de variation des inductances mutuelles entre le rotor et le stator de type sinusoïdale.

II.2.2 Schéma d'un moteur asynchrone triphasé :

La machine asynchrone à cage d'écureuil est constituée de trois enroulements logés symétriquement dans les encoches du stator et d'une cage d'écureuil conductrice au rotor.

Cette dernière est assimilable à trois enroulements en court-circuit et identiques en fonctionnement sain. On modélise la machine asynchrone à cage dans un repère a, b, c (modèle triphasé-triphasé) ou dans un repère orthonormé dq (modèle diphasé). La figure II. 01 montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone à cage comprenant un enroulement triphasé au stator (a_s, b_s, c_s) comme au rotor (a_r, b_r, c_r). Dans le modèle biphasé, les grandeurs statoriques (rotoriques) liées au repère $a_s, b_s, (a_r, b_r, c_r)$, décalées de 120° , sont ramenées vers les grandeurs biphasées équivalentes $s_d, (r_d, r_q)$ en quadrature de phase.

Le modèle triphasé-triphasé modélise les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques (barres + anneaux) sont représentés par trois phases également.

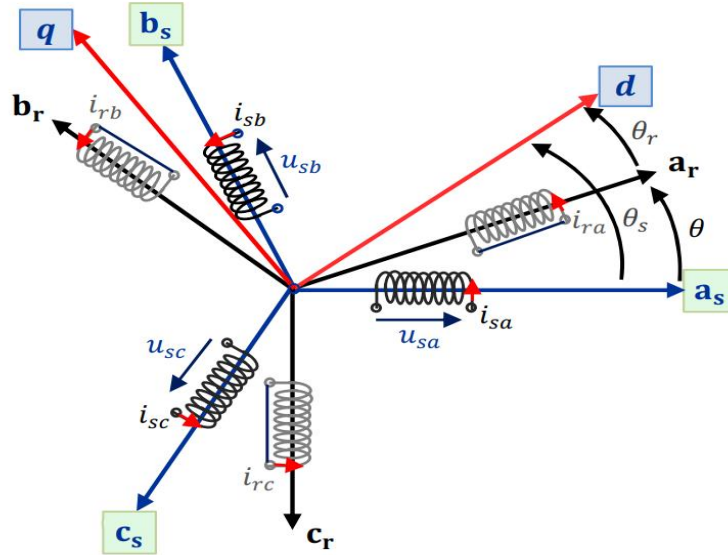


Figure II.01 : Représentation d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor

II.2.3 Equations électriques de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est constituée par deux circuits couplés électromagnétiquement.

Pour représenter le modèle d'une machine dans un repère triphasé, il faut écrire les équations différentielles liant les tensions, les courants et les flux pour chaque enroulement du stator et du rotor selon le modèle présenté sur la figure II.01.

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} u_s = [R_s] \cdot i_s + \frac{d}{dt} \phi_s \\ 0 = [R_r] \cdot i_r + \frac{d}{dt} \phi_r \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} u_s &= \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}; & i_s &= \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; & \phi_s &= \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}; & [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \\ u_r &= \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix}; & i_r &= \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}; & \phi_r &= \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}; & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

u_s, u_r : Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

i_s, i_r : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

ϕ_s, ϕ_r : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$[R_s], [R_r]$: Matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les flux totalisés ϕ_s et ϕ_r des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme :

$$\begin{cases} \phi_s = [L_s] \cdot i_s + [M_{rs}] \cdot i_r \\ \phi_r = [M_{rs}] \cdot i_s + [L_r] \cdot i_r \end{cases} \quad (2.2)$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statoriques sont égales, de même pour celles du rotor. Les matrices $[L_s]$ et $[L_r]$ deviennent :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} & M_r & M_r \\ M_r & L_{rp} & M_r \\ M_r & M_r & L_{rp} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

L_{sp}, L_{rp} : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator, M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) \\ \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) & \cos(p\theta - 2\pi/3) \\ \cos(p\theta - 2\pi/3) & \cos(p\theta - 4\pi/3) & \cos(p\theta) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Le modèle de représentation de la machine asynchrone que nous venons de présenter présente l'inconvénient d'être relativement complexe dans la mesure où les matrices contiennent des éléments variables en fonction de l'angle de rotation θ . Pour simplifier le modèle, une transformation mathématique est appliquée au système. Cette dernière qui est couramment utilisée pour étudier les machines tournantes consiste en un changement du référentiel (abc) en un référentiel biphasé (dq). Cette transformation est la transformation de Park. Le modèle de Park, en plus de sa simplicité, permet de réduire sensiblement le temps de calcul et par conséquent celui de la simulation.

II.2.4 Transformation biphasée de Park :

Le principe de cette transformation repose sur le fait qu'un champ tournant créé par un système triphasé équilibré peut l'être aussi, à l'identique, pour un système biphasé de deux bobines décalées des courants déphasés de $\pi/2$ dans le temps. Cette transformation est orthonormée, elle conserve donc la puissance instantanée dans les enroulements équivalents [28]. La transformation de Park consiste à projeter les grandeurs statoriques et rotoriques sur deux axes en quadrature. Elle fait appel à deux changements de coordonnées : la transformation de Concordia et un changement de repère par rotation. Il est à noter que la transformation de Park est effectuée uniquement sur les grandeurs du régime sain (axes triphasés équilibrés de la machine).

Comme le montre la figure II.02, nous remplaçons les trois phases d'axes fixes (a_s, b_s, c_s) du stator par un enroulement équivalent formé des deux bobinages d'axes en quadrature (sd, sq) tournant à la vitesse ω_a . De même, au rotor, nous substituons deux bobinages rd et rq aux enroulements triphasés équivalents. Nous notons par θ_s (resp.) L'angle de transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. Rotoriques). Nous remarquons qu'ils sont liés à θ par la relation 2.6 suivante :

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (2.6)$$

Ceci simplifie les équations et par conséquent le modèle final.

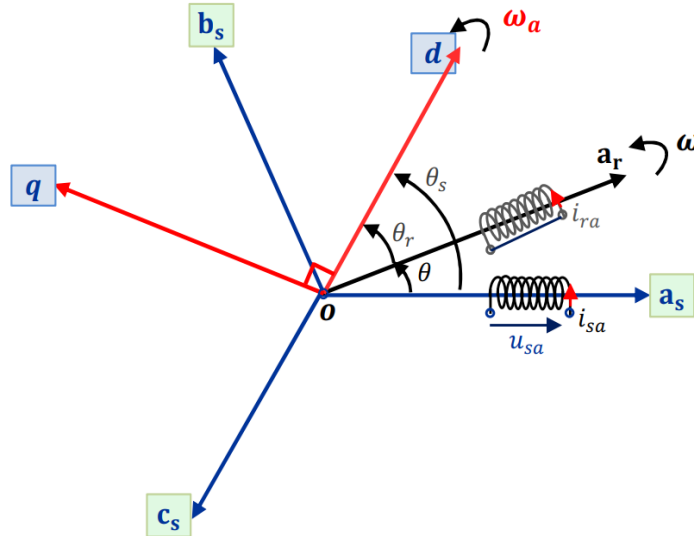


Figure II.02 : Principe de la transformation de Park

Le système de coordonnées fixe (a_s, b_s, c_s) est ainsi transformé en un système de coordonnées orthogonales tournant (dqo). Comme la machine est équilibrée, les composantes homopolaires "o" sont nulles. Nous passons des coordonnées triphasées (a_s, b_s, c_s) aux nouvelles coordonnées (dq) de Park, en appliquant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} = P(-\theta) \cdot T_{32} \cdot \begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{as} \\ x_{bs} \\ x_{cs} \end{bmatrix} = T_{23} \cdot P(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_{ds} \\ x_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où

– x : Tension, courant ou flux, et :

– d : indice de l'axe direct.

– q : indice de l'axe en quadrature.

T_{32} , la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale, s'écrit:

$$T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(0) & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(0) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

et

$$T_{23} = T_{32}^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation d'angle } \theta$$

$$P(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} : \text{Matrice de rotation d'angle } (-\theta)$$

II.2.5 Modèle de la machine dans le repère de Park :

Dans un souci de simplification du modèle de la machine asynchrone, on choisit de totaliser les fuites magnétiques au stator [24, 28].

Par définition, le système d'axes (d, q) tourne à la vitesse ω_a . Il est intéressant de pouvoir changer de repère selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi, pour un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_a par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine s'écrit [29,28] :

$$\begin{aligned}
\underline{u}_{dq_s}^{(x)} &= R_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\
\underline{u}_{dq_r}^{(x)} &= 0 = R_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\
\underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} &= L_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_m \underline{i}_{dq_r}^{(x)} \\
\underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} &= L_m \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)}
\end{aligned}
\tag{2.9}$$

Avec :

$L_s = L_{sp} - M_s$: inductance cyclique statorique

$L_r = L_{rp} - M_r$: Inductance cyclique rotorique

$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique stator-rotor

$\omega = p\Omega$: pulsation électrique de rotor

et

$$P\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Si on fait l'hypothèse que les fuites magnétiques sont totalisées au stator et en définissant :

$$\begin{cases} L_s = L_f + L_m \\ L_r = L_m \end{cases}
\tag{2.10}$$

L'équation 2.9 se réécrit alors :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s}^{(x)} = R_s \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\ \underline{u}_{dq_r}^{(x)} = 0 = R_r \underline{i}_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) P\left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + L_m \underline{i}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} = L_m (\underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \underline{i}_{dq_r}^{(x)}) \end{cases}
\tag{2.11}$$

Le fonctionnement de la machine asynchrone est habituellement analysé dans trois repères : un repère lié au stator, un repère lié au rotor et un repère lié au champ tournant. Le choix du référentiel dépend de la vitesse de rotation ω_a du système d'axes (dq) selon [30] :

- Si le référentiel est fixe par rapport au stator alors $\omega_a = 0$ et on obtient un système électrique où les grandeurs statoriques sont purement alternatives et à la fréquence de l'alimentation. La simulation de la machine asynchrone dans ce repère n'exige donc aucune connaissance de la

position du rotor, ce qui constitue un avantage pour la commande sans capteur de position.

L'inconvénient majeur est la manipulation de signaux à fréquence élevée.

- Si Le référentiel tourne à la vitesse de synchronisme alors

$\omega_a = \omega_s = 2\pi f_s$ et on obtient un système électrique purement continu qui est très bien adapté aux techniques d'identification. Cependant la position du champ tournant doit être reconstituée à chaque instant d'échantillonnage.

- Si le référentiel est fixe par rapport au rotor alors $\omega_a = \omega$ et les signaux électriques sont alors quasi-continus. La pulsation des grandeurs électriques est égale à $g\omega$ (où $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ est le glissement de la machine) qui est faible dans les conditions réelles de fonctionnement. Lorsqu'on a accès à la position mécanique, ce repère est privilégié du fait de la quasi-continuité des grandeurs électriques.

Dans ce travail nous avons opté pour le référentiel lié au rotor car c'est celui qui nécessite le moins de transformations/estimations.

La figure II. 03 représente le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique, avec les fuites totalisées au stator.

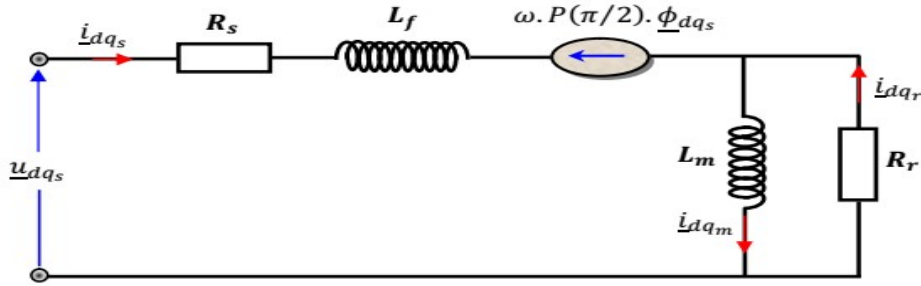


Figure II.03 : Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor

Figure II.03 Modèle de la machine saine dans le repère de Park lié au rotor Le modèle de la machine se caractérise alors par quatre paramètres physiques :

R_s , R_r , et L_f . Ce sont donc ces quatre paramètres que nous allons chercher à estimer par la suite dans le cas d'une machine saine.

Pour pouvoir accéder au rotor et concevoir le modèle complet de la machine, il faut tenir compte de l'équation mécanique suivante :

$$\frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - f_v \cdot \Omega - C_r \quad (2.12)$$

$\Omega = \dot{\theta} = \frac{\omega}{p}$: Est la vitesse de l'arbre moteur, J le moment d'inertie, C_{em} le couple

Électromagnétique, C_r l'ensemble des couples résistifs et f_v le coefficient de frottement visqueux. Le couple électromagnétique peut s'écrire dans le repère diphasé lié au rotor [66] :

$$C_{em} = p \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) \quad (2.13)$$

En plaçant l'équation 2.13 dans 2.12 on obtient l'équation différentielle électromécanique de la pulsation:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega - \frac{p}{J} \cdot C_r \quad (2.14)$$

Modéliser la machine de cette manière permet de réduire le nombre de grandeurs nécessaires pour pouvoir simuler le fonctionnement de la machine. En effet, seules les valeurs instantanées des tensions statoriques et du couple résistant doivent être déterminées pour les imposer à la machine.

II.2.6 Simulation de la machine saine

En considérant les dynamiques des flux rotoriques Φ_{dqr} , des courants statoriques i_{dqs} et les dynamiques électromécaniques (ω, θ) , le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g \cdot u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec :

$$\underline{x} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T : \text{Vecteur d'état}$$

$U = [u_{ds} \ u_{qs} \ c_r]^T$ et $y = [i_{ds} \ i_{qs} \ \omega]^T$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_r}{L_f} \cdot i_{ds} + \omega \cdot i_{qs} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{qr} \\ -\omega \cdot i_{ds} - \frac{R_s+R_r}{L_f} \cdot i_{qs} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{qr} \\ R_r \cdot i_{ds} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{dr} \\ R_r \cdot i_{qs} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{qr} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}$$

La résolution des équations de ce modèle a été faite par la méthode de RungeKutta d'ordre 4 avec une période d'échantillonnage de 0.7 ms. Nous excitions la machine avec une entrée triphasée sinusoïdale u_s , et à chaque pas d'échantillonnage, nous calculons les tensions statoriques u_{dqs} de park :

$$u_{dqs} = P(-\theta) \cdot T_{32} \cdot u_s \quad (2.16)$$

Pour pouvoir tracer les courants de chaque phase statorique, nous les avons calculés en simulation à partir des courants de Park i_{dqs} :

$$i_s = T_{32} \cdot P(\theta) \cdot i_{dqs} \quad (2.17)$$

Le modèle de simulation de la machine asynchrone alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée équilibrée. Les variables d'entrée sont les trois tensions u_a, u_b, u_c et le couple de charge C_r

Le modèle Simulink de la machine apparaît sous forme de différents blocs donnés sur la figure II.04. Le bloc source représente l'alimentation de la machine asynchrone par le réseau électrique de 220/380 V à 50 Hz, le bloc de Park contient les équations de la transformation de Park et à l'intérieur du bloc MAS sont regroupées les équations de la machine asynchrone

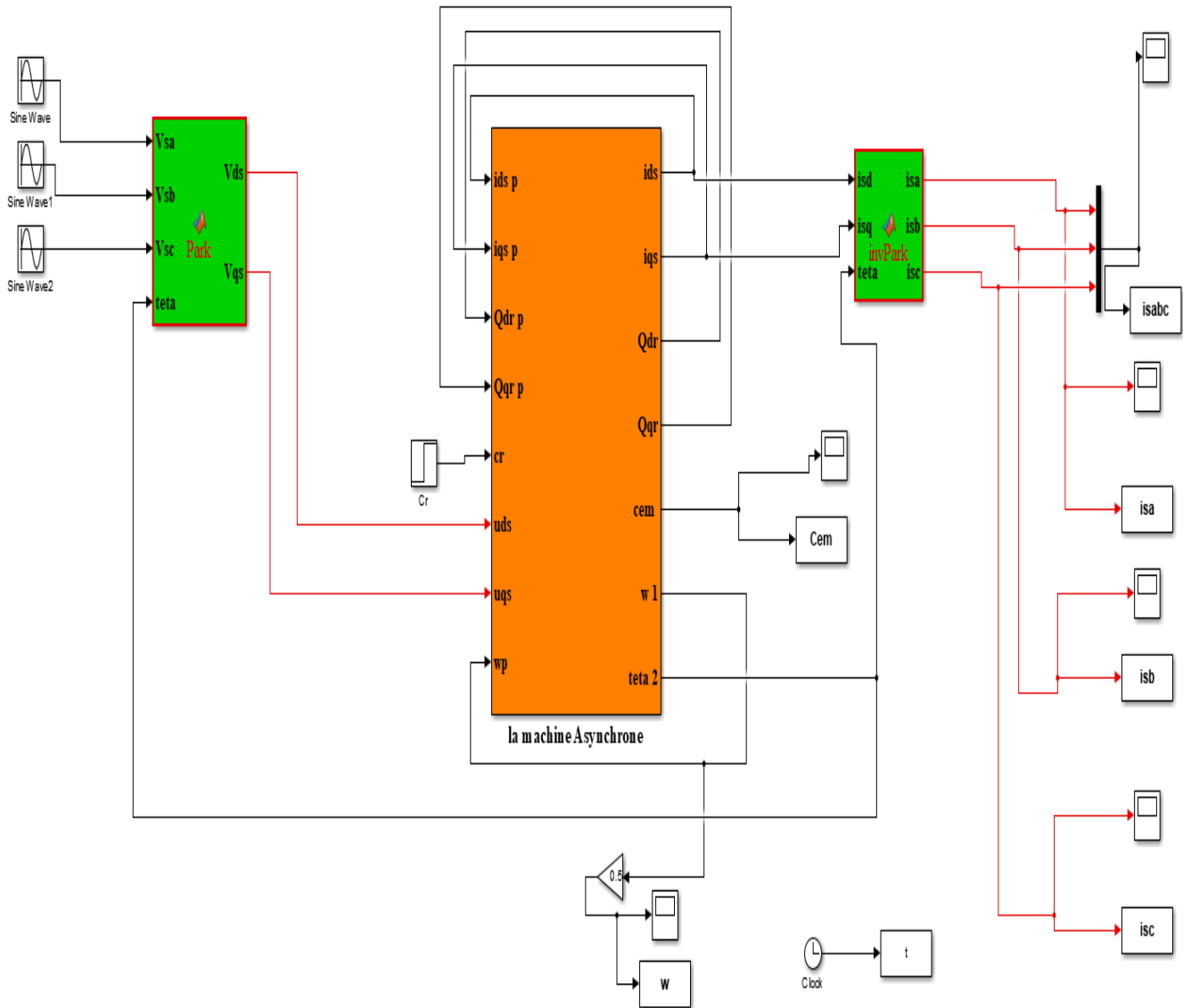


Figure II.04: Modélisation de la machine asynchrone sous Matlab/Simulink

Les simulations ont été effectuées sous Matlab-Simulink. Les paramètres de la machine utilisée dans cette modélisation sont groupés dans le tableau :

220/380 V, 50HZ, 1.1KW	
Parameters	Valeurs
Résistance statorique	$R_s = 9.8\Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 5.3\Omega$
Inductance rotorique	$L_m = 0.5H$
Inductance de fuites	$L_f = 0.04H$
Coefficient de frottement visqueux	$f_v = 1.19 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$
Moment d'inertie	$J = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
Nombre de paires de pôles	$p = 2$
Nombre de barres au rotor	$N_b = 28$
Nombre de spires par phase	$N_s = 464$

II.2.7 Résultats de simulation en fonctionnement saine :

Le modèle complet de la machine asynchrone étant maintenant connu, nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants, le couple ou encore la vitesse rotorique lorsque la machine ne présente aucune défaillance.

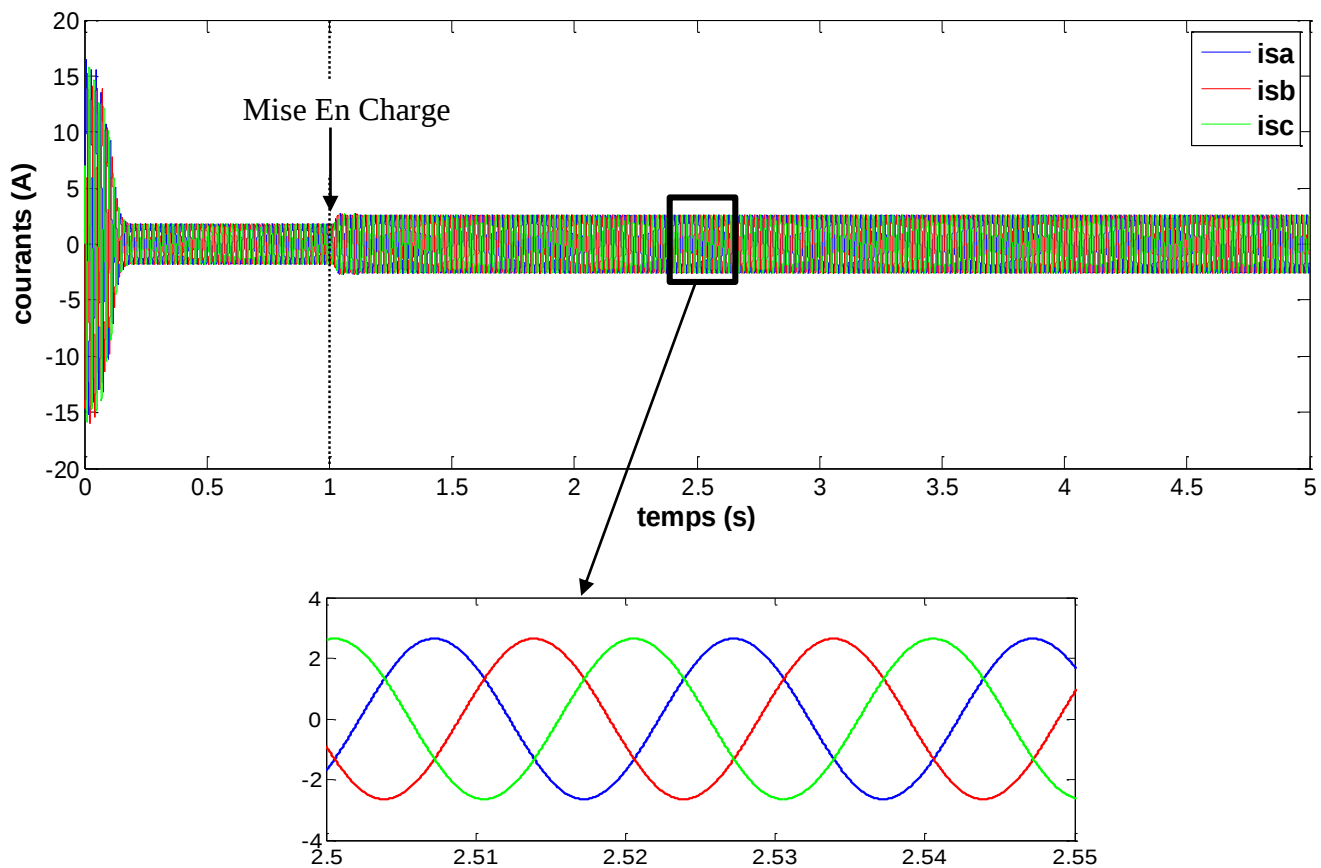


Figure II.05: Courbe des courants

La figure II.05 montre l'évolution des courants statoriques de la machine en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide, puis en charge, sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

Etant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, le régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courant qui atteignent des valeurs maximales allant jusqu'à 15 A et qui dure 0.2 sec. Par la suite un régime permanent s'établit et se traduit par la chute des courants avec des oscillations sinusoïdales autour de la valeur nulle. A l'instant $t = 1$ sec, nous appliquons un couple résistant nominal de 5 Nm. Nous obtenons, comme effet, l'augmentation des courants qui atteignent une valeur maximale de 2.65 A.

Cet effet est dû à l'augmentation de la réaction magnétique du rotor qui est, elle-même, due à l'augmentation de l'amplitude des courants rotoriques.

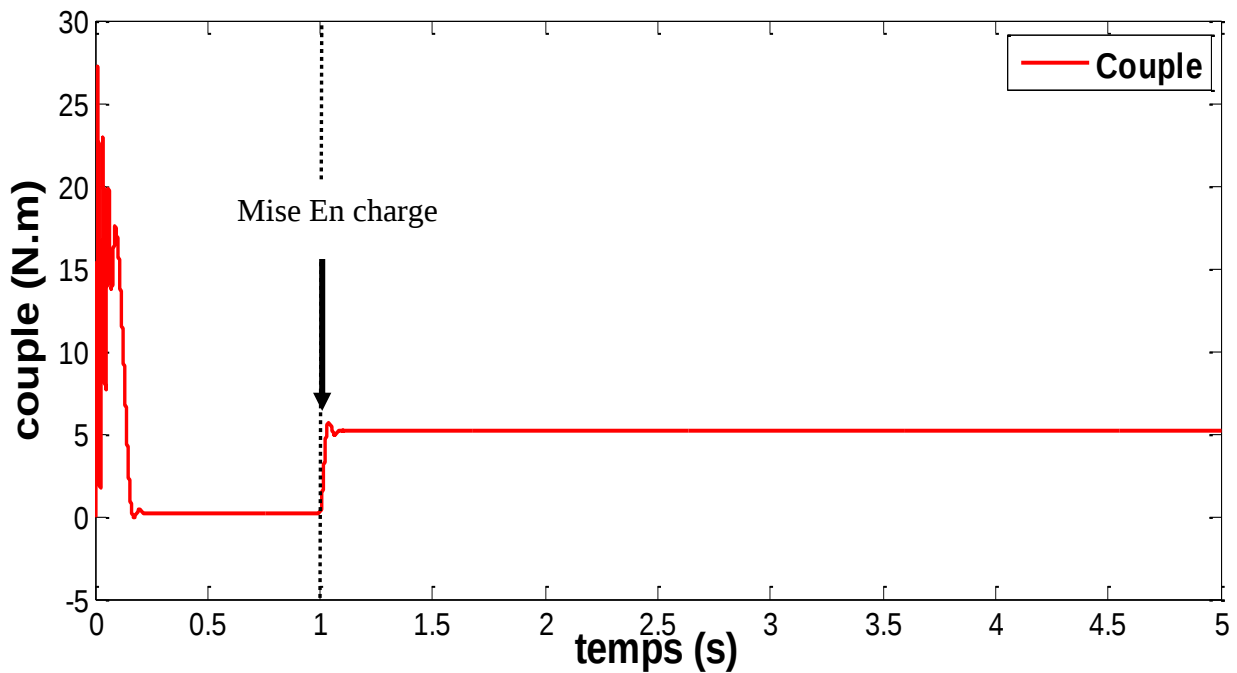


Figure II.06: Courbe de couple

La figure II.06 montre l'évolution du couple électromagnétique. Le régime transitoire, qui dure 0.2 sec, se manifeste par un régime transitoire amorti autour de 16 Nm avec valeur maximale de 28 Nm. A partir de $t = 0.2$ sec, le couple chute rapidement pour atteindre une valeur presque nulle et égale à celle du couple de frottement fluide. A l'instant $t = 1$ sec, nous appliquons un couple de 5 Nm. Evidemment le couple électromagnétique réagit d'une manière inverse de sorte à s'opposer au couple résistant.

La figure II.07 montre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor. Aux premiers instants du démarrage, la vitesse augmente de 0 à 157 rad/s dans un intervalle de temps de 0.2 sec, atteignant ainsi le régime permanent. A l'instant $t = 1$ sec, l'application d'un couple résistant de 5 Nm a tendance à freiner l'arbre moteur d'où la diminution de la vitesse.

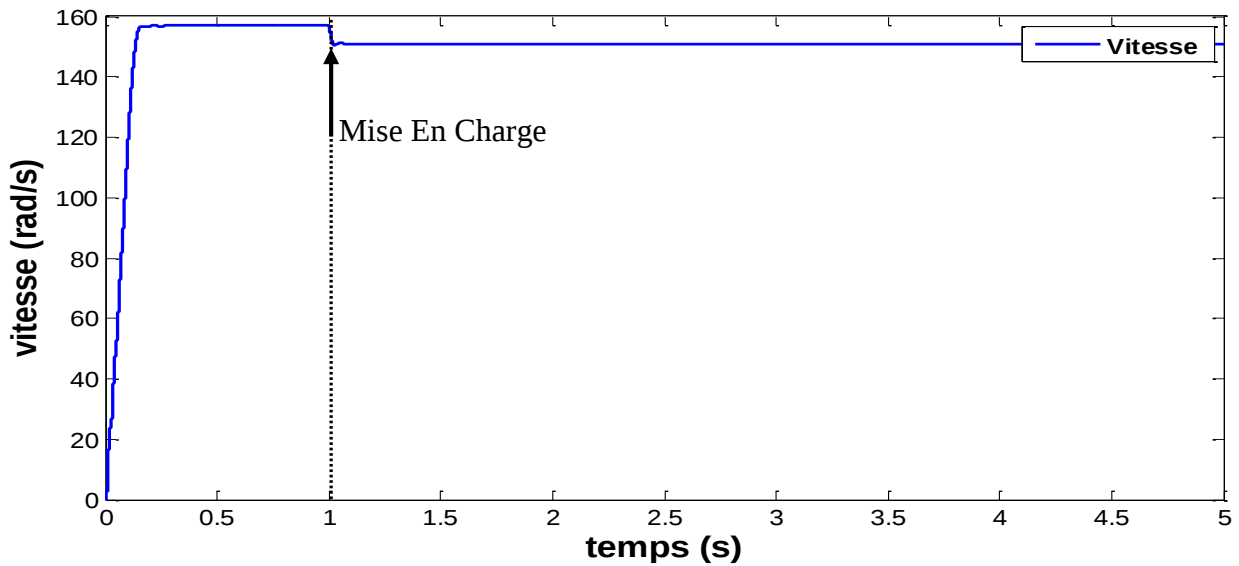


Figure II.07 : Courbe de vitesse

II.3 Modèle de défauts statoriques :

Les efforts de recherche en modélisation de la machine asynchrone en vue de sa surveillance et son diagnostic sont toujours d'actualité. Plusieurs modèles ont été développés pour tenir compte du défaut de court-circuit entre spires des enroulements statoriques.

Nous pouvons citer les modèles triphasés basés sur la description de la topologie constitutive et géométrique de la machine asynchrone à cage, sous la forme de circuits électriques équivalents magnétiquement couplés [2,31], ou bien les modèles multi enroulements qui représentent la machine par des enroulements au stator et au rotor. Au niveau du stator le modèle est représenté par trois enroulements. Le nombre d'enroulements utilisé pour représenter le rotor est égal au nombre de barres de la cage [32]. Ces modèles triphasés, classés parmi les modèles "complexes" [33], présentent l'avantage d'être fidèles à la structure électrique et magnétique de la machine en défaut. Cependant, ils sont très complexes à mettre en œuvre puisque les hypothèses de simplification liées à la symétrie de la structure de la machine saine ne sont plus valables. De plus la résolution de ces modèles implique des moyens informatiques de calcul puissants ce qui en limite la mise en œuvre.

II.3.1 Modélisation du défaut stator dans le repère de Park :

Dans ce travail de thèse, nous utilisons un modèle relativement simple et adéquat, qui a été développé en vue du diagnostic de la machine asynchrone à cage. Ce modèle est basé sur le fait que, en situation de défaut, la MAS présente en plus d'un comportement dynamique classique, un comportement du au défaut [29]. Il est alors essentiel d'envisager deux modes ; un mode "commun" et un mode "différentiel".

Le mode commun doit correspondre au modèle dynamique de la MAS. Exprimé en repère triphasé ou biphasé, il traduit le fonctionnement sain de la machine.

Le mode différentiel a pour objectif de traduire le dysfonctionnement et ses paramètres doivent être essentiellement sensibles au défaut.

Il s'agit de modéliser une machine fictive équivalente dont le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court-circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire court-circuitée dont le nombre de spires N_{cc} est égal au nombre de spires en défaut dans la machine [29]. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques et rotoriques, un bobinage court-circuité à l'origine du champ stationnaire de direction fixe θ_{cc} par rapport au stator.

La figure II. 08 illustre le stator d'une machine asynchrone à une paire de pôles avec court-circuit sur la phase b_s du stator [24].

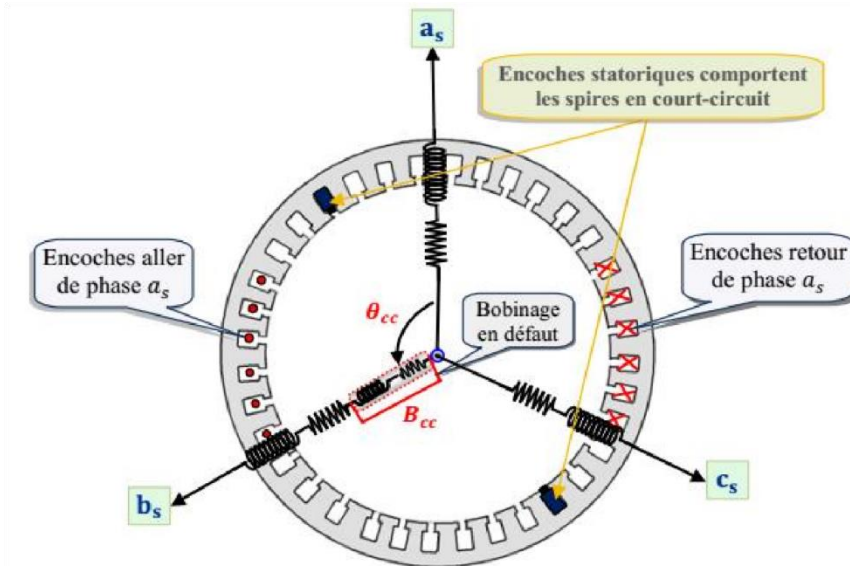


Figure II.08 : Court-circuit de spires sur la phase b_s du stator

On peut constater que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage B_{cc} , dont le nombre de spires est égal au nombre de spires en court-circuit et la direction égale à $\frac{2\pi}{3}$ (direction de la phase b_s). Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

— le rapport de court-circuit, noté $\mu_{cc_k} = \frac{N_{cc_k}}{N_s}$, égal au rapport du nombre de

spires en court-circuit (N_{cc_k}) de la $k^{ième}$ phase sur le nombre total de spires (N_s) dans une phase statorique sans défaut. Ce paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de spires en court-circuit,

- l'angle électrique, noté θ_{cc_k} , repère le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase a_s . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs $0, \frac{2\pi}{3}$ ou $\frac{4\pi}{3}$, correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s, b_s ou c_s .

Nous allons maintenant exprimer les différentes équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type court-circuit, en introduisant les paramètres électriques de la bobine en courtcircuit B_{cc} .

II.3.2 Modélisation de la machine dans le repère de Park lié au stator :

Les équations de tension et de flux de la bobine B_{cc} exprimées dans le repère biphasé d'axe α et β lié au stator sont les suivantes [29, 24,34 – 35]:

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot i_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \\ \phi_{cc} = \mu_{cc}^2 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot L_m + L_f\right) \cdot i_{cc} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot L_m [\cos(\theta_{cc}) \sin(\theta_{cc})] (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r}) \end{cases} \quad (2.18)$$

L_m et L_f : inductance magnétisante et inductance de fuite.

$$\mu_{cc} = \frac{\text{Nomre de spires en court-circuit}}{\text{Nombre de spires sur une phase saine}}$$

θ_{cc} et θ : angle du bobinage en court-circuit et angle mécanique, respectivement. :
résistance propre d'une phase statorique.

Le courant i_{cc} dans le bobinage en défaut est à l'origine du champ magnétique stationnaire par rapport au stator, dirigé selon l'axe θ_{cc} . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_{cc} . En projetant i_{cc} et ϕ_{cc} sur les axes α et β , on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot i_{cc} \text{ et } \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) \\ \sin(\theta_{cc}) \end{bmatrix} \cdot \phi_{cc} \quad (2.19)$$

Les relations de l'équation 2.18 deviennent des relations entre des vecteurs stationnaires par rapport au stator. Ainsi, le modèle global de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrit : pour le stator :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_s} = R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (2.20)$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \underline{u}_{\alpha\beta_r} = 0 = R_r \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} - \omega \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) \end{cases} \quad (2.21)$$

— et pour le bobinage en défaut :

$$\begin{cases} 0 = \mu_{cc} \cdot R_s \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} + \frac{d}{dt} \phi_{\alpha\beta_{cc}} \\ \Phi_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \left[L_m \cdot \left(\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \right] \end{cases} \quad (2.22)$$

Avec $\underline{u}_{\alpha\beta_s}$ et $\underline{u}_{\alpha\beta_r}$: tensions statoriques et rotoriques sur les deux axes α et β . R_r est la résistance propre d'une phase rotorique et ω_m la pulsation mécanique.

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

Par analogie avec le schéma équivalent ramenée au primaire des transformateurs et en négligeant le terme en L_f devant L_m dans l'expression du flux de court-circuit (équation 2.22), les équations de flux de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{\alpha\beta_s} = \underline{\phi}_\alpha + \underline{\phi}_f + \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_f \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_s} + L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \underline{\tilde{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_r} = \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} = L_m \cdot (\underline{i}_{\alpha\beta_s} + \underline{i}_{\alpha\beta_r} - \underline{\tilde{i}}_{\alpha\beta_{cc}}) \\ \underline{\phi}_{\alpha\beta_0} \approx \mu_{cc} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{\phi}_{\alpha\beta_m} \end{cases} \quad (2.23)$$

Avec

$$\underline{\tilde{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mu_{cc} \cdot \underline{i}_{\alpha\beta_{cc}} \text{ et } \underline{\phi}_{\alpha\beta_{cc}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \underline{\phi}_\alpha \alpha\beta_{cc}$$

$\underline{\phi}_{\alpha\beta_m}$ et $\underline{\phi}_{\alpha\beta_f}$: flux magnétisant et flux de fuite statorique.

Ainsi, l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\underline{\tilde{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \frac{d\phi_{\alpha\beta_m}}{dt} \quad (2.24)$$

D'après cette équation, la bobine en défaut se ramène à un simple quadripôle résistif, non équilibré, mis en parallèle avec l'inductance magnétisante.

L'existence de la matrice (θ_{cc}) fait que la représentation d'état dans le repère du stator reste complexe. En négligeant les chutes de tension dues à R_s et L_f devant les tensions d'entrée $\underline{u}_{\alpha\beta_s}$, on peut approcher les tensions aux bornes du quadripôle de court-circuit par les tensions statoriques. Les courants de ligne sont alors la somme des courants dus au court-circuit et des courants consommés par le modèle classique de Park. Ainsi, il devient possible d'exprimer simplement l'équation du bobinage en défaut dans le repère statorique :

$$\underline{\tilde{i}}_{\alpha\beta_{cc}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu_{cc}}{R_s} \cdot Q(\theta_{cc}) \cdot \underline{u}_{\alpha\beta_s} \quad (2.25)$$

La figure II. 09 représente le schéma équivalent de la machine asynchrone en régime dynamique à fuites totalisées au stator, tenant compte du défaut de court-circuit.

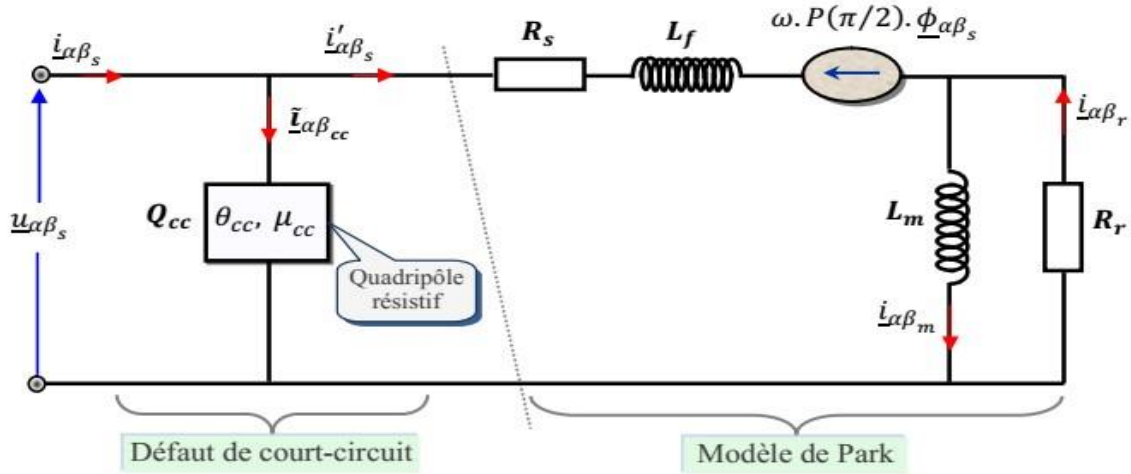


Figure II.09 : Modèle de court-circuit dans le repère lié au stator

II.3.3 Généralisation du modèle de défaut statorique :

Très simple à implanter car exprimé dans le repère de Park lié au rotor, le modèle de défaut stator que nous venons de présenter offre l'avantage d'expliquer le défaut à travers un quadripôle résistif dédié au bobinage en défaut. Par contre, il est inadapté dans le cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases. En effet, cette représentation n'est valide que dans le cas d'un défaut sur une seule phase, le quadripôle de court-circuit se chargeant alors d'expliquer le défaut à travers les deux paramètres θ_{cc} et μ_{cc} . En présence de courts-circuits sur plusieurs phases, ce modèle risque de traduire le défaut par des paramètres aberrants, vu qu'il ne tient compte que d'un seul bobinage.

Pour y remédier, ce modèle est généralisé, associant ainsi à chaque phase du stator un quadripôle de court-circuit qui prend en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut [24]. Ainsi, en présence de plusieurs courtscircuits, chaque quadripôle permet le diagnostic d'une phase en surveillant la valeur du paramètre μ_{cc} et le simple dépassement d'un seuil permet de détecter la présence d'un déséquilibre au stator.

Le mode différentiel représenté par le quadripôle Q_{cc} étant indépendant de la dynamique du mode commun, il serait judicieux de généraliser le modèle de défaut au cas d'un défaut simultané sur plusieurs phases en associant à chaque phase un quadripôle de court-circuit. Comme les trois phases sont repérées par les angles 0 , $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ il suffit donc de définir trois bobinages de court-circuit dont les rapports sont respectivement μ_{cc1} , μ_{cc2} , μ_{cc3} correspondant aux phases

a_s , b_s et c_s du stator [37-38]. Ce qui revient à mettre en parallèle trois quadripôles résistifs Q_{cc_k} prenant en charge l'explication d'éventuels bobinages en défaut.

Chaque quadripôle sera parcouru par un courant $\tilde{I}_{dq_{cc_k}}$ dont l'expression est la suivante :

$$\tilde{I}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.26)$$

(θ_{cck}): Matrice situant l'angle du bobinage en court-circuit (si le court-circuit se produit sur la phase a_s (resp. b_s et c_s) alors l'angle est égal à 0 rad (resp. $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$).

La figure II. 10 donne le schéma électrique équivalent de la machine asynchrone en régime transitoire dans le repère de Park avec fuites totalisées au stator, en tenant compte d'un éventuel défaut de court-circuit sur une ou plusieurs phases.

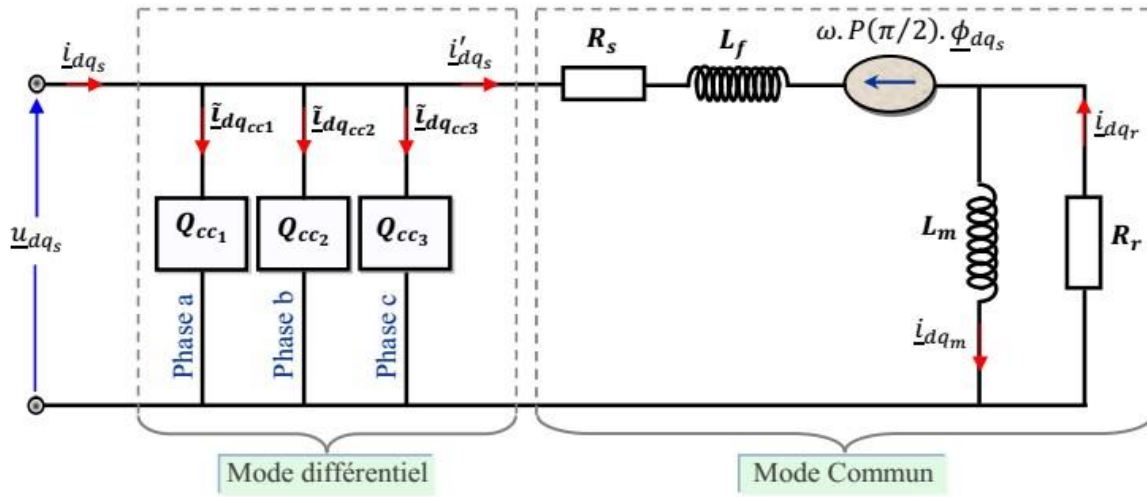


Figure II.10 : Modèle électrique de la machine en présence de défauts dans les trois phases statoriques. A présent, les angles de court-circuit θ_{cck} sont connus, ce qui permet de diagnostiquer chaque phase indépendamment en surveillant la valeur du rapport μ_{cck} et le simple dépassement d'un seuil permet de signaler la présence d'un déséquilibre sur celle-ci. Le modèle global de défaut statorique sera donc paramétrisé par 7 termes $\{R_s, R_r, L_f, \mu_{cc1}, \mu_{cc2}, \mu_{cc3}\}$.

Dans un référentiel noté (x) tournant à une vitesse ω_a par rapport au stator de la machine asynchrone, l'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut de court-circuit statorique s'écrit [29,24] :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s}^{(x)} = R_s \cdot \dot{i}_{dq_s}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s}^{(x)} + \omega_a \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_s}^{(x)} = (L_f + L_m) \cdot \dot{i}_{dq_s}^{(x)} + L_m \cdot \dot{i}_{dq_r}^{(x)} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \dot{i}_{dq_r}^{(x)} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r}^{(x)} + (\omega_a - \omega) \cdot P \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} \\ \underline{\phi}_{dq_r}^{(x)} = L_m \cdot (\dot{i}_{dq_s}^{(x)} + \dot{i}_{dq_r}^{(x)}) \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\underline{i}_{dq_s}^{(x)} = \underline{i}_{dq_s}^{(x)} + \underline{l}_{dq_{cc}}^{(x)} = \underline{i}_{dq_s}^{\prime(x)} + \sum_{k=1}^3 \underline{l}_{dq_{cc_k}}^{(x)} \quad (2.29)$$

$$\tilde{l}_{dq_{cc_k}}^{(x)} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} P(-\theta_a) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta_a) \quad (2.30)$$

Si on veut procéder à un diagnostic par identification paramétrique, on est obligé de se placer dans le repère du rotor. Ainsi les équations de tensions et de flux de la machine asynchrone en présence d'un défaut statorique de type courtcircuit, dans un référentiel lié au rotor, deviennent : Mode commun (stator et rotor) :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s}' + \frac{d}{dt} \phi_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{dq_s} \\ \phi_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}_{dq_s}' + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \phi_{dq_r} \\ \phi_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s}' + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.32)$$

Mode différentiel (courants de court-circuit) :

$$\tilde{l}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc_k}}{3R_s} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.33)$$

Courant résultant

$$\underline{i}_{dq_s} = \underline{i}_{dq_s}' + \tilde{l}_{dq_{cc}} = \underline{i}_{dq_s}' + \sum_{k=1}^3 \underline{l}_{dq_{cc_k}} \quad (2.34)$$

II.3.4 Simulation du modèle de défaut statorique :

En considérant les dynamiques des flux rotoriques ϕ_{dq_r} , des courants statoriques i_{dq_s} et les dynamiques électromécaniques (ω, θ) , le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) + H(\underline{x}) \cdot \underline{u} \end{cases} \quad (2.35)$$

Avec :

$$\underline{x} = [i_{d_s}' \quad i_{q_s}' \quad \phi_{d_r} \quad \phi_{q_r} \quad \omega \quad \theta]^T : \text{vecteur d'état}$$

$\underline{U} = [u_{ds} \ u_{qs} \ c_r]^t$ et $\underline{y} = [i_{ds} \ i_{qs} \ \omega]^t$: entrées et sorties du système, respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_r}{L_f} \cdot i'_{ds} + \omega \cdot i'_{qs} + \frac{R_r}{L_m \cdot f} \cdot \phi_{dr} + \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{qr} \\ -\omega \cdot i'_{ds} - \frac{R_s+R_r}{L_f} \cdot i'_{qs} - \frac{\omega}{L_f} \cdot \phi_{dr} + \frac{R_r}{L_m \cdot L_f} \cdot \phi_{ar} \\ R_r \cdot i'_{ds} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{dr} \\ R_r \cdot i'_{qs} - \frac{R_r}{L_m} \cdot \phi_{ar} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i'_{qs} \cdot \phi_{dr} - i'_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \end{bmatrix}, g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$h(x) = \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}, H(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \cdot \sum_{k=1}^3 \mu_{cc_k} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix}$$

La figure II.11 représente notre modèle de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink construit à partir des équations électriques. Les variables d'entrée sont les trois tensions u_a, u_b, u_c et le couple de charge C_r et les paramètres de défaut $\{N_{cc1}, N_{cc2}, N_{cc3}\}$ correspondant respectivement à un court-circuit sur les phases a_s, b_s ou c_s .

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La simulation est effectuée pendant une durée de 5 sec de la manière suivante :

À l'instant $t = 1$ sec la machine est soumise à un couple résistant nominal :

$$C_r = 5N.m.$$

En régime établi, on introduit à l'instant $t = 3$ sec, un défaut de type court-circuit de 3.88 % spires sur la phase a_s (ce qui correspond respectivement à $u_{cc1} = 3.88 \% \%$,

$$u_{cc2} = 0 \text{ et } u_{cc3} = 0).$$

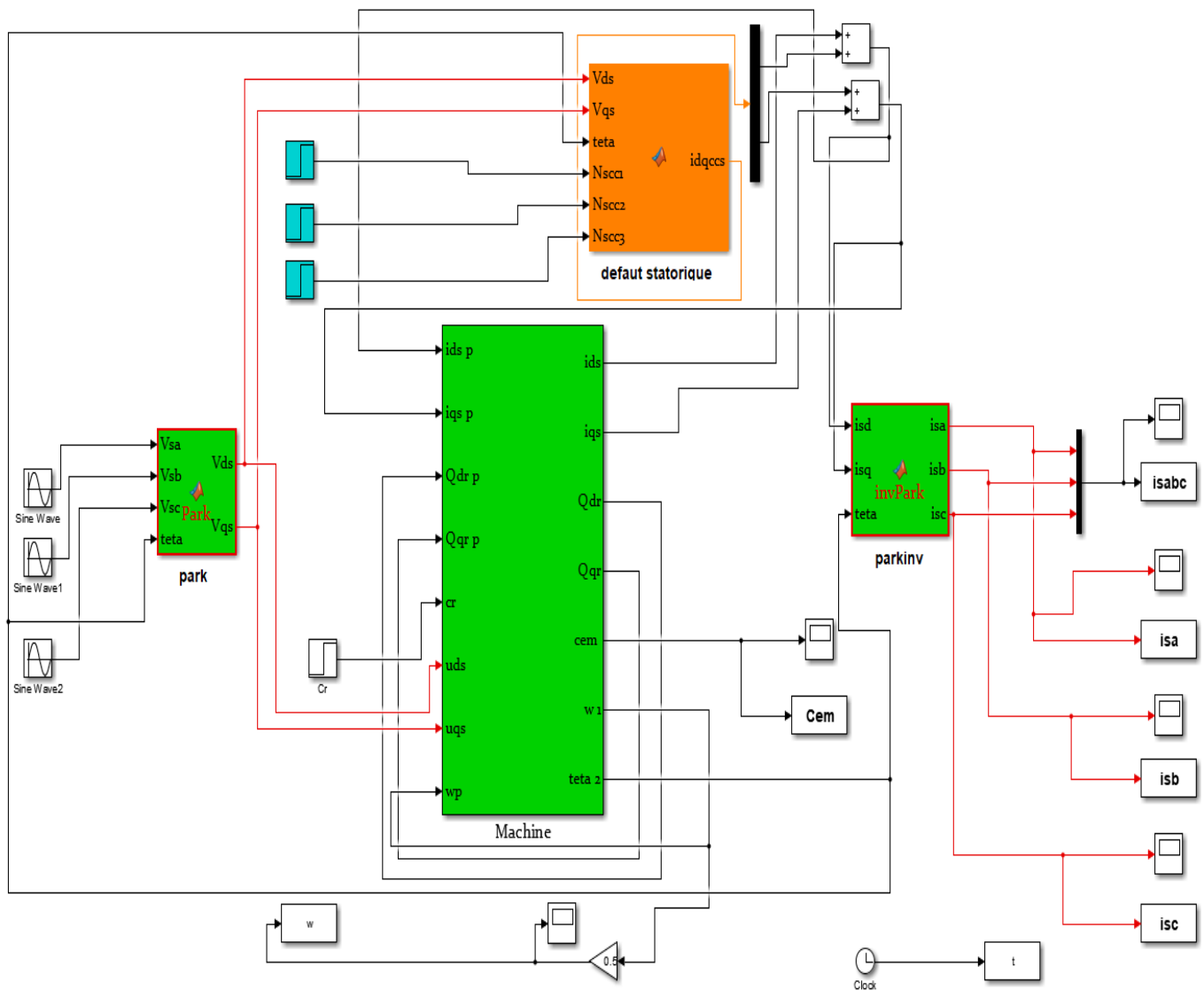


Figure II.11 : Modèle Matlab/Simulink de la machine avec défaut statorique

II.3.5 Résultats de simulation du modèle de défaut statorique :

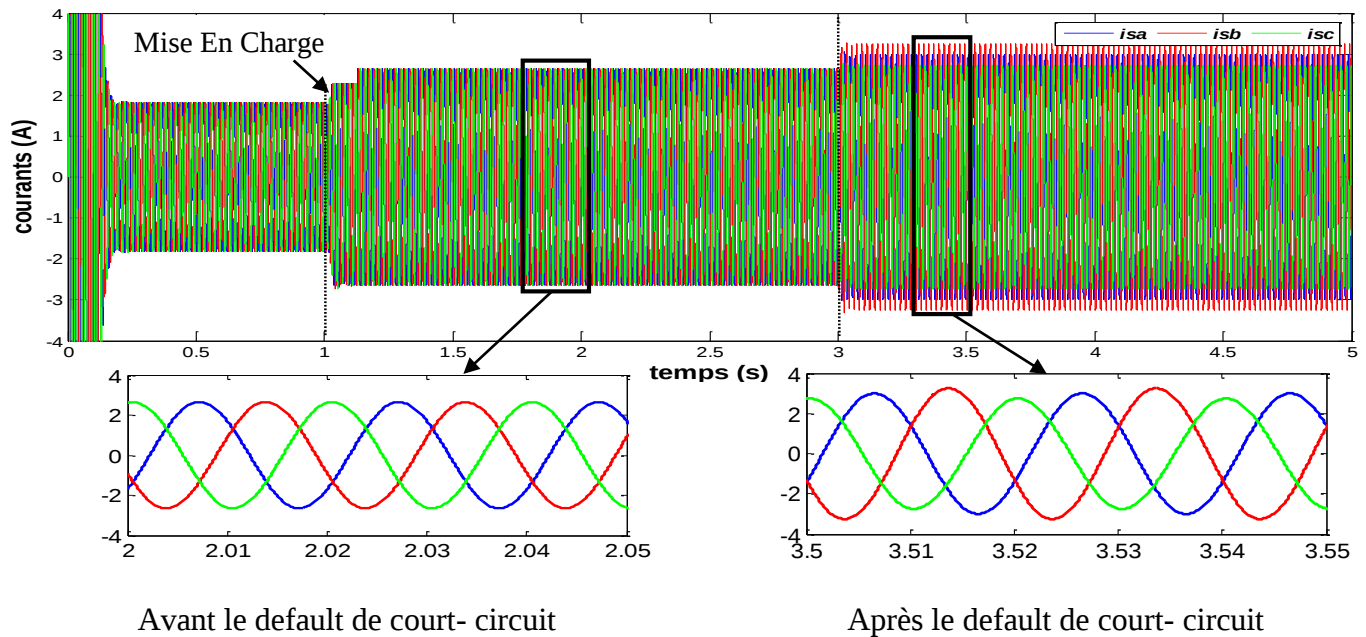


Figure II.12 : Courbe des courants avec défaut statorique.

La figure II.12 représente la comparaison des trois courants statoriques pour un défaut de court-circuit de 3.88 % spires dans la phase b_s . À $t=3$ sec un déséquilibre se manifeste sous forme d'une augmentation importante du courant de la phase où s'est produit le défaut (phase b_s) et d'une augmentation moins importante pour les deux autres phases (phases a_s etc.). Cette augmentation se produit suivant une permutation circulaire directe.

Nous avons aussi remarqué que plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus forte est l'augmentation des courants. En plus du déséquilibre du courant, nous remarquons aussi un déséquilibre au niveau des déphasages illustré par la figure II.12. Ce déphasage n'est plus égal à 120° (cas de fonctionnement sain).

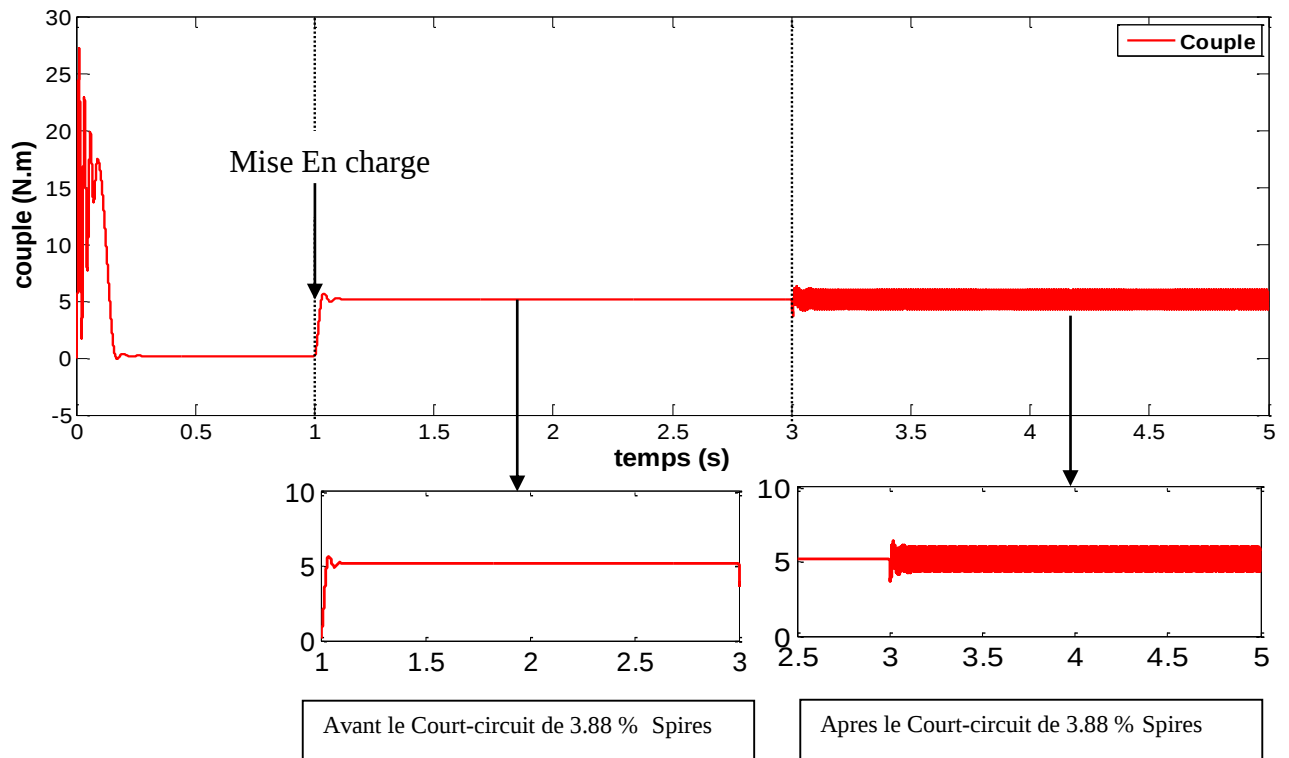


Figure II.13 : Courbe de couple avec défaut statorique.

La figure II.13, représentant l'évolution du couple électromagnétique, révèle que lors de l'application du défaut de court-circuit entre spires d'une même phase, une nouvelle interaction entre la bobine court-circuitée et le rotor s'ajoute à celle qui existe dans le régime de fonctionnement. Ainsi, les ondulations du couple électromagnétique sont à l'origine de cette interaction créée dans l'entrefer. Ces ondulations croissent avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, sans que cela change la valeur de la moyenne du couple par rapport à sa valeur en régime sain.

Les résultats de simulation montrent que le défaut de court-circuit au stator affecte aussi la vitesse de rotation (figure II.14).

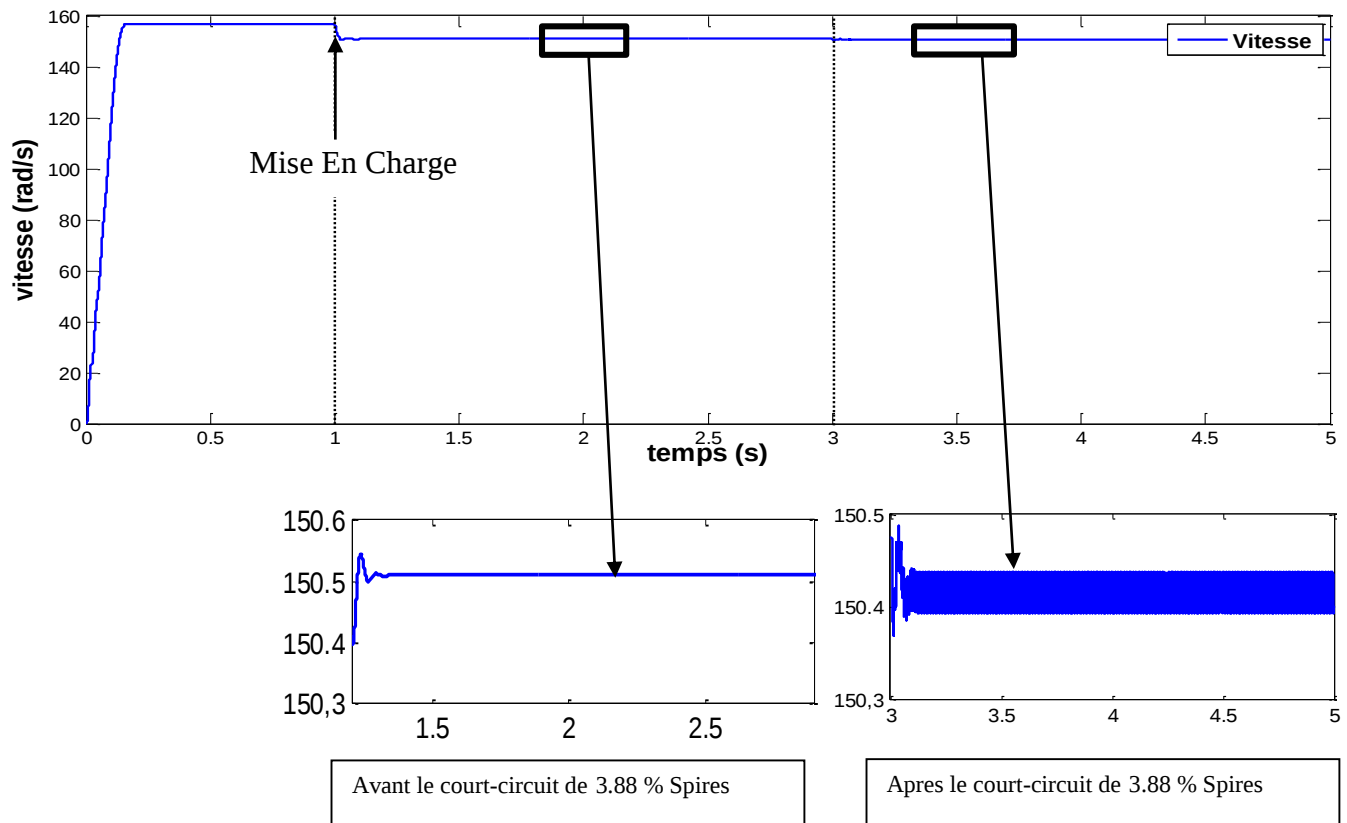


Figure II.14 : Courbe de vitesse avec défaut statorique.

II.3.6 Modèle de défauts rotoriques :

Plusieurs modèles de rupture de barres sont proposés dans la littérature. Dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques, la mise au point d'un modèle est surtout motivée par les possibilités de simuler ces défauts. Les références [38,39] proposent une modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil faisant intervenir les paramètres électriques des barres et de l'anneau.

Ces modèles offrent la possibilité de simuler une rupture de barres en réduisant simplement leur nombre total ou en augmentant leur résistance. Outre leur complexité, l'inconvénient de ces modèles est qu'ils nécessitent une connaissance approfondie des paramètres électriques de la machine. Dans le cas d'une approche paramétrique, ce modèle est inapproprié en raison du nombre élevé des paramètres qui le régissent.

Comme dans le cas de la modélisation des courts-circuits au stator, le modèle de défaut rotorique, que nous allons présenter dans ce paragraphe, explique le déséquilibre à travers des paramètres qui sont l'image du défaut présent dans la machine. Ces paramètres permettent ainsi de quantifier et de localiser le défaut.

II.4 Modélisation du rotor en défaut :

La figure II.15 illustre la modélisation conventionnelle du rotor par dipôles élémentaires avec une barre cassée [40, 37].

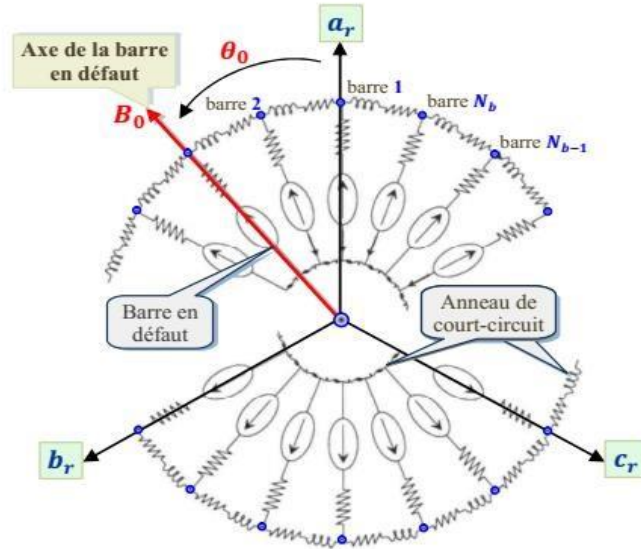


Figure II.15 : Modélisation par dipôles élémentaires du rotor en défaut

Comme pour un défaut statorique, une rupture de barre rotorique est à l'origine d'un champ stationnaire H_0 par rapport au rotor, dirigé selon l'angle θ_0 de la barre en défaut. Un paramètre supplémentaire η_0 est naturellement introduit pour quantifier le défaut rotorique [35,6]. Le rotor, dans le repère biphasé, comporte donc un troisième bobinage court-circuité du fait de la cage d'écureuil, parcouru par un courant de défaut fictif i_0 et dont le nombre de spires fictives est proportionnel au taux de défaut. Pour tenir compte de cette anomalie de champ, ce bobinage doit obligatoirement avoir la même direction que la barre en défaut. Par conséquent, le mode différentiel introduit comporte deux paramètres de défaut permettant la détection et la localisation des barres cassées : l'angle électrique noté θ_0 repérant le bobinage en défaut. Ce paramètre permet la localisation de la barre en défaut.

— Le rapport de défaut noté η_0 égal au rapport du nombre de spires en défaut sur le nombre total de spires dans une phase triphasée rotorique fictive sans défaut. Ce Paramètre permet de quantifier le déséquilibre et d'obtenir le nombre de barres cassées.

Le nombre de spires au rotor étant fictif, pour un rotor de N_b barres, si on considère une spire rotorique comme étant une maille constituée de deux barres court-circuitées par deux portions d'anneaux [35,1], alors le nombre total de spires rotoriques est égal au nombre de barres au rotor. Une phase fictive est donc constituée de $N_b/3$ barres. Pour N_{bc} barres cassées sur une phase, l'expression du rapport de défaut η_0 est donnée par :

$$\eta_0 = \frac{3 \cdot N_{bc}}{N_b} \quad (2.36)$$

II.4.1 Modélisation du défaut de rupture des barres :

Les équations de tension et de flux de la bobine en défaut B_0 exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes [35] :

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 \cdot R_r \cdot i_0 + \frac{d\phi_0}{dt} \\ \phi_0 = \frac{2}{3}\eta_0^2 \cdot L_r \cdot i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot L_r \cdot [\cos(\theta_0)\sin(\theta_0)] \cdot (i_{dq_s} + i_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.37)$$

Avec

$$\mu_{cc} = \frac{\text{Nomre de spires fictives en défaut}}{\text{Nombre total de spires fictives sur une phase}}$$

θ_0 : angle repérant le défaut

Le courant i_0 dans le bobinage représentant le défaut est donc à l'origine du champ magnétique H_0 stationnaire par rapport au rotor et dirigé selon l'axe θ_0 . Ce champ magnétique est à l'origine du flux ϕ_0 . En projetant i_0 et ϕ_0 sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\underline{i}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \cdot i_0; \underline{\phi}_{dq_0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) \\ \sin(\theta_0) \end{bmatrix} \cdot \phi_0 \quad (2.38)$$

La relation 2.37 devient une relation entre des vecteurs stationnaires par rapport au rotor.

Ainsi, dans le repère rotorique, l'ensemble des équations de la matrice au stator, au rotor et au bobinage B_0 est donné par :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = L_f \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.40)$$

$$\begin{cases} 0 = \eta_0 \cdot R_r \cdot \underline{i}_{dq_0} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_0} \\ \underline{\phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot L_m \cdot Q(\theta_0) \cdot \left(\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0} \right) \end{cases} \quad (2.41)$$

Avec :

$$Q(\theta_0) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix} \text{ et } P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

Par analogie avec le schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs, les équations de flux de la machine asynchrone en défaut rotorique deviennent :

$$\begin{cases} \underline{\phi}_{dq_s} = \underline{\phi}_{dq_f} + \underline{\phi}_{dq_m} = L_f \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \underline{\phi}_{dq_r} = \underline{\phi}_{dq_m} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r} - \tilde{\underline{i}}_{dq_0}) \\ \tilde{\underline{\Phi}}_{dq_0} = \eta_0 \cdot Q(\vartheta_0) \cdot \underline{\phi}_{dq_m} \end{cases} \quad (2.42)$$

Avec:

$$\tilde{\underline{i}}_{dq_0} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \eta_0 \cdot \underline{i}_{dq_0}; \underline{\Phi}_{dq_0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \underline{\phi}_{dq_m}$$

De même, l'équation de tension du bobinage en défaut ramenée au primaire s'écrit :

$$\underline{l}_{dq_0} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta_0}{R_r} \cdot Q(\theta_0) \cdot \frac{d\phi_{dq_m}}{dt} = R_0^{-1} \cdot \frac{d\phi_{dq_m}}{dt} \quad (2.43)$$

Le schéma équivalent de la machine asynchrone en défaut de rupture de barres dans le repère de Park lié au rotor est représenté par la figure II. 16.

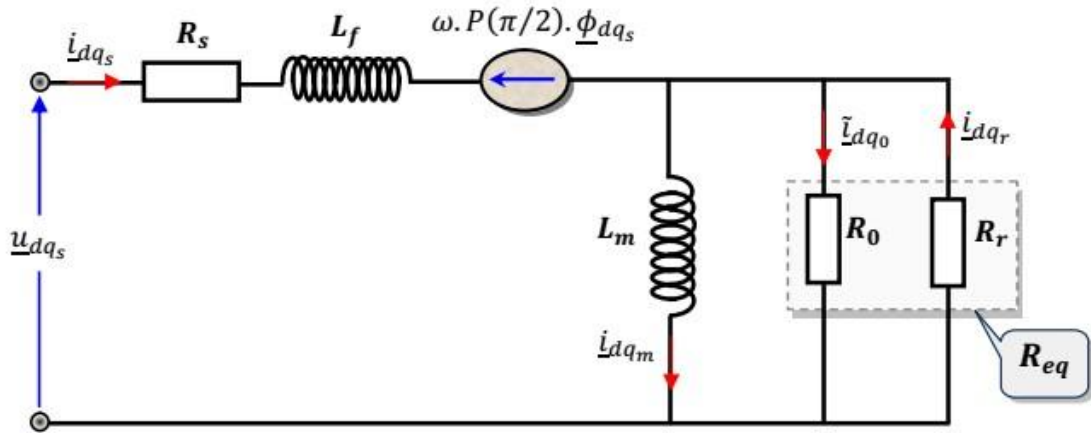


Figure II.16 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone dans le repère de Park

II.4.2 Schéma électrique équivalent :

Le schéma équivalent peut être représenté en considérant la résistance R_{eq} équivalente et cela par la mise en parallèle de la résistance R_r et la résistance de défaut R_0 :

$$R_{eq}^{-1} = R_r^{-1} + R_0^{-1} = R_r^{-1} + \frac{2}{3} \cdot R_r^{-1} \cdot Q(\theta_0) \quad (2.44)$$

En inversant pour obtenir l'expression de la matrice équivalente :

$$R_{eq} = R_r + R_{\text{déf}} = R_r - \frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \quad (2.45)$$

Avec : $\alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$

Ainsi on obtient un schéma équivalent avec la mise en série de la résistance R_r et de la matrice de défaut $R_{\text{déf}}$

La figure II. 17 illustre le schéma équivalent de la machine asynchrone avec un défaut rotorique en régime dynamique avec fuites ramenées au stator, dans le repère rotorique. La rupture de barre au rotor se ramène à un simple quadripôle résistif $R_{\text{déf}}$ mis en série avec la résistance rotorique.

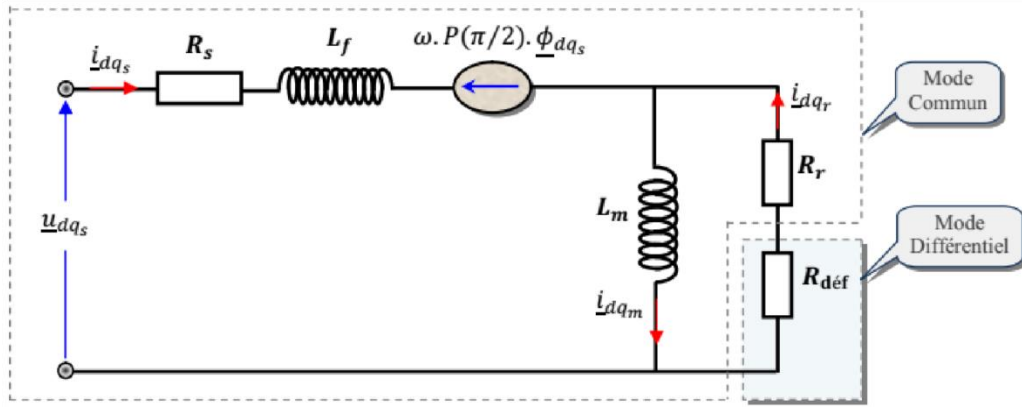


Figure II.17 : Modèle de défaut rotorique de la machine asynchrone

La distinction entre les résistances R_r saine et de défaut $R_{\text{déf}}$ se fait à travers :

$$R_r = R_r I_2 = R_r \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et

$$R_{\text{déf}} = -\frac{\alpha}{1+\alpha} \cdot R_r \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_0)^2 & \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) \\ \cos(\theta_0) \cdot \sin(\theta_0) & \sin(\theta_0)^2 \end{bmatrix}$$

On remarque que la résistance de défaut, au contraire de la résistance saine, possède des termes de couplage.

Si la machine est saine ($\alpha = 0$), ce qui correspond à $R_{\text{déf}}$ nulle, ce qui revient à court-circuiter le quadripôle de défaut, le schéma équivalent correspond donc à celui du modèle classique de Park lié au rotor.

Lorsque le paramètre α est non nul, la résistance $R_{\text{déf}}$ introduit un déséquilibre dans les grandeurs rotoriques ainsi que des termes de couplage sur les axes d et q du rotor. Par conséquent, de nouvelles composantes dont la pulsation est proportionnelle au glissement de la machine sont introduites, et se retrouvent de ce fait dans les courants statoriques, traduisant ainsi un déséquilibre rotorique.

L'angle θ_0 permet d'effectuer un repérage absolu du bobinage en défaut par rapport à l'axe d . En effet, les courants réels induits dans les encoches rotoriques étant N_p phasés, l'angle θ_0 est donc fixé par la position initiale du rotor par rapport au stator. Pour localiser une barre cassée, il faut donc imposer au rotor une référence qui permet de repérer les barres selon l'angle θ_0 : il suffit pour cela d'effectuer la mesure de la position du rotor grâce à un capteur de position.

L'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut rotorique, dans un référentiel lié au rotor, s'écrit :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \cdot \underline{i}_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}_{dq_s} + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.46)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_r \cdot I_2 + R_{\text{déf}} \\ R_{\text{déf}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \end{cases} \quad (2.48)$$

II.4.3 Simulation du modèle de défauts rotoriques :

Le système global simulé est obtenu en introduisant l'équation électromécanique de la machine. Ainsi, la machine asynchrone en défaut de rupture de barre peut être décrite par le système d'équations différentielles :

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) \end{cases} \quad (2.49)$$

Avec :

$\underline{x} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$: Vecteur d'état

$\underline{u} = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad C_r]^T$ et $\underline{y} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$: entrées et sorties du système,

Respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\left((R_s \cdot I + R_{eq}) \cdot L_f^{-1} + \omega \cdot P(\pi/2)\right) \cdot \underline{i}_{dq_s} + (R_{eq} \cdot L_m^{-1} - \omega \cdot P(\pi/2)) \cdot L_f^{-1} \cdot \underline{\phi}_{dq} \\ R_{eq} \cdot \underline{i}_{dq_s} - R_{eq} \cdot L_m^{-1} \cdot \underline{\phi}_{dq_r} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i_{qs} \cdot \phi_{dr} - i_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dq_s} \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$[R_{eq}] = R_r \cdot \left(I + \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot Q(\theta_0)\right), \alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$$

La figure II.18 montre une représentation visuelle des fichiers Simulink utilisés pour la simulation de la machine asynchrone en défaut de rupture de barre. L'intérêt de cet outil est de disposer d'un environnement permettant de mettre en œuvre rapidement et simplement la simulation de l'entraînement électrique, avec différents défauts de rupture des barres au rotor.

Les variables d'entrée de ce modèle, sont les trois tensions $\{u_a, u_b, u_c\}$ le couple de charge C_{ret} et les paramètres de défaut de rupture des barres rotorique $\{Nbc1, Nbc2, Nbc3\}$

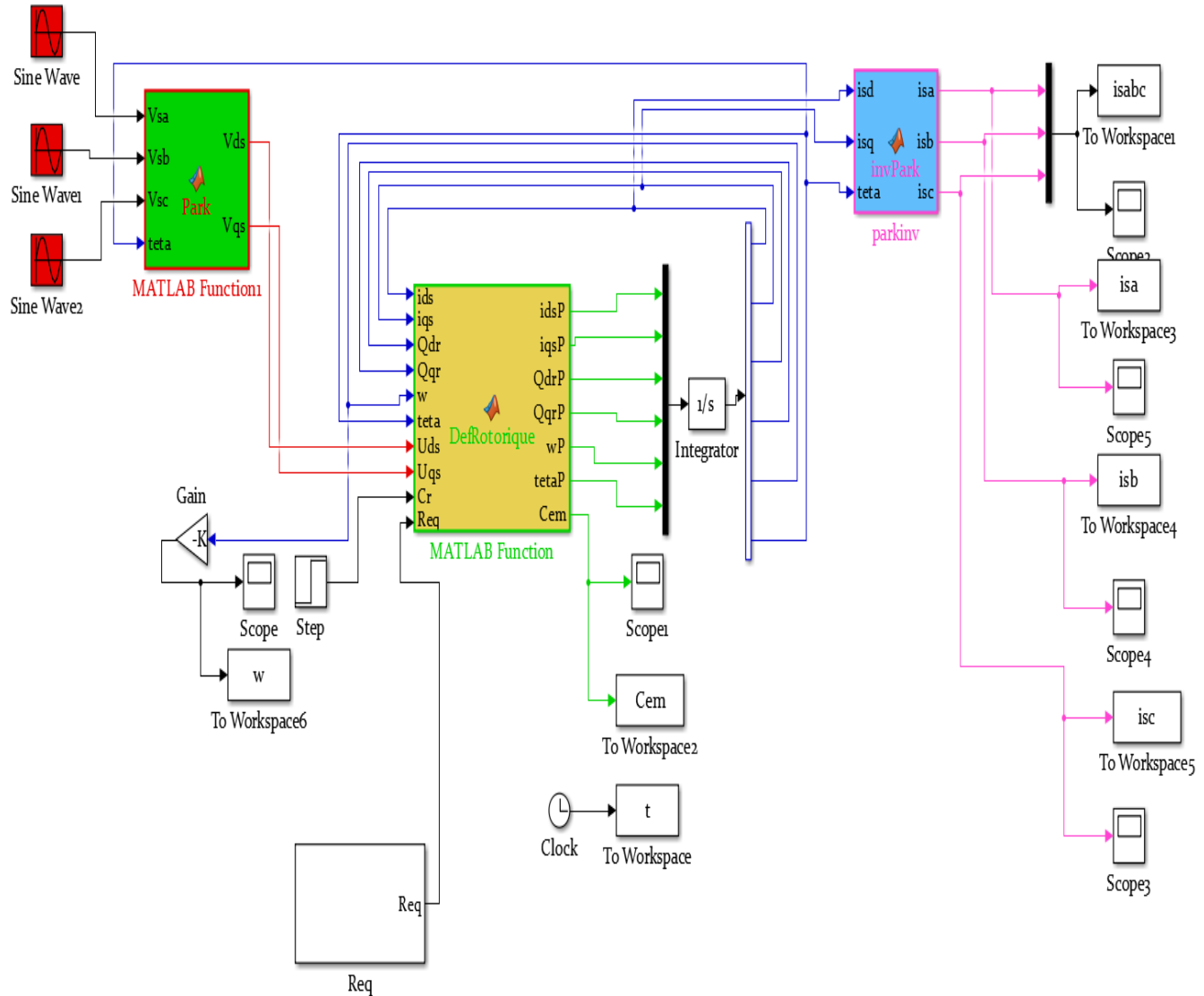


Figure II.18 : Modèle Matlab/Simulink de la machine avec défaut rotorique

II.4.4 Résultats de simulation du modèle de défauts rotoriques :

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibrée. La simulation est menée sur une durée de 5 sec de la manière suivante :

- À l'instant $t = 0.5$ sec la machine est soumise à un couple résistant $C_r = 5N.m$,
- À l'instant $t = 2$ sec nous simulons la rupture de la première barre,
- Par la suite, la rupture de la deuxième barre se produit à $t = 4$ sec pour mettre en évidence l'effet du nombre de barres rompues

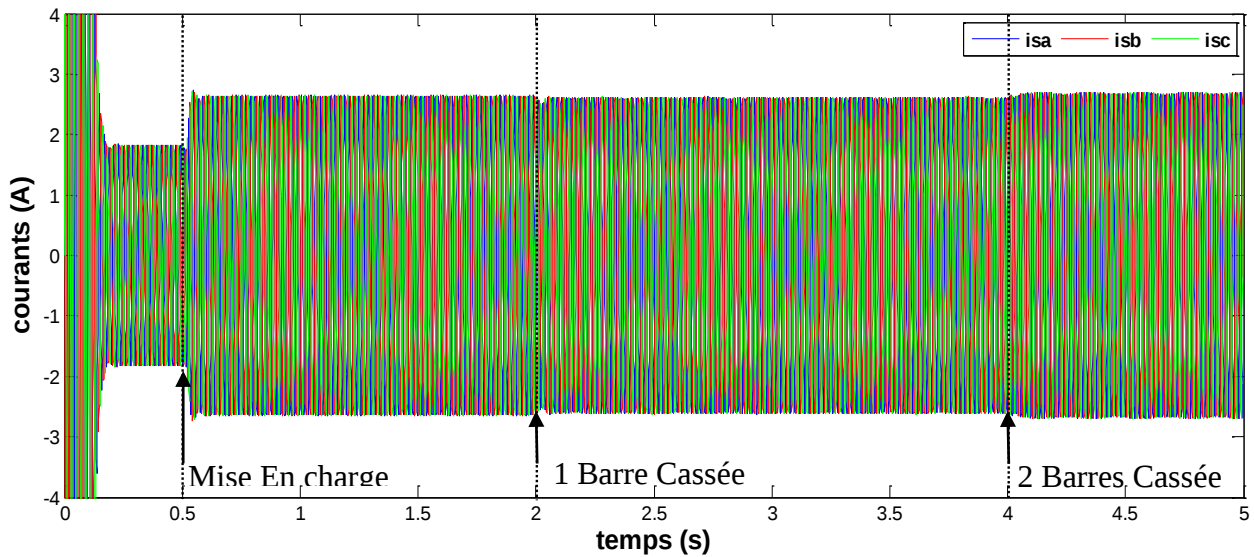


Figure II.19 : Courbe des courants avec défaut rotorique.

La figure II.19 représente l'évolution des courants de ligne absorbés par les phases statoriques. Comme on peut le constater, lors d'un défaut de rupture de barres au rotor, il y a apparition d'ondulations identiques sur les trois courants statoriques tout en restant toujours déphasés de 120° entre eux. Cependant, l'amplitude de cette ondulation est proportionnelle au nombre de barres cassées. Nous remarquons que l'amplitude des oscillations augmente avec l'augmentation du nombre de barres cassées.

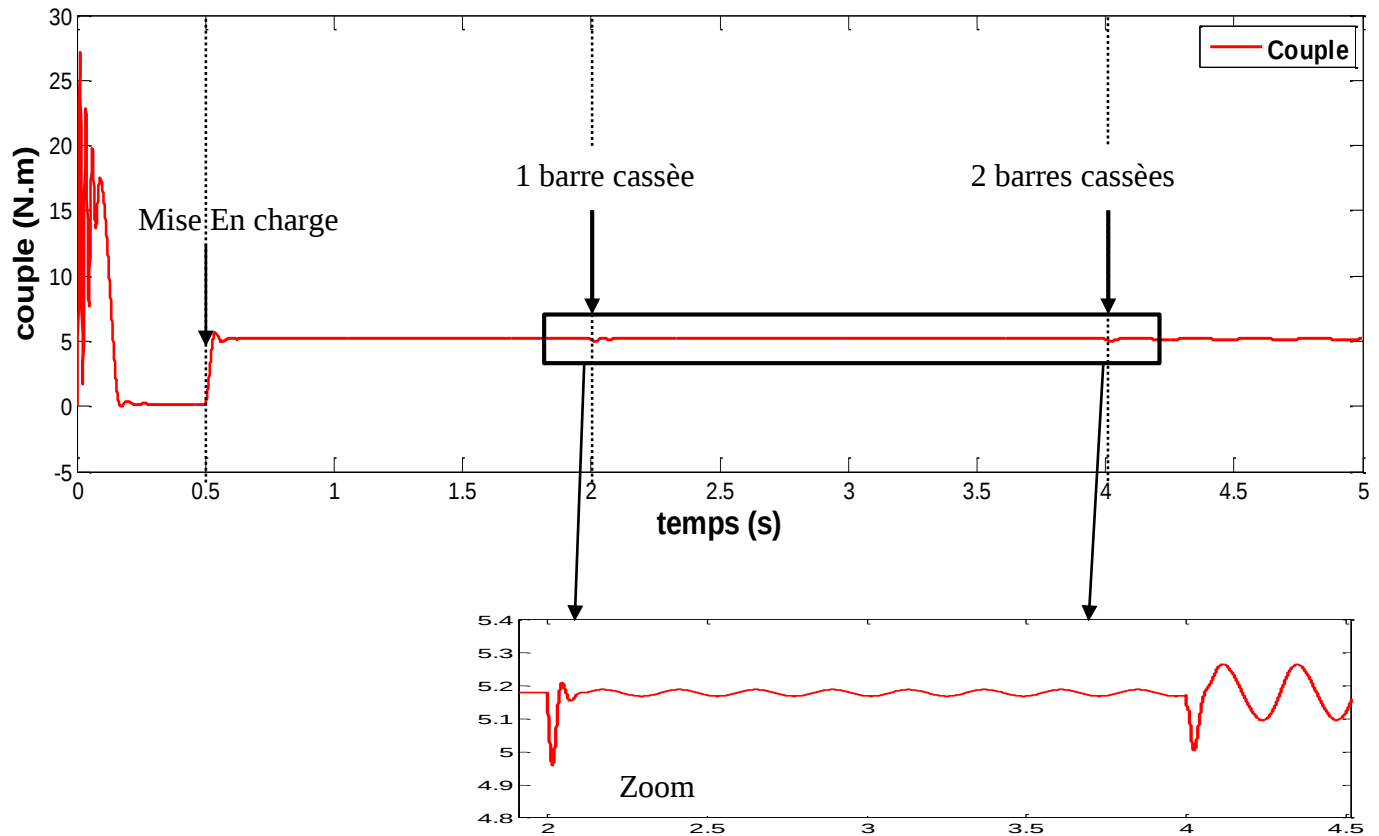


Figure II.20 : Courbe de couple avec défaut rotorique.

L'analyse du couple électromagnétique (figure II.20) montre une modification importante de son allure lorsque les défauts rotorique apparaissent. La présence d'une oscillation lorsque le rotor de la machine est sain est due à la prise en compte des harmoniques. Nous apercevons qu'une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lorsque la première barre est cassée. Nous remarquons aussi que cette modulation prend plus d'importance avec l'apparition du second défaut. En théorie, cette modulation d'amplitude a une fréquence identique à celle de la vitesse, c'est-à-dire ($2 \cdot g \cdot f_s$).

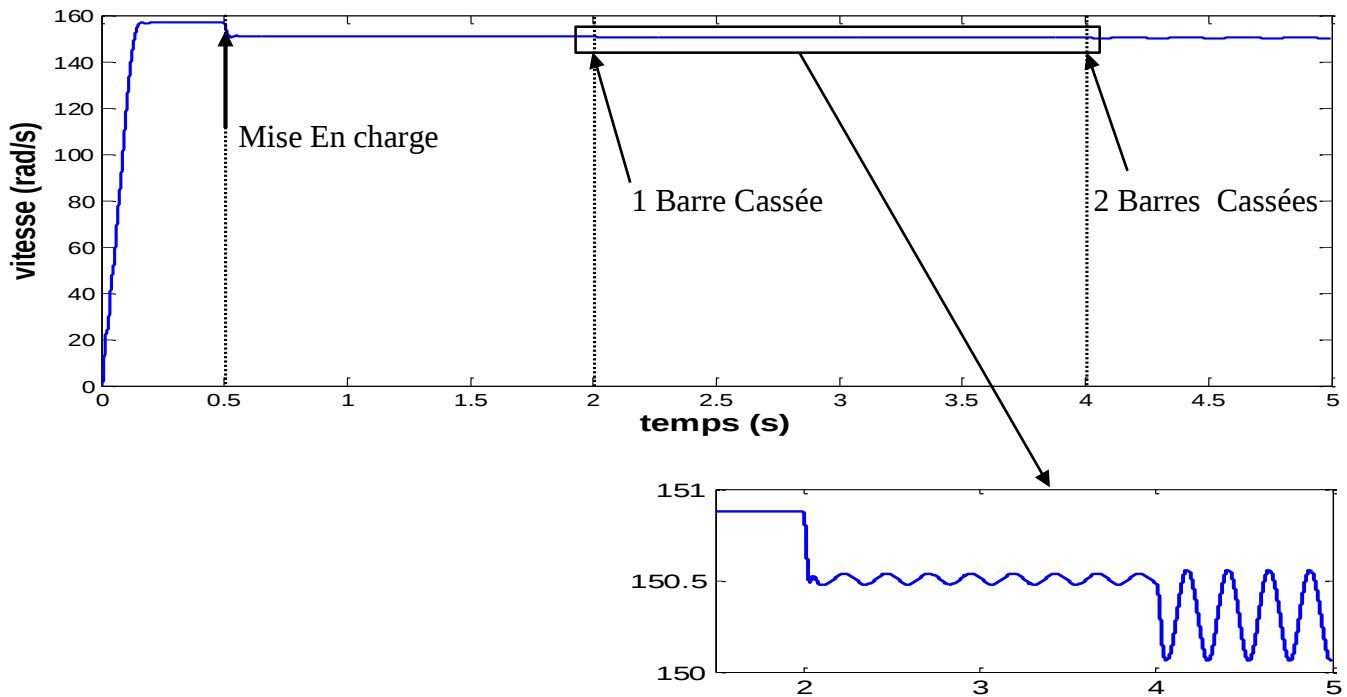


Figure II.21 : courbe de vitesse avec défaut rotorique.

En analysant la figure II.21 présentant l'évolution de la vitesse rotorique, nous remarquons l'apparition d'une légère ondulation lorsque la rupture de la première barre rotorique apparaît. Cette ondulation, qui augmente lorsque le deuxième défaut est créé, oscille à une fréquence de $(2 \cdot g \cdot f_s)$. Cette variation de vitesse est très faible car elle dépend essentiellement de l'inertie J de l'ensemble machine-charge. Plus l'inertie de l'ensemble sera grande, moins la variation de vitesse sera importante.

II.5 Modèle de défaut simultané stator/rotor :

Nous avons présenté, dans les paragraphes précédents, deux modèles de défaut de la machine asynchrone à cage. Chaque modèle est dédié à un défaut particulier : court-circuit des spires au stator et rupture de barres au rotor. En milieu industriel, les défauts intervenant en cours de fonctionnement sont rarement localisés dans une seule partie de la machine. En effet, la réaction en chaîne des incidents est fortement envisageable car le rotor, comme le stator, sont soumis au même environnement. Ainsi, il est intéressant, dans une optique de surveillance généralisée de la machine, d'envisager un diagnostic de défauts simultanés stator/rotor.

II.5.1 Modèle global de la machine asynchrone en défaut stator/rotor :

En situation de défaut combiné stator/rotor, la signature d'un défaut statorique est différente d'un défaut rotorique. En effet, un quelconque défaut statorique est à l'origine d'un champ stationnaire par rapport au stator dirigé selon l'axe de la bobine en défaut, les grandeurs qui en découlent sont alors naturellement autour des hautes fréquences (fréquence du champ tournant). Par contre, un défaut rotorique est à l'origine

d'un champ stationnaire par rapport au rotor dirigé selon l'axe de la barre en défaut. Le rotor étant mobile, les grandeurs du défaut sont alors proches des basses fréquences (fréquence de glissement).

Etant donné que les deux principaux défauts peuvent être découplés, on propose le modèle global de défaut simultané stator/rotor [24, 30] représenté sur la figure II.22.

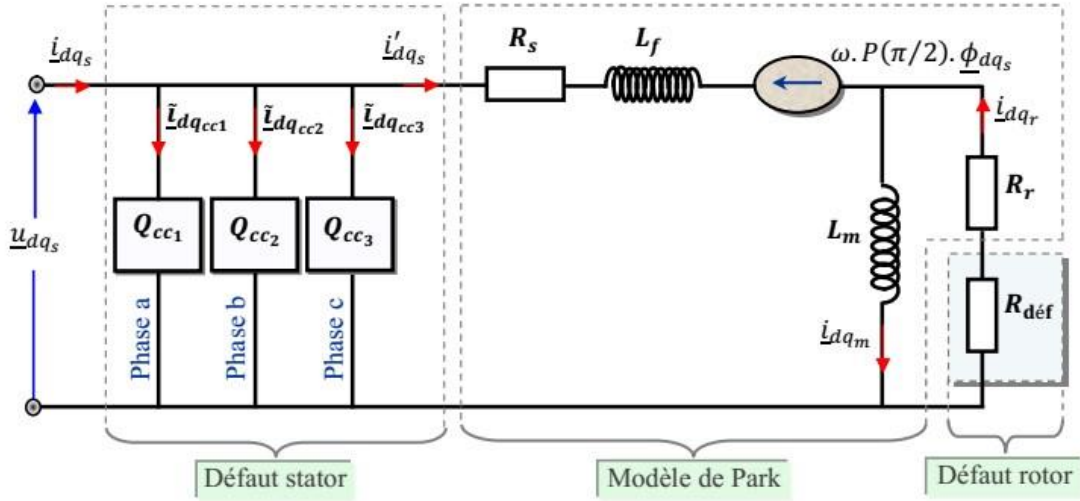


Figure II.22 : Modèle de défauts mixte stator/rotor de la machine asynchrone

Ce modèle fait intervenir le fonctionnement sain de la machine (modèle de Park), les courts-circuits de spires au stator à travers des quadripôles de court-circuit, et la rupture de barres au rotor à travers la matrice résistance de défaut.

L'ensemble des équations électriques de la machine asynchrone en défaut simultané stator/rotor, dans le repère de Park lié au rotor, s'écrit alors :

$$\begin{cases} \underline{u}_{dq_s} = R_s \underline{i}'_{dq_s} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_s} + \omega \cdot P\left(\frac{\pi}{2}\right) \underline{\phi}_{dq_s} \\ \underline{\phi}_{dq_s} = (L_f + L_m) \cdot \underline{i}'_{dq_s} + L_m \cdot \underline{i}_{dq_r} \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} 0 = R_{eq} \cdot \underline{i}_{dq_r} + \frac{d}{dt} \underline{\phi}_{dq_r} \\ \underline{\phi}_{dq_r} = L_m \cdot (\underline{i}'_{dq_s} + \underline{i}_{dq_r}) \end{cases} \quad (2.51)$$

$$\underline{i}_{dq_s} = \underline{i}'_{dq_s} + \sum_1^3 \underline{L}_{dq_{cc_k}} \quad (2.52)$$

$$\tilde{L}_{dq_{cc_k}} = \frac{2\mu_{cc}}{3R_s} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) \cdot \underline{u}_{dq_s} \quad (2.53)$$

$$\begin{cases} R_{eq} = R_r \cdot I_2 + R_{d\acute{e}f} \\ R_{d\acute{e}f} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot Q(\theta_0) \cdot R_r \end{cases} \quad (2.54)$$

Le modèle de défaut mixte stator/rotor permet la détection et la localisation de spires en court-circuit à partir des rapports μ_{cc_k} et des angles θ_{cc_k} ainsi que la quantification du nombre de barres cassées à travers le rapport η_0 . Ainsi, la connaissance de ces paramètres par identification paramétrique permet une surveillance généralisée de la machine asynchrone.

II.5.2 Simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor

En introduisant l'équation électromécanique, on écrit le modèle de la machine asynchrone avec défaut simultané stator/rotor dans le repère de Park lié au rotor

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) + g \cdot \underline{u} \\ \underline{y} = h(\underline{x}) + H(\underline{x}) \cdot \underline{u} \end{cases} \quad (2.55)$$

Avec :

$\underline{x} = [i'_{ds} \quad i'_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad \omega \quad \theta]^T$: Vecteur d'état
 $\underline{u} = [u_{ds} \quad u_{qs} \quad C_r]^T$ et $\underline{y} = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \omega]^T$: entrées et sorties du système, Respectivement

$$f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} -\left((R_s \cdot I + [R_{eq}])L_f^{-1} + \omega P(\pi/2)\right) i'_{dq_s} + ([R_{eq}]L_m^{-1} - \omega P(\pi/2))L_f^{-1} \phi_{dq_r} \\ [R_{eq}] \cdot i'_{dq_s} - [R_{eq}] \cdot L_m^{-1} \cdot \phi_{dq_r} \\ \frac{p^2}{J} \cdot (i'_{qs} \cdot \phi_{dr} - i'_{ds} \cdot \phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \cdot \omega \\ \omega \end{bmatrix}$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} h(\underline{x}) = \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{qs} \\ \omega \end{bmatrix}, H(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \frac{2}{3R_s} \cdot \sum_{k=1}^3 \mu_{cc_k} \cdot P(-\theta) \cdot Q(\theta_{cc_k}) \cdot P(\theta) & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix}$$

$$[R_{eq}] = R_r \cdot \left(I + \frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot Q(\theta_0) \right), \alpha = \frac{2}{3} \cdot \eta_0$$

La figure II.23 montre une représentation visuelle des fichiers Simulink utilisés pour la simulation de la machine asynchrone en cas de défaut combiné stator/rotor.

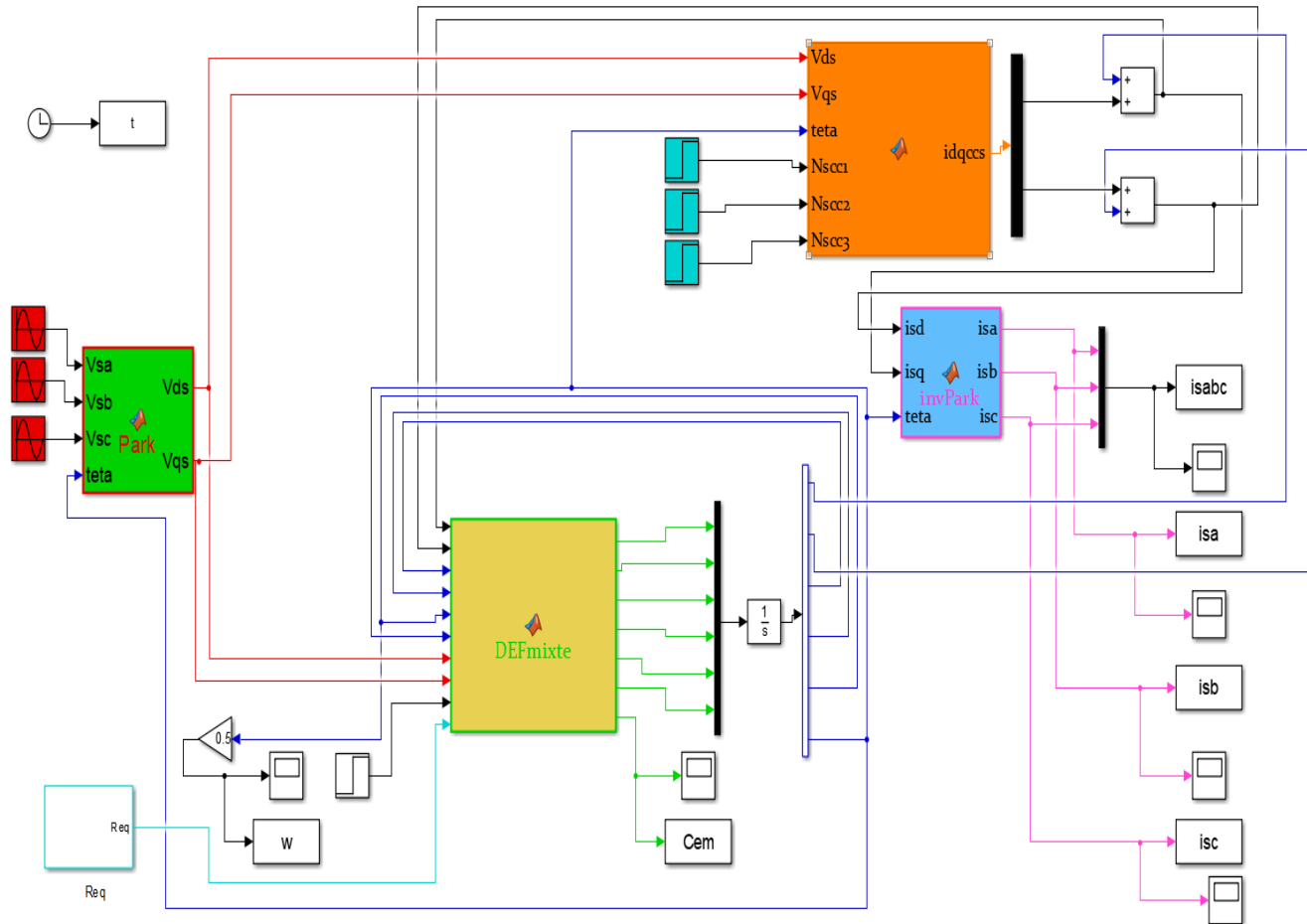


Figure II.23 : Schéma bloc de moteur avec défaut mixte.

II.5.3 Résultats de simulation du modèle de défaut simultané stator/rotor :

La simulation est effectuée pour une durée de 5 sec à l'instant $t = 1$ sec, nous procédons l'application d'un échelon de couple résistant de 5 N.m. Pour simuler un défaut simultané stator/rotor, on introduit en régime établi une rupture d'une barre à l'instant $t = 2$ sec et deux barres à l'instant $t = 4$ sec, un court-circuit de 3.88 % spires sur la phase as à l'instant $t = 3$ sec.

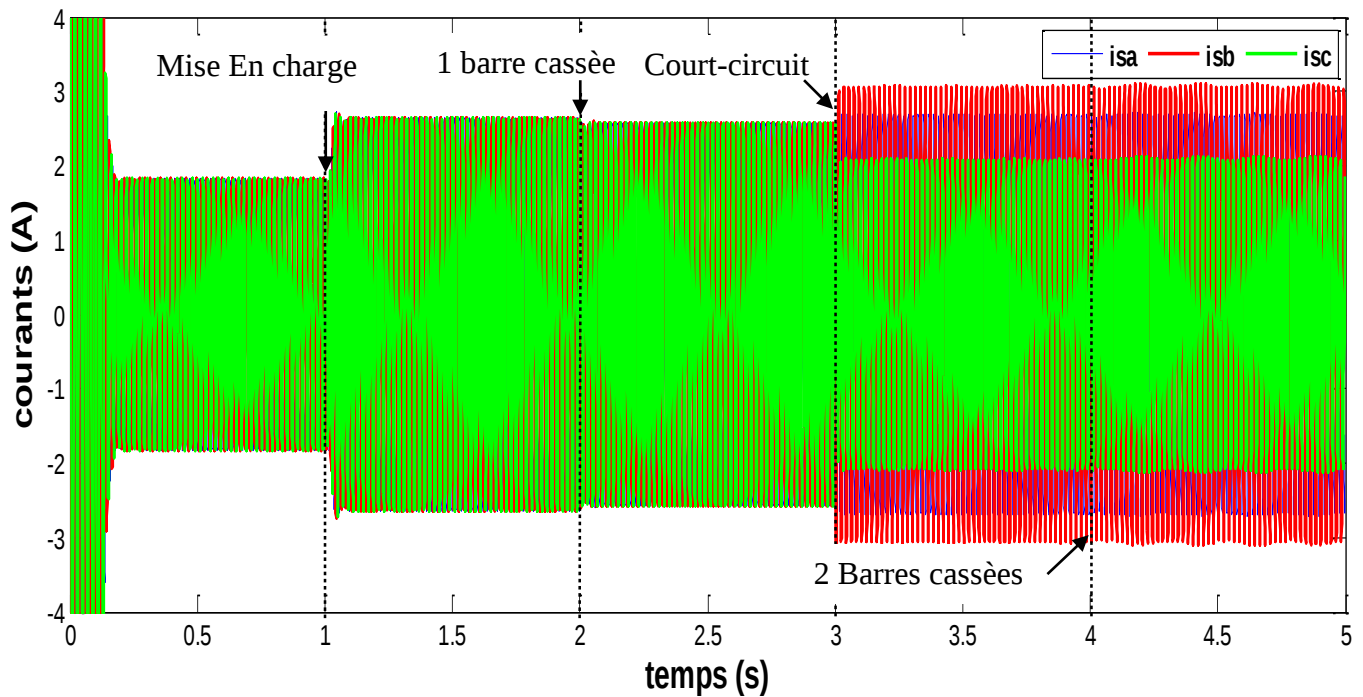


Figure II.24: Courbe des courants avec défaut mixte.

La figure II.24 montre les courants de ligne avec un défaut simultané stator/rotor : un défaut statorique de $\mu_{cc1} = 3.88$ % de spires court-circuitées sur la phase as et un défaut rotorique de type rupture d'une barre cassée. On peut remarquer qu'à partir de $t = 2$ sec de nouvelles composantes dues aux barres cassées apparaissent dans les trois courants (cas de défaut rotor). A $t = 3$ sec le court-circuit fait augmenter le courant dans la phase as où s'est produit le défaut (cas de défaut stator).

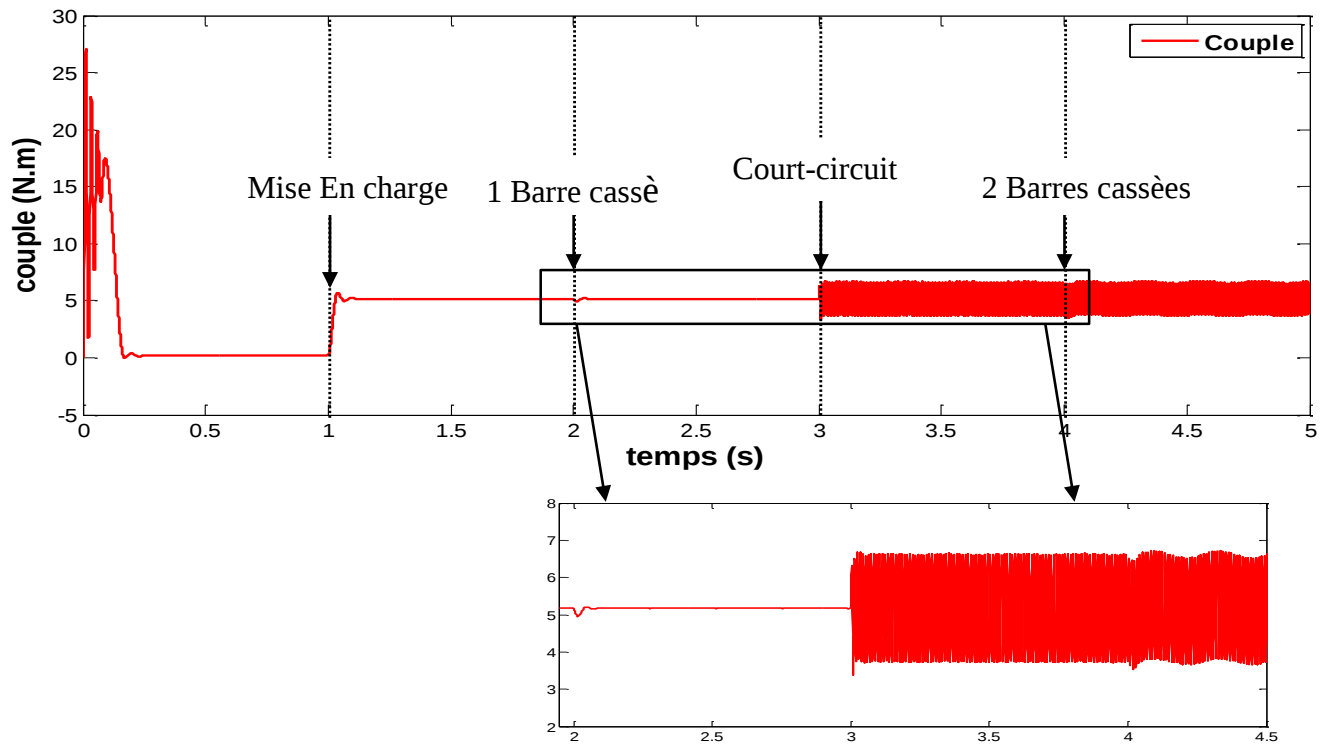


Figure II.25: Courbe de couple avec défaut mixte.

Les figures II.25 et II.26, représentent respectivement l'évolution du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation, lors de la création du défaut de deux barres successives puis lors de l'introduction du défaut de court-circuit de 3.88 % spires sur la phase a_s . A partir de $t=3$ sec, nous retrouvons les mêmes phénomènes combinés des deux défauts.

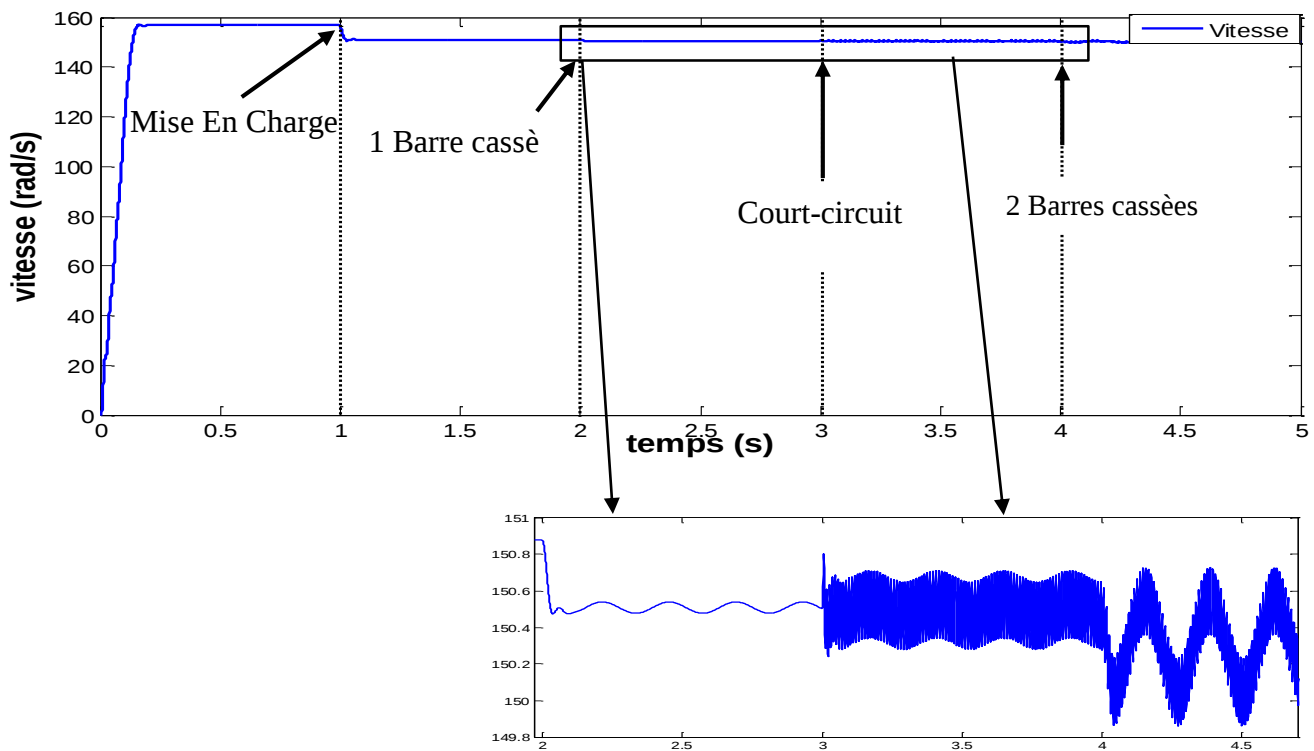


Figure II.26 : Courbe de vitesse avec défaut mixte.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié et présenté la simulation de la MAS en vue de leur diagnostic en présence de courts-circuits entre spires et de rupture des barres du rotor.

Après une analyse de l'influence du défaut statorique et rotorique sur les grandeurs de la MAS, nous avons remarqué que le courant est un signal très riche en informations sur l'état de la machine. Il est révélateur de défauts statorique et rotorique en même temps, ce qui n'est pas le cas pour la vitesse et le couple électromagnétique.

En effet, le défaut statorique se manifeste par un déséquilibre au niveau du courant, où nous constatons une augmentation du courant sur la phase où s'est produit le défaut. Le couple électromagnétique moyen délivré par la machine ne varie pas beaucoup en valeur moyenne, mais des oscillations proportionnelles au défaut apparaissent. Par contre le défaut rotorique se manifeste par une modulation d'amplitude basse fréquence des trois courants statoriques.

Chapitre III :

Application de l'approche réseau de neurones au diagnostic de la MAS

Chapitre

3

Application de l’approche réseau de neurones artificiels au
diagnostic de la MAS

Sommaire:

III.1	Introduction :	65
III.2	Détection des défauts par le réseau de neurones:	65
	III.2.1 Extraction de signatures de défauts.....	65
	III.2.2 Construction de la base d’apprentissage et de test.....	74
III.3	Resultants de simulation:	75
III.4	Conclusion :.....	77

III.1 Introduction :

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale pour la mise au point d'une procédure de diagnostic, elles permettent la compréhension du fonctionnement sain et défectueux.

Ce chapitre vise à étudier l'application de l'approche réseaux neurones pour la détection et la classification de défauts de la machine asynchrone à cage. Cela permet de surveiller les informations neuronales provenant de différents signaux pour donner une évaluation plus précise sur l'état de la machine. Les informations nécessaires pour l'approche neuronal issues du modèle mathématique de la machine pour différentes situations de la machine (saine / défaillante) seront présentées dans ce chapitre.

III.2 Détection des défauts par le réseau de neurones:

Il existe plusieurs types d'architecture des réseaux de neurones, la structure neuronale PMC (perceptron multicouches) du type feedforward est la structure la plus employée dans plusieurs domaines. Dans la suite de ce chapitre, la structure PMC est utilisée pour identifier les défauts électriques de la machine asynchrone. Une étude préalable doit être menée par des experts du diagnostic de la machine asynchrone, afin d'assurer une exploitation correcte de la méthode proposée RNA. Cette étude permet de sélectionner les indicateurs représentatifs du défaut de façon significative, utilisés comme étant des données pertinentes du RNA.

Le défaut statorique se manifeste par une augmentation du courant sur la phase statorique où s'est produit le défaut. Cependant, le défaut rotorique se manifeste par une modulation d'amplitude des trois courants statoriques. Suite à ces considérations, le choix des entrées s'est basé essentiellement sur la surveillance du courant statorique puisqu'il reflète d'une manière significative l'apparition des trois défauts stator, rotor et ou mixte.

III.2.1 Extraction de signatures de défauts

Afin d'extraire les signatures les plus représentatives des défaillances statoriques et rotoriques ou mixte. Nous avons prélevés les résultats de simulation obtenus sur le modèle de la machine asynchrone du deuxième chapitre. Il s'agit respectivement, de l'évolution des amplitudes des courants statoriques prisent au régime établi dans différents modes de fonctionnement. Les figures ci-dessous présentent une idée sur l'analyse des amplitudes des courants statoriques en absence et en existence d'un défaut statorique, rotorique ou mixte sous une charge de 5Nm. Plusieurs cas sont alors considérés sous différentes conditions de charge pour collecter une base de données.

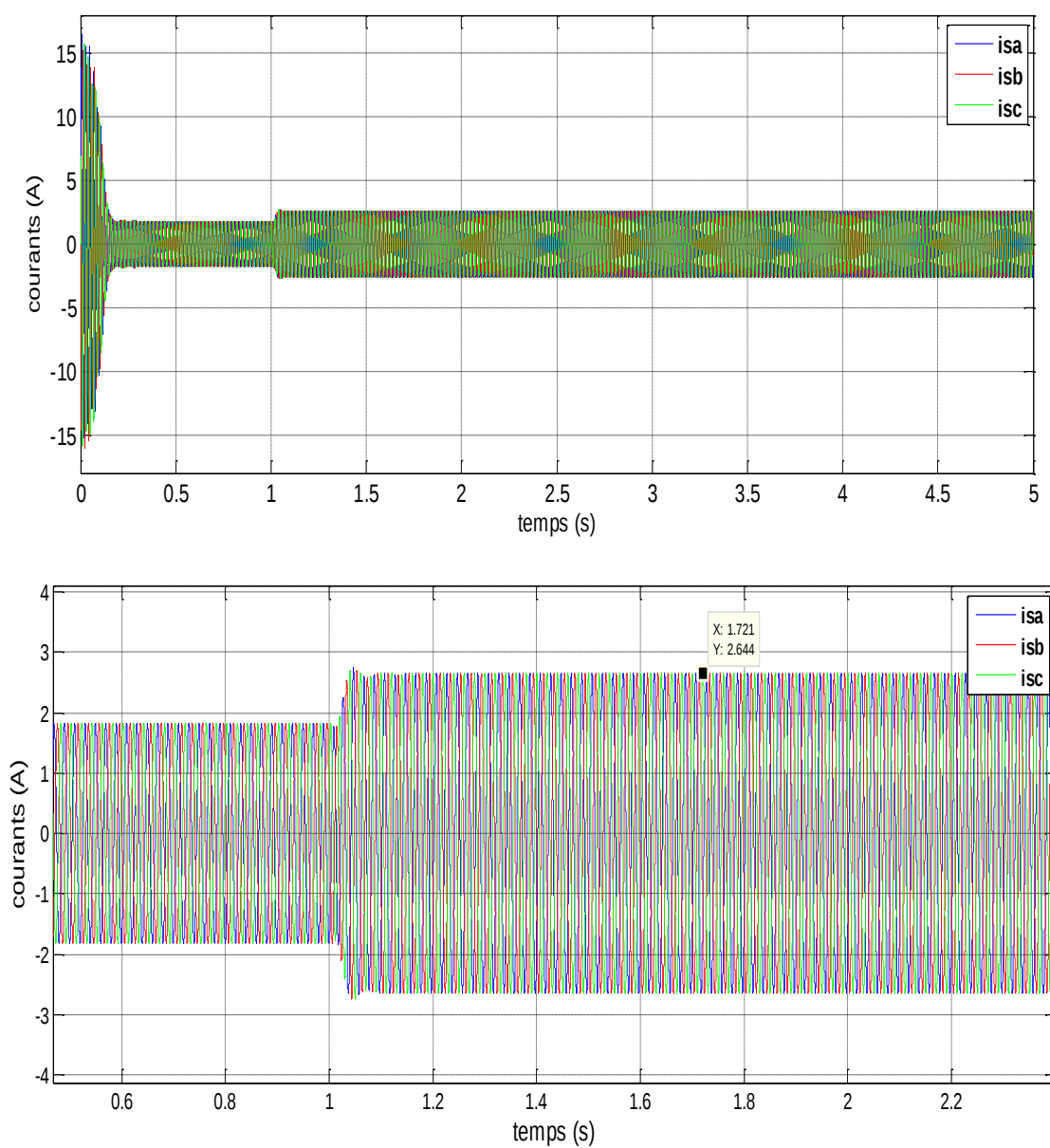


Figure III.01: Résultat de simulation du courant en régime transitoire et permanent du moteur sain en charge ($C_r=5\text{Nm}$)

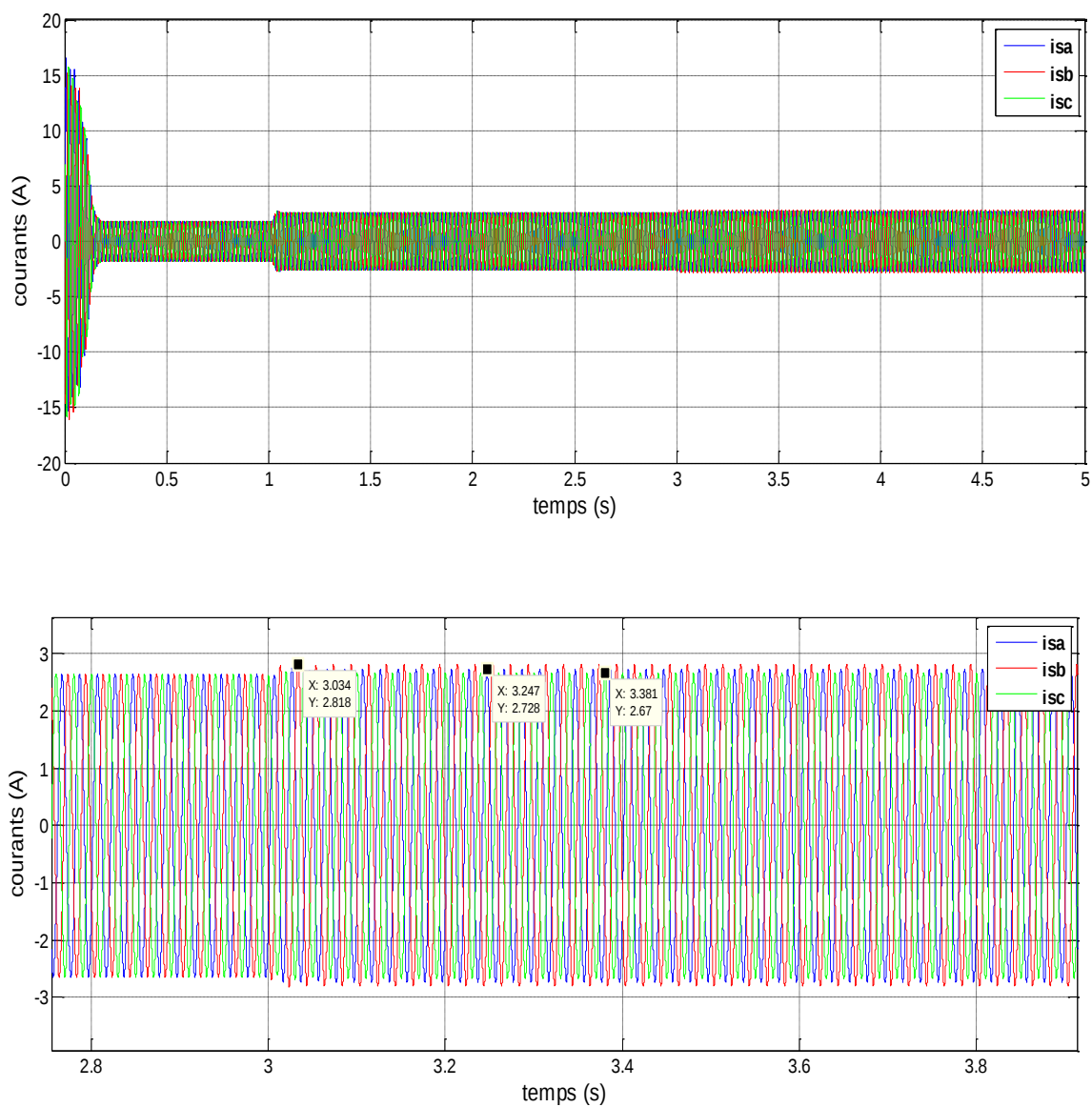


Figure III.02 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court-circuit de 1% spires et son zoom.

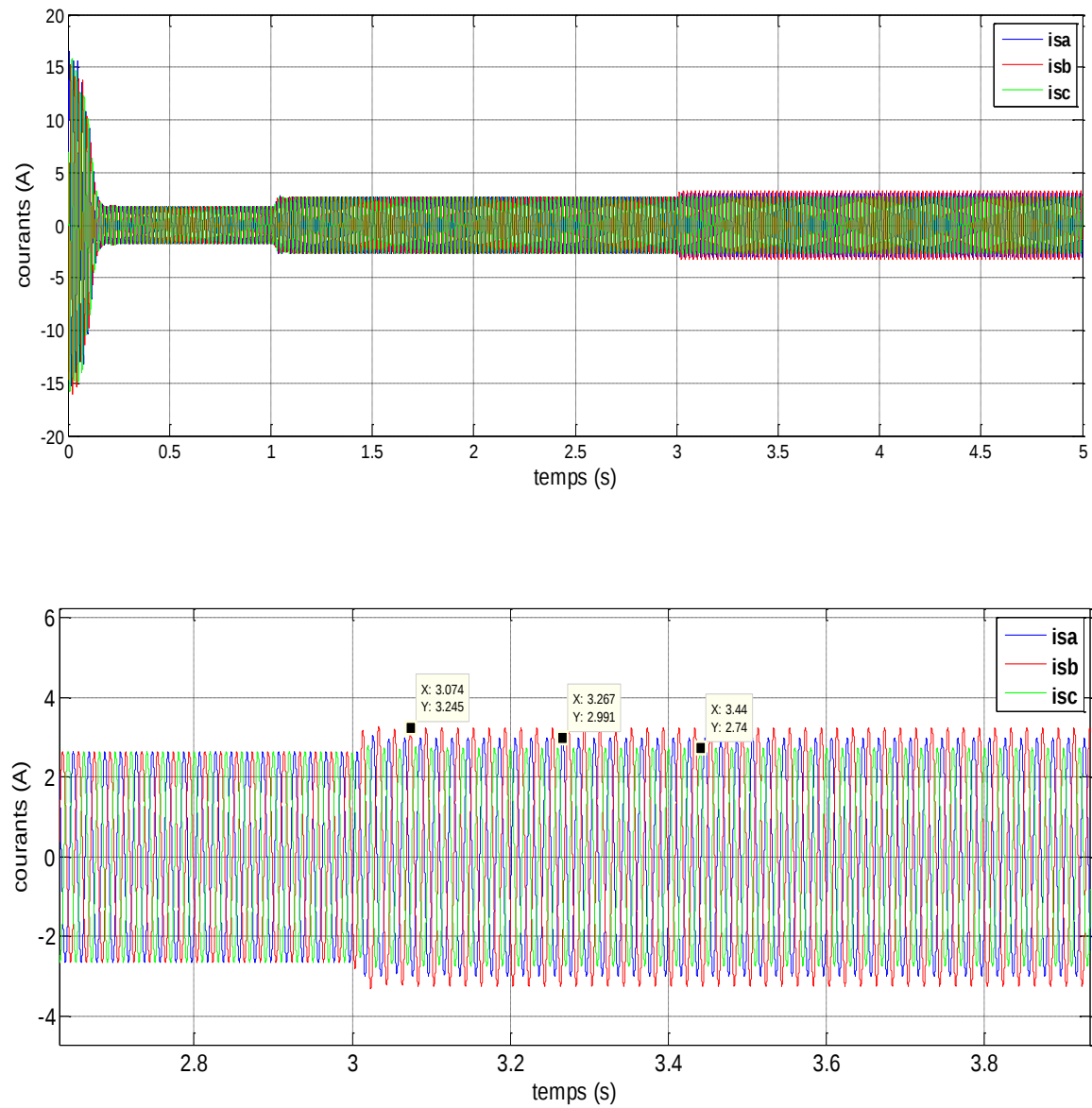


Figure III.03 Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court- circuit de 3.88 % spires et son zoom.

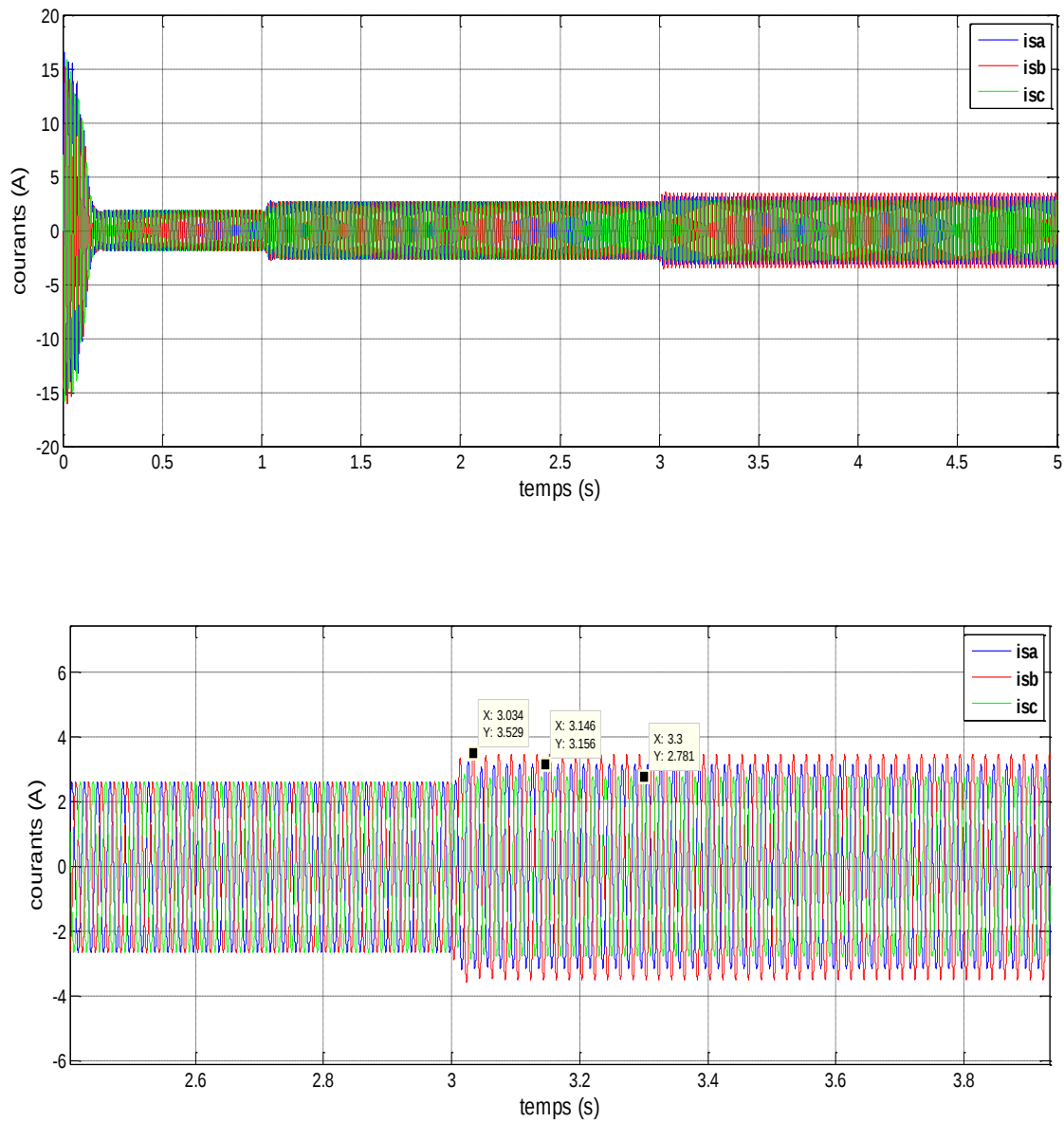


Figure III.04 Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent pour court-circuit de 5.4 % spires et son zoom.

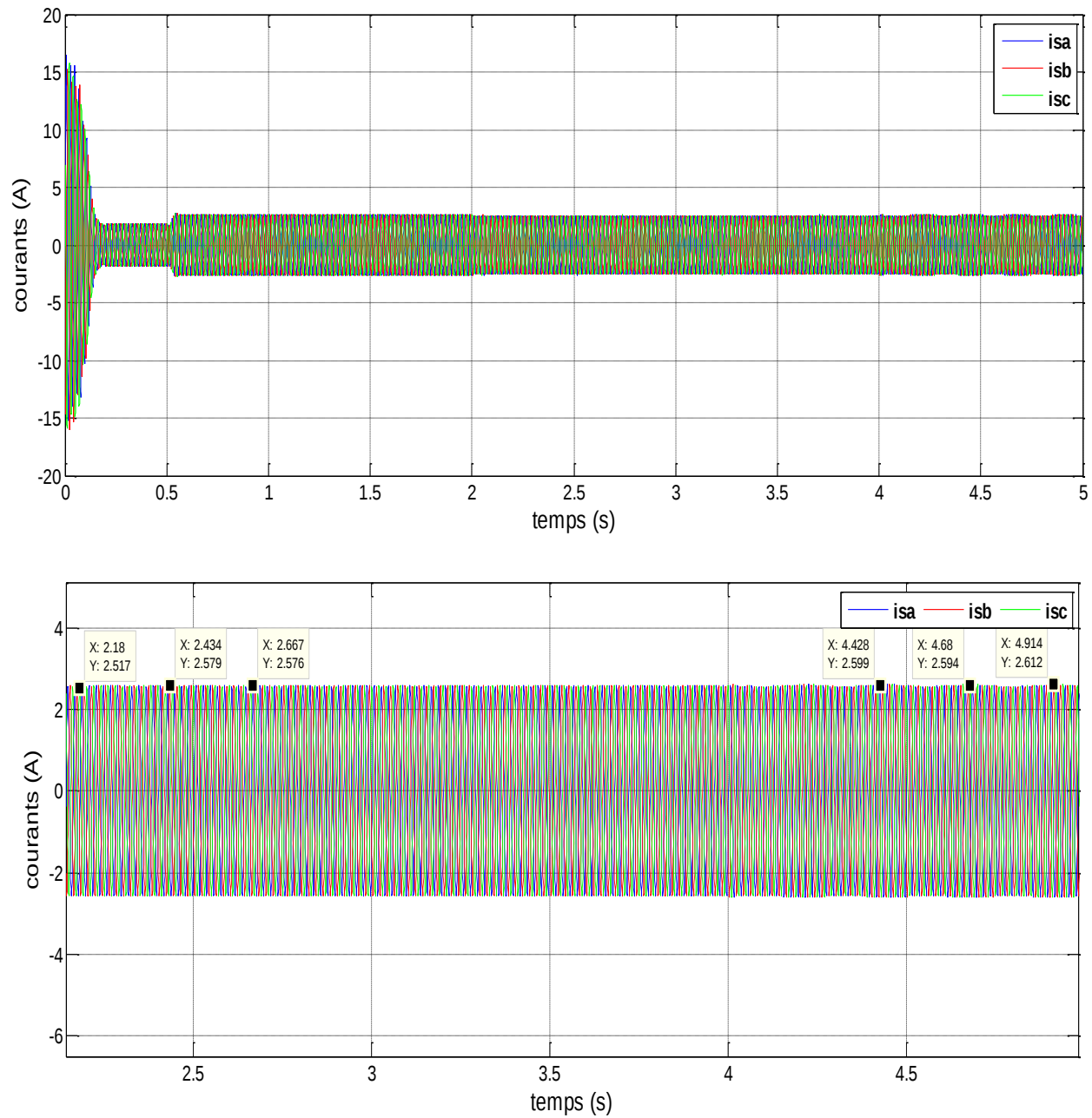


Figure III.05 : Résultat de simulation du courant rotorique en régime transitoire et permanent
Avec 2 barres cassées et son zoom

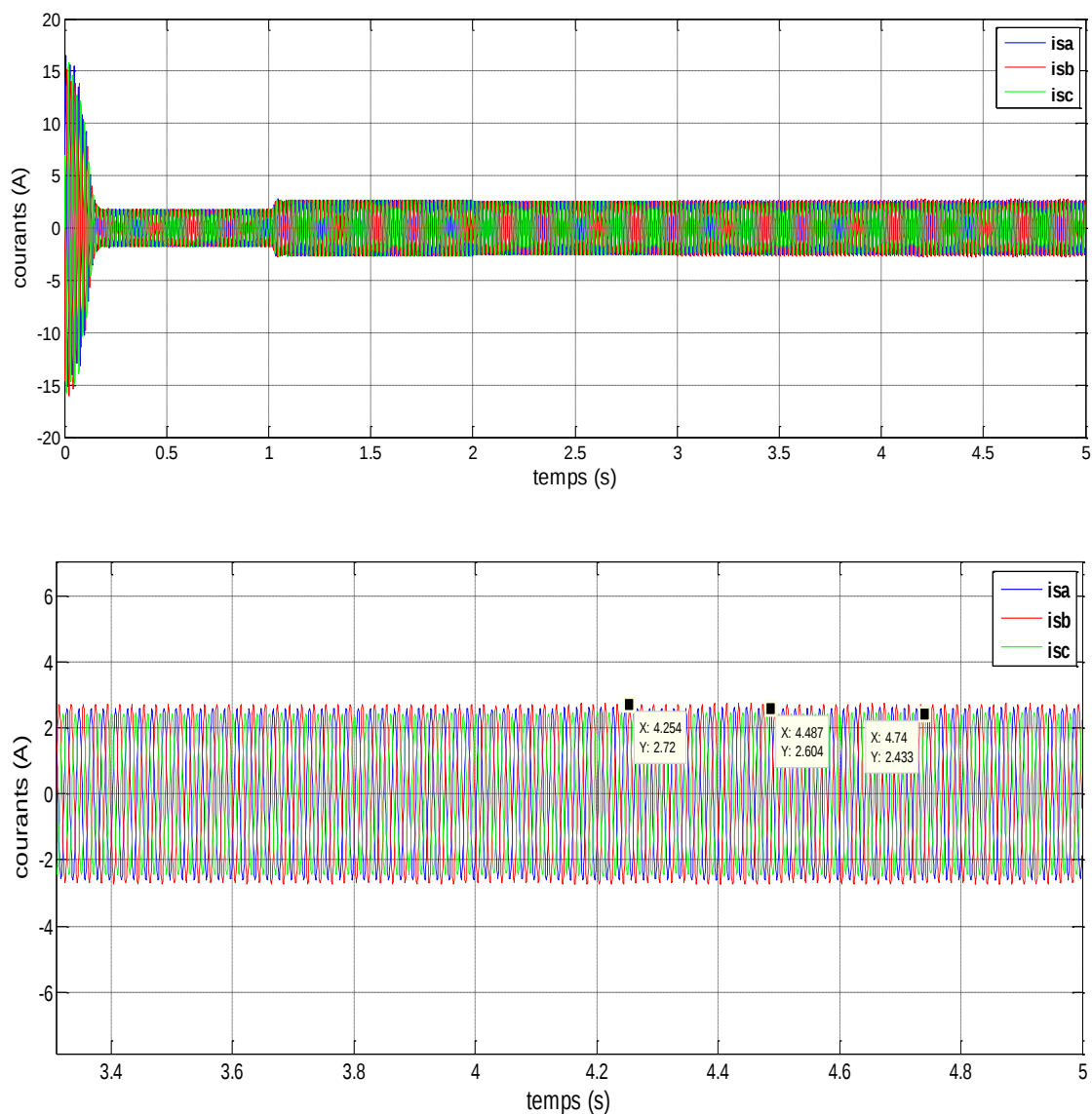


Figure III.06 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 1 % spires et 2 barres cassées et son zoom.

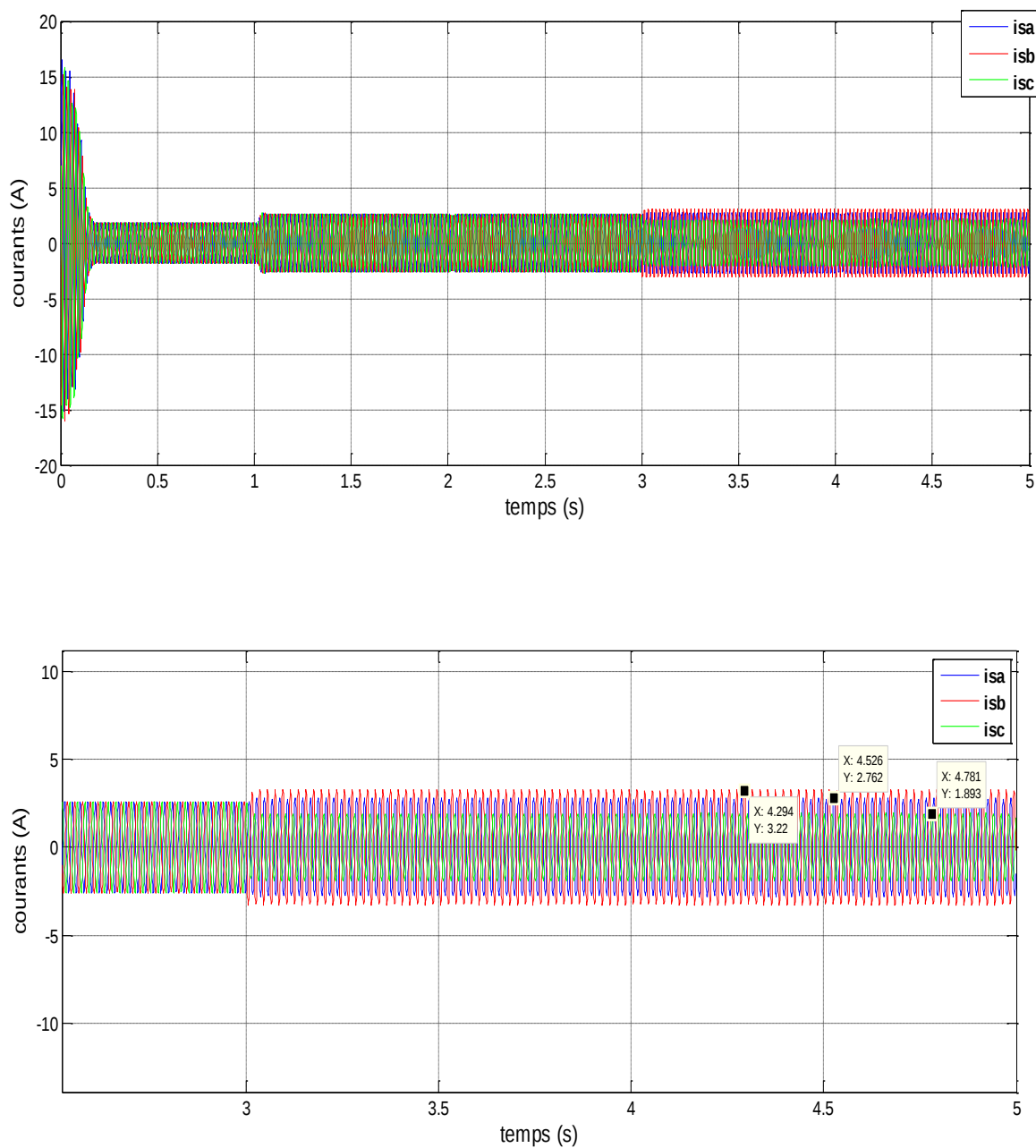


Figure III.07 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 3.88 % spires et 2 barres cassées et son zoom.

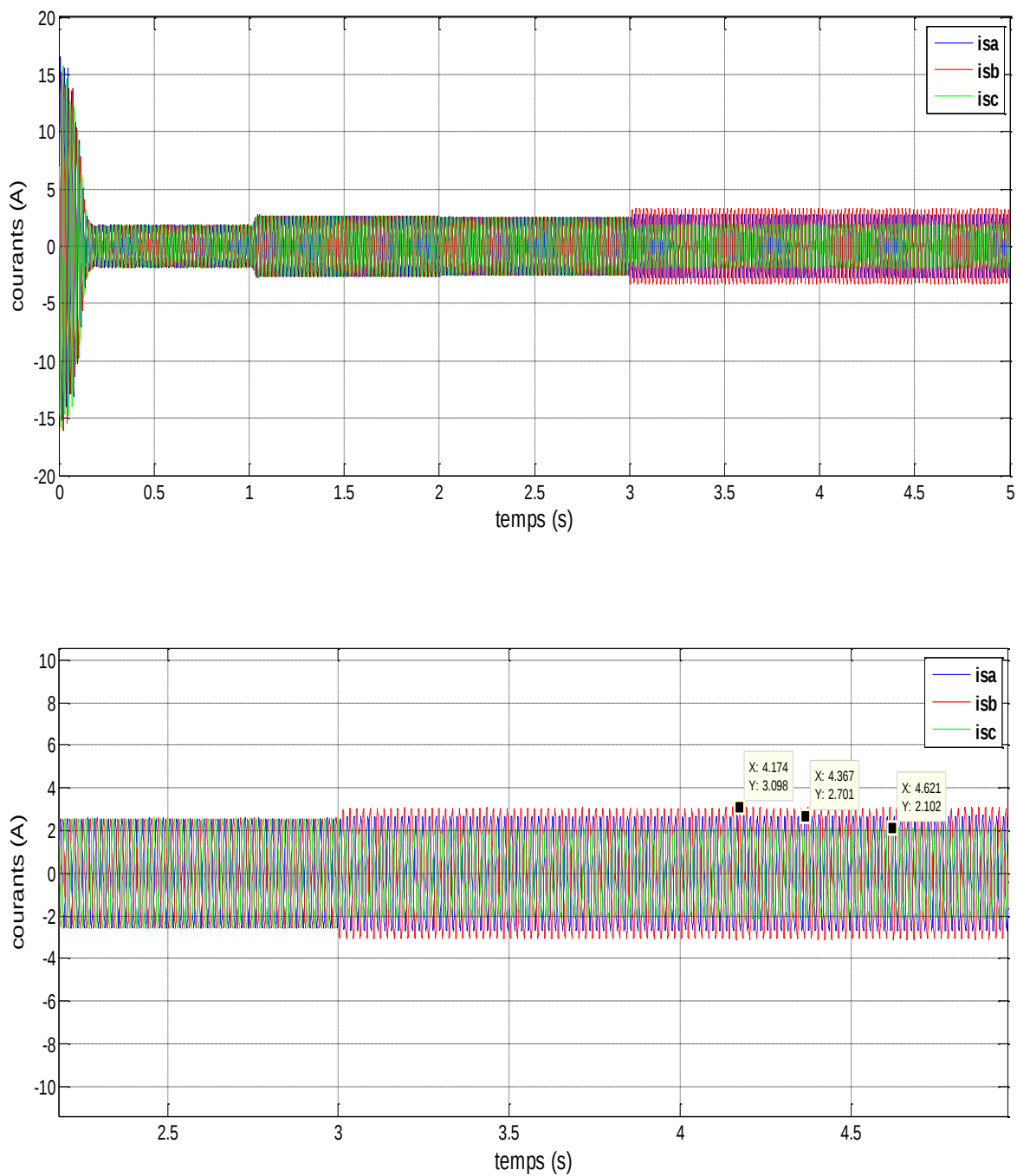


Figure III.08 : Résultat de simulation du courant statorique en régime transitoire et permanent Avec court-circuit de 5.4 % spires et 2 barres cassées et son zoom.

III.2.2 Construction de la base d'apprentissage et de test

Le schéma synoptique de la figure IV.09 représente le système de diagnostic de défauts électriques basé sur les RNA. Ce système montre les étapes à suivre pour établir la structure neuronale permettant de détecter et identifier les trois défauts : statoriques, rotoriques et mixte. Le traitement des défaillances est effectué par l'extrait et l'analyse des amplitudes des signaux des courants statoriques riche d'enseignements pour prendre des décisions sur l'état de la machine, et ainsi la détection et la classification du type de défaut.

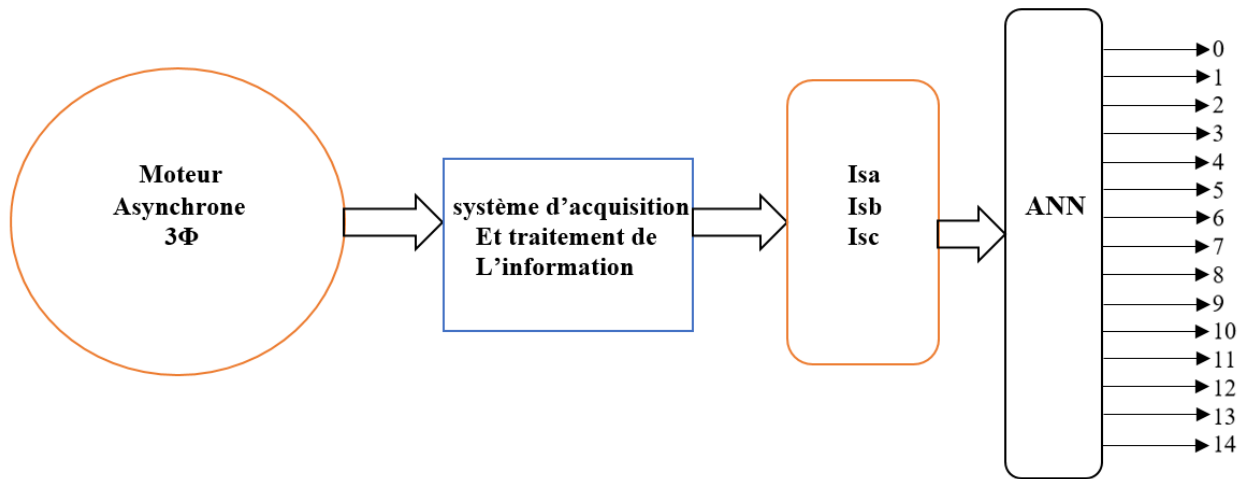


Figure III.09 : Synoptique du système de diagnostic de défauts électriques par réseaux de neurones

Comme mentionné précédemment, la base d'apprentissage et de test est issue d'une machine asynchrone en fonctionnement saine et en défaut (court-circuit entre spires, rupture des barres) sous différentes conditions de charge.

Les amplitudes des trois courants statoriques $\|I_{sa}\|$, $\|I_{sb}\|$ et $\|I_{sc}\|$, qui pourront être présentés au RNA représentent les variables d'entrées. La sortie désirée du RNA sélectionnée peut prendre l'une de ces étiquettes :

- 0: moteur sain.
- 1: défaut statorique court-circuit de 1 % spires.
- 2 : défaut statorique court-circuit de 1.7 % spires.
- 3 : défaut statorique court-circuit de 3.88 % spires.
- 4 : défaut statorique court-circuit de 5.4 % spires.
- 5 : défaut rotorique rupture de 2 barres.

- 6 : défaut rotorique rupture de 1 barre.
- 7 : défaut mixte rupture de 2 barres et court-circuit de 1 % spires.
- 8 : défaut mixte rupture de 2 barres et court-circuit de 1.7 % spires.
- 9 : défaut mixte rupture de 2 barres et court-circuit de 3.88 % spires .
- 10 : défaut mixte rupture de 2 barres et court-circuit de 5.4 % spires.
- 11: défaut mixte rupture de 1 barres et court-circuit de 1 % spires
- 12: défaut mixte rupture de 1 barres et court-circuit de 1.7 % spires
- 13 : défaut mixte rupture de 1 barres et court-circuit de 3.88 % spires
- 14 : défaut mixte rupture de 1barres court-circuit de 5.4 % spires

III.3 Resultants de simulation:

La structure PMC du type feedforward proposée contient trois couches: couche d'entrée de trois neurones correspond au nombre d'entrées ($\|Isa\|$, $\|Isb\|$ et $\|Isc\|$), une seule couche cachée de sept neurones déterminé selon une procédure itérative suivant les performances d'apprentissage et de test, et une couche de sortie d'un seul neurone correspond au vecteur de sortie (étiquètes). Deux types de fonctions de transfert (Logsig et Tansig) ont été testés et l'algorithme de retro-propagation a été employé dans cette étude.

La figure IV.10 représente la sortie désirée (résultats de simulation) et la sortie estimée du modèle neuronal de neurones pour l'apprentissage.

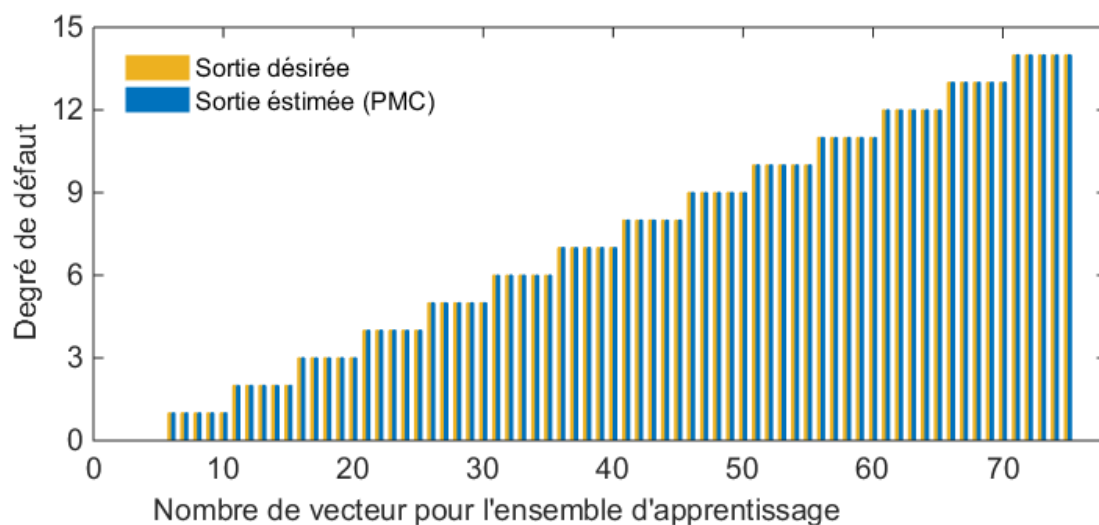


Figure III.10 : Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble d'apprentissage

Une fois le réseau de neurones entraîné (après l'apprentissage), il est nécessaire de le tester sur une base de données différente de celles utilisées pour l'apprentissage. Ce test permet à la fois d'apprécier les performances du modèle neuronal. La figure IV.11 présente les 60 valeurs de l'ensemble de test et les 60 valeurs correspondantes aux données du modèle neuronal (valeurs estimées) pour le test.

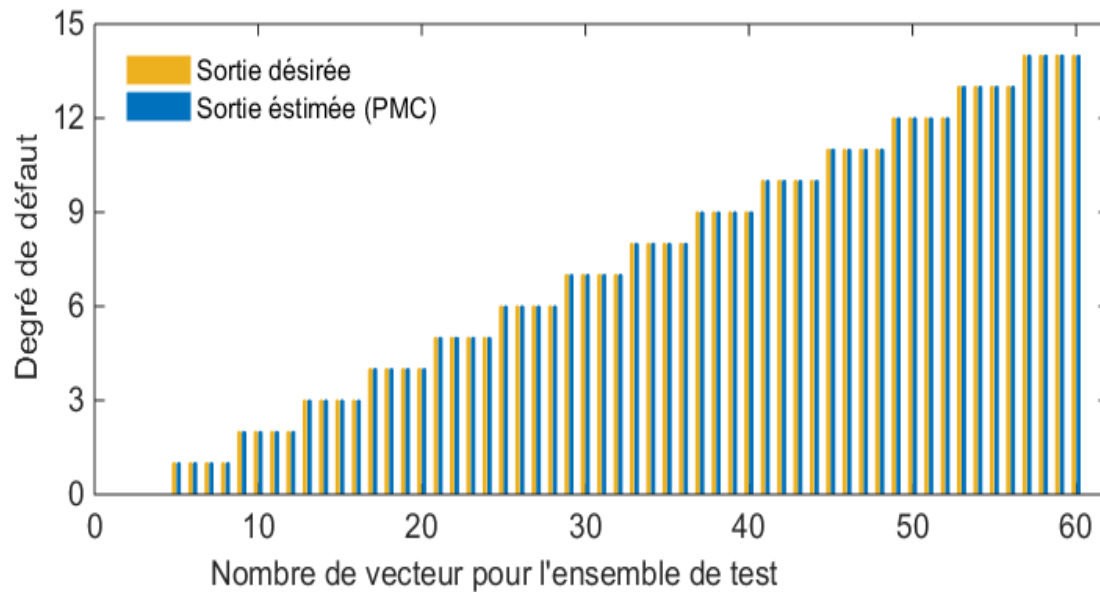


Figure III.11 : Variation du degré de défaut en fonction de nombre vecteur pour l'ensemble de teste

Les figures IV.10 et IV.11 montrent une très bonne adaptation du réseau de neurones à la base de données utilisée respectivement pour l'opération d'apprentissage et de test.

La figure IV.12 représente l'erreur de sortie pour la phase de test.

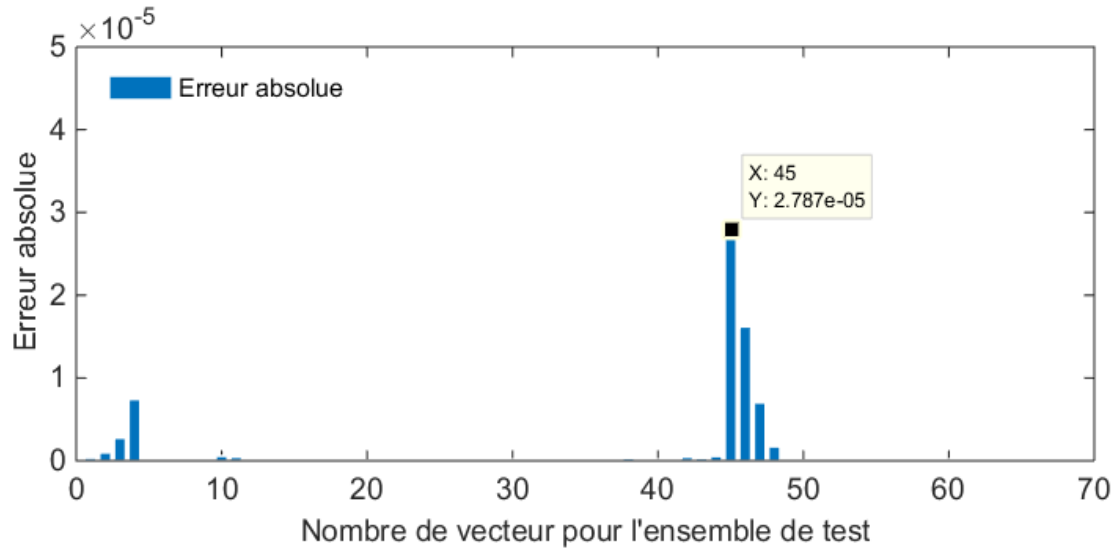


Figure III.12 : Variation de l'erreur absolue (test)

Notant aussi que le système de diagnostic PMC a une erreur absolue maximale très faibles de **7.0724e-05** pour l'ensemble de teste. Ce système de surveillance peut donc être considéré comme un outil d'une grande efficacité dans le domaine du diagnostic des défauts électriques (court-circuit entre spires statoriques et ou rupture des barres rotoriques) de la machine asynchrone à cage .

III.4 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons proposé un système de surveillance intelligent basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) pour analyser l'état de la machine asynchrone à cage d'ecureuil. Ce dernier est conçu de telle sorte qu'il soit capable d'effectuer un diagnostic précoce de défauts électriques (stator/rotor).

D'après les résultats trouvés, les réseaux de neurones artificiels ont fourni de bonnes performances pour résoudre le problème de diagnostic de défauts électriques : défaut de court-circuit entre spires d'une phase statorique et défaut de rupture de barres de la cage rotorique. Les RNA ont montré par ailleurs leur capacité de détecter ces deux défauts en localisant où s'est produit le défaut de court-circuit, et d'identifier le nombre de barres cassées.

ANNEXE

(Généralités sur les réseaux de neurones)

Annexe (Généralités sur les réseaux de neurones artificiels)

Sommaire

III.1 Introduction	78
III.2 Neurone artificiel général	78
III.3 Structures d'interconnexion	79
III.3.1 Réseaux multicouches	79
III.3.2 Réseau à connexions locales	79
III.3.3 Réseau à connexions récurrentes	80
III.3.4 Réseau à connexion complète	80
III.4 Modélisation générale	80
III.5 Les avantages des réseaux de neurones	81
III.6 Les inconvénient des réseaux de neurones :	82
III.7 L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic:	82
III.8 Domaines d'application de réseau de neurone artificiel	82
III.9 Conclusion	83

IV.1 Introduction

Les exigences de sûreté de fonctionnement et de productivité des installations industrielles ont motivé un effort important de recherche pour la détection et le diagnostic des défauts des machines électriques. D'où l'emploi de plusieurs méthodes dans ce domaine.

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) constituent l'une des méthodes d'intelligence artificielle dont le développement se fait à travers les méthodes par lesquelles l'homme essaye toujours d'imiter la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propre. Nous présentons donc dans ce chapitre un état de l'art de ces réseaux de neurones. D'abord, nous rappellerons la définition et les propriétés des réseaux de neurones, avant de décrire les architectures neuronales les plus utilisées, à savoir le réseau à Fonction de Base Radiale (RBF) et Perceptron Multicouches (MLP). Nous poursuivrons en exposant les différents types d'apprentissage, ainsi que les domaines d'applications et leurs avantages.

IV.2 Neurone artificiel général

Un neurone artificiel peut être représenté comme ceci (Figure III.01):

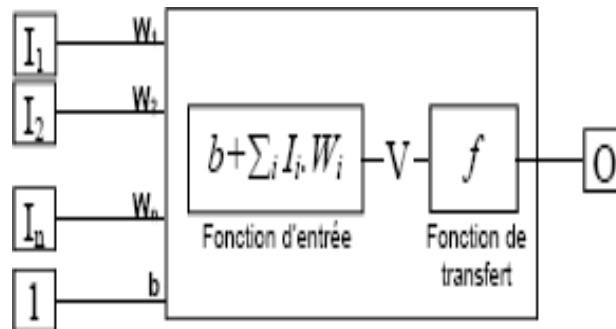


Figure IV.01: Représentation d'un neurone artificiel.

Chaque neurone possède plusieurs entrées (I_n), à chacune desquelles est affecté un poids (*Weight*). L'entrée fixée à 1 de poids b est facultative et représente le seuil (ou biais). À chaque entrée peuvent être connectées plusieurs sorties d'autres neurones. La sortie est calculée à partir des entrées et des poids synaptiques :

- une **fonction d'entrée** évalue la stimulation reçue en calculant le potentiel V du neurone. Elle est très souvent la somme pondérée (par les poids synaptiques) des entrées, augmentée d'un seuil.
- une **fonction de transfert** (ou fonction d'activation) génère alors la sortie grâce à ce potentiel. Cette fonction de transfert est très importante, et détermine le fonctionnement du neurone et du réseau. Elle peut prendre de nombreuses formes comme nous allons le voir dans la section suivante

IV.3 Structures d'interconnexion

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elle peut être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité.

IV.3.1 Réseaux multicouches

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre les neurones d'une même couche et les connexions ne se font qu'avec les neurones des couches avales (Figure III.2). Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et à celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelés couches cachées.

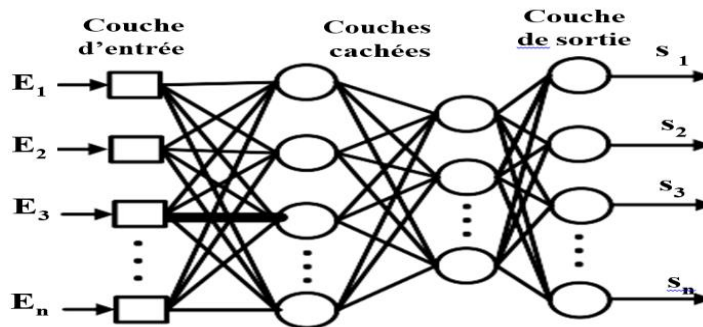


Figure IV.02 : Définition des couches d'un réseau multicouche.

IV.3.2 Réseau à connexions locales

Il s'agit d'une structure multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone entretient des relations avec un nombre réduit et localisé de neurones de la couche avale (figure III.3). Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

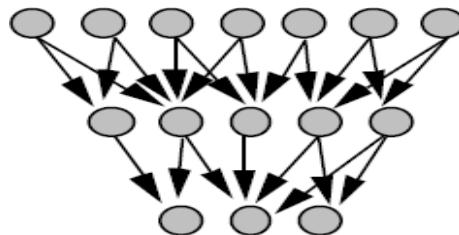


Figure IV.03: Réseau à connexions locales.

IV.3.3 Réseau à connexions récurrentes :

Les connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales (Figure.III.04).

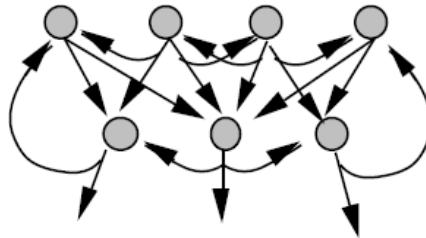


Figure IV.04 : Réseau à connexions récurrentes.

IV.3.4 Réseau à connexion complète :

C'est la structure d'interconnexion la plus générale (Figure III.05). Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau (et à lui-même). Chaque vecteur d'activation représente la réponse du réseau à une date particulière.

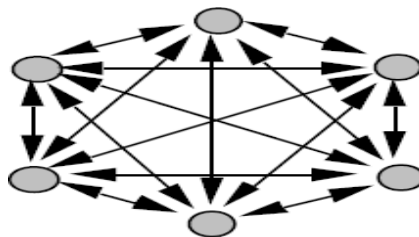


Figure IV.05: Réseau à connexions complète.

IV.4 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) [41].

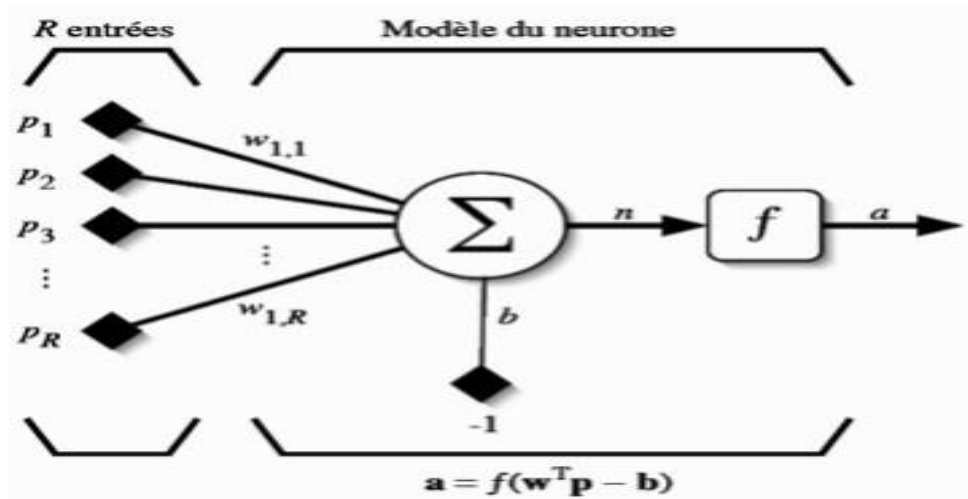


Figure IV.06 : Modèle de reseau neurone

$$p = [p_1 p_2 \cdots p_r]^T$$

Alors que $\mathbf{w}$ représenté les poids synaptiques du neurone avec

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

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

$$n = \sum w_{i,j} p_j - b \quad (1)$$

$$= w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \cdots w_{1,r} p_r - b \quad (2)$$

Que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = \mathbf{w}^T \mathbf{p} - b \quad (3)$$

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 [41].

IV.5 Les avantages des réseaux de neurones

- la rapidité, très utile lorsque le diagnostic doit être conduit en ligne.
- un réseau de neurone est robuste surtout vis-à-vis du bruit.

IV.6 Les inconvénients des réseaux de neurones [42].:

- l'apprentissage peut être long et difficile.
- l'apprentissage est gourmand en temps de calcul. Par ailleurs, il doit être réalisé sur toutes les données à la fois, avec le risque que le réseau oublie les résultats précédents.
- il est nécessaire de posséder des jeux de données sur toutes les conditions de fonctionnement et en particulier pour les fonctionnements défectueux.
- un réseau de neurones ne fonctionnera pas forcément correctement hors de sa plage d'apprentissage.

IV.7 L'intérêt des réseaux de neurones dans le domaine de diagnostic:

- le premier point est la faculté de réseau de neurones d'être utilisé en tant que règle de décision dans un processus d'automatisation de l'opération du diagnostic,
- le second point est la faculté d'apprentissage et de mémorisation d'un grand volume d'information.
- D'ailleurs, en ce qui concerne le diagnostic des machines électriques, cette méthode a été largement utilisée. [42] a proposé un système d'identification et de classification des défauts de la machine asynchrone

IV.8 Domaines d'application de réseau de neurone artificiel

- Aujourd'hui, les réseaux de neurones ont de nombreuses applications dans des domaines très variés :
- traitement d'image : compression d'images, reconnaissance de caractères et de signatures, reconnaissance de formes et de motifs, cryptage, classification, ...
- traitement du signal : traitement de la parole, identification de sources, filtrage, classification,...
- traitement automatique des langues : segmentation en mots, représentation sémantique des mots (plongements lexicaux), étiquetage morpho-syntaxique, traduction automatique, ...
- contrôle : diagnostic de pannes, commande de processus, contrôle qualité, robotique,
- optimisation : allocation de ressources, planification, régulation de trafic, gestion, finance, ...
- simulation : simulation boîte noire, prévisions météorologiques.
- classification d'espèces animales étant donnée une analyse ADN.
- modélisation de l'apprentissage et perfectionnement des méthodes de l'enseignement.

IV.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une façon générale les réseaux de neurones, leurs architectures et leurs types d'apprentissage. Les réseaux de neurones possèdent des propriétés d'apprentissage intéressantes, de reconnaissance de forme, d'approximation universelle. Cependant, leurs inconvénients ne sont pas négligeables, citons notamment le nombre de poids à optimiser, le choix de la structure du réseau, le choix des fonctions de transfert, les performances de la règle d'apprentissage.

Par ailleurs, le réseau perceptron multicouches l'un des types des réseaux de neurones le plus utilisé dans la littérature, sera l'objectif du prochain chapitre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Compte tenu de l'impact et de l'emploi fréquent des machines asynchrones dans l'industrie, le diagnostic précoce des défauts dans ces machines représente un enjeu scientifique et économique important. L'intérêt progressif des industriels pour la surveillance des entraînements électriques justifie l'orientation de la recherche sur le diagnostic des machines asynchrones. Il est donc indispensable d'établir des outils de diagnostic et de détection pour surveiller l'état de la machine.

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

Dans le premier chapitre et, après avoir rappelé d'une manière non exhaustive les éléments constituant la machine asynchrone à cage d'écureuil, nous avons cité les sérieux types de défauts pouvant apparaître sur les différentes parties de ceux-ci. Nous nous sommes intéressés sur les deux défauts internes habituellement rencontrés et qui sont le sujet de ce mémoire. Ces deux défauts sont : défaut statorique du type court-circuit entre spires et défaut rotorique du type cassure de barres. Nous avons ensuite exposé un état de l'art des différentes approches généralement utilisées dans le domaine du diagnostic..

Le deuxième chapitre est reposé sur la réalisation de modèles dédiés à la simulation et au diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage. Deux types de défaut ont retenu notre attention : les courts-circuits de spires au stator et la rupture de barres au rotor. L'association de ces deux modèles avec le modèle de la machine saine a permis de définir un modèle général en situation de défauts simultanés stator/rotor, pour une surveillance globale de la machine asynchrone à cage. Ces modèles ont été servi dans le but de simuler mathématiquement la machine en fonctionnement sain et en défaut, et ainsi d'extraire la signature caractérisant du défaut.

D'après les résultats obtenus, l'influence des défauts statorique et rotorique sur les grandeurs de la machine, montrent que le courant de phase est un signal très riche en informations sur l'état de la machine. Il est symptomatique de défauts statorique, rotorique et ou mixte, ce qui n'est pas le cas pour le couple électromagnétique et la vitesse. Suite à ces observations nous avons choisi ainsi le courant de phase (ligne) de la machine comme étant un indicateur efficace de défaut, pour réaliser l'application de l'approche RNA au diagnostic et de MAS qui sera l'objectif du dernier chapitre.

Conclusion générale

Dans le troisième chapitre, nous avons appliqué une approche de surveillance intelligente basée sur les réseaux RNA, afin de traiter l'état de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette méthode est conçue de telle sorte qu'elle soit efficace de procéder à un diagnostic précoce de défauts électriques à savoir : défaut statorique du type court-circuit entre spires et défaut rotorique du type cassure de barres.

En effet, l'approche RNA a montré sa capacité de détecter ces deux défauts en localisant où s'est produit le défaut de court-circuit, et d'identifier le nombre de barres cassées.

D'après les résultats obtenus du dernier chapitre, nous pouvons conclure que l'exploitation des indicateurs des défauts électriques a permis d'établir un système de surveillance automatique à base de RNA.

Le développement possible de cette étude, pour l'implantation en temps réel du système de surveillance élaboré, ouvre quelques perspectives qui nous paraissent intéressantes. Tout d'abord, pour avoir plus de précision sur la détermination des sévérités des défauts, il serait plus avantageux d'avoir une base de données d'apprentissage issue de la simulation et des relevés expérimentaux.

Références Bibliographique

Refèrènces Bibliographique

- [1] Dameche Salah Eddine , Lamri Marouane “:Diagnostic des défauts statorique dans les machines asynchrones par l’approche Neuro-Floue de type ANFIS’, thèse de doctorat en Electromécanique, université de science et technologie laghouat, 2018.
- [2] G. Didier: "Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances", Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France,2004.
- [3] O. Ondel: "diagnostic par reconnaissance des formes: application a un ensemble convertisseur–machine asynchrone", Thèse de doctorat, Ecole central de Lyon,France, Octobre 2006.
- [4] BAZI Smail "Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction- Convertisseur " Thèse Doctorat Université de Batna 2016.
- [5] BOUBACAR HOUSSEINI" Prototypage Rapide A Base De Fpge D'un Algorithme Deconrole Avancé Pour Le Moteur A Induction" Mémoire Université Du Québec À Trois-Rivières.2010.
- [6] Abdallah HAMOUDI" Contribution au diagnostic des machine Asynchrone par les technique d’identification " thèse de doctorat en Electrotechnique, université de science et technologie Oran, 2018.
- [7] CHAHMI Abdelghani" Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic"Thèse Doctorat université d’Oran -MB .2017
- [8] Khatir.Abdelfatah “Etude comparative des modèles des MAS utilisés en diagnostic des pannes” mémoire de Magistère , Université Ferhat Abbas-Sétif UFAS (Algérie),2008.
- [9] Abba Bouguerne, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones, », Mémoire université mentouri Constantine, Faculté des sciences de l’ingénieur, département d’électrotechnique , 2009
- [10] Babak VASEGHI, « Contribution à l’étude des machines électriques en présence de défaut entre-spores », Thèse, L’Institut National Polytechnique de Lorraine, Génie Electrique, 2009.
- [11] S. Bazine, « Conception et implémentation d'un Méta-modèle de machines asynchrones en défaut » Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle ,Université de Poitiers, 2009.
- [12] ABDELALI Ameur et GUEDDOUH Sadek, « Détection des courts-circuits par suivi paramétrique dans les Machines synchrones à aimants permanents », Mémoire de Master département d’électrotechnique, Électromécanique et système de commande Université Amar Telidji Laghouat,2015/2016.
- [13] 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.
- [14] ANDRIAN CEBAN : ‘Méthode globale de diagnostic des machines électriques-thèse de doctorat génie électrique’, Université Lille de Nord de France, Ecole doctorale SPI, 2012.
- [15] 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.
- [16] 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.

Refèrènces Bibliographique

- [17] Tarek AMEID : 'Contrôle et Diagnostic de la Machine à Induction', thèse de doctorat génie électrique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018.
- [18] Z. Gao, C. Cecati, S.X. Ding: "A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 6, pp. 3757–3767, 2015.
- [19] A. H. Boudinar, N. Benouzza, A. Bendiabdellah, N. Boughanmi: "The use of improved Root-Music Frequency Estimation Method for Three Phase Induction Motor Incipient Rotor's Faults Detection", Acta Electrotechnica et Informatica, Vol. 8, No. 2, pp. 22–28, 2008.
- [20] M.K. Oumaamar: "Surveillance et Diagnostic des Défaits Rotoriques et Mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée", Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, Mars 2012.
- [21] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik: "A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis", Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP), Vol. 21, No. 2, pp. 1127–1142, February 2007.
- [22] A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh: "Applications of artificial intelligence techniques for induction machine stator fault diagnostics: review", 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'03), pp. 29–34, August 2003.
- [23] SAHRAOUI Mohamed : 'Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones', thèse de doctorat électromécanique, Université Mohamed Khider de Biskra, 2010.
- [24] S. Bachir: "Contribution au diagnostic de la machine asynchrone par estimation paramétrique", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [25] S. Moreau: "Contribution à la modélisation et à l'estimation paramétrique des machines électriques à courant alternatif: Application au diagnostic", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 1999.
- [26] J.-P. Caron, and J.-P. Hautier: "Modélisation et commande de la machine asynchrone", Editions Technique, France, 1995.
- [27] Ben Ameer Bazine: "Identification en boucle fermée de la machine asynchrone: Application à la détection de défaut", Thèse de doctorat, Université de Poitiers et Université de Tunis El- Manar, 2008.
- [28] J.M. Pelbois, M. Boussak, P. Goerger: "Modèle simplifié de la machine asynchrone triphasée en défaut de court-circuit entre spires au stator", Electrotechnique du futur EF, Décembre 2003.
- [29] E. Schaeffer: "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", Thèse de doctorat, Institut de Recherche en Cybernétique de Nantes, École Centrale de Nantes, Nantes, France, 1999.
- [30] V. De vanneaux: "Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage d'écureuil en vue de la surveillance et du diagnostic", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Décembre 2002.
- [31] M. Bouharaket: "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique", Thèse de Doctorat, Université de Batna, Algérie, Février 2006.
- [32] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, G. Champenois: "Diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique- Modélisation et détection des défauts stator et rotor", Revue Internationale de Génie Électrique, Vol. 05, No. 03, 2002.
- [33] H. Razik, G. Didier: "Diagnostic de la machine asynchrone", Groupe de Recherche

Refèrènces Bibliographique

- en Electrotechnique et Electronique de Nancy, G.R.E.E.N, 7 Janvier 2003.
- [34] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, G. Champenois: "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 3, pp. 963–973, June 2006.
- [35] S. Bachir, S. Tnani, T. Poinot, J-C. Trigeassou: "Stator Fault Diagnosis in Induction Machines by Parameter Estimation", IEEE International (SDEMPED'01), Grado, Italie, pp. 235–239, Septembre 2001.
- [36] S. Bachir, S. Tnani, J-C. Trigeassou, and G. Champenois: "Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines", European Power Electronics (EPE'01), Graz, Autriche, August 2001.
- [37] A. Abed, L. Baghli, H. Razik, A. Rezzoug: "Modelling induction motors for diagnosis purposes", EPE'99, Lausanne, Suisse, pp.1–8, 7–9 September 1999.
- [38] A. Makki, A. Ah-jaco, H. Yahoui, G. Grellet: "Modelling of capacitor single-phase asynchronous motor under stator and rotor winding faults", IEEE International (SDEMPED'97), Carry-le-Rouet, France, pp. 191–197, Septembre 1997.
- [39] S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, and J-C. Trigeassou: "Induction motor modeling of broken rotor bars and fault detection by parameter estimation", In IEEE International (SDEMPED'01), Grado, Italie, 2001.
- [40] A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh: "Applications of artificial intelligence techniques for induction machine stator fault diagnostics: review", 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'03), pp. 29–34, August 2003.
- [41] 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.
- [42] B. Raison, "Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique" *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble*, Septembre 2000.

