

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عَمَّار ثَلِيْجِي بِالْأَغْوَاط  
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
قسم الكهروتقني

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

### Mémoire

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

Option : Electromécanique

Présenté par :

**BAADACHE Ahmed Taha**

**CHIKHAOUI Missoum**

### Thème :

---

**Diagnostic des défauts de court-circuit statoriques  
d'une machine asynchrone triphasé à bagues**

---

Soutenu le 28 / 09 / 2021

Devant le jury :

Ameur Aissa

Nouredine Lahcène

Nouar Allal

Pr. à UAT Laghouat

MCA à UAT Laghouat

MAA à UAT Laghouat

Président

Examineur

Encadreur

**Année Universitaire 2020/2021**

# Dédicaces

*Je dédie ce travail*

*A ma mère,*

*A l'âme de feu mon père que dieu ait son âme,*

*A mes frères et sœurs,*

*A toute ma famille,*

*A tous mes amis,*

*A tous ceux avec qui j'ai partagé de bons instants,*

*A tous ceux qui veulent savoir.*

*Baadache*

---

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents,*

*A mes frères et sœurs,*

*A toute ma famille,*

*A tous mes amis,*

*A tous ceux avec qui j'ai partagé de bons instants,*

*A tous ceux qui veulent savoir.*

*Phikhaoui*

# *Remerciements*

*Louange à **Allah** Le Tout Puissant Qui nous a accordé la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.*

*Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur, Monsieur **NOUAR Allal** pour sa patience et ses conseils précieux qui nous ont été très utiles. Permettez-nous Monsieur de vous exprimer nos reconnaissances et nos remerciements les plus sincères.*

*Nous remercions également Monsieur **AMEUR Aissa** Professeur à l'université de Laghouat, de nous honorer en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*Nous remercions Monsieur **NOUREDDINE Lahcène**, Maître de conférences à l'université de Laghouat, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail en acceptant d'examiner notre travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Merci aussi à tous nos collègues et amis, nous leur exprimons notre profonde sympathie et leur souhaitons beaucoup de chance pour leurs travaux.*

*Finalement, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'université de Laghouat représentée par les enseignants du département d'électrotechnique ainsi que le personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide et leurs conseils précieux.*

## الملخص:

الهدف من هذا العمل هو نمذجة ودراسة ديناميكية للماكينة اللاتزامنية ثلاثية الأطوار، و هذا في الحالتين: غياب و وجود عطب كهربائي على مستوى الجزء الثابت، القصد من هذه الدراسة هو كشف و تحليل هذه الأعطاب من خلال تيار التغذية لهذه المحركات. الجزء الأول من هذه الدراسة خصص كبحت حول الاعطاب التي تصيب الماكينة اللاتزامنية ثلاثية الأطوار.

الجزء الثاني خصص لنمذجة الماكينة عن طريق صياغة المعادلات الرياضية من أجل محاكاة عمل الماكينة في حالة عدم وجود و وجود دارة قصيرة بين لفائف العضو الساكن و تم ذلك باستعمال Matlab.

أما الجزء الثالث فهو يتناول دراسة نتائج محاكاة عمل الماكينة كمحرك في الحالتين، السليمة والمعطلة في وجود الحمولة وذلك باستعمال أداة معالجة الإشارة ودراسة المحتوى الطيفي للتيار الكهربائي وإظهاره في كل مرة مع التغير في شدة العطب. إن التحليل الطيفي للتيار الكهربائي يسمح بتمييز الأعطاب بامضاءات طيفية وذلك بعد مقارنة الطيف الكهربائي في الحالة العادية وحالة وجود عطب.

**الكلمات المفتاحية:** الآلة اللاتزامنية , عطب قصر الدارة , نموذج بارك, التحليل الطيفي, التشخيص

## Résumé

L'objectif de ce travail est de modéliser et d'analyser le comportement d'une machine asynchrone triphasée saine puis en présence d'un défaut électrique dans le stator. La finalité étant de détecter et d'analyser ses défauts à partir des courants d'alimentation de la machine.

La première partie de ce travail consiste en une synthèse bibliographique consacrée aux défauts dans les machines asynchrones. Une seconde partie est consacrée à la modélisation de la machine asynchrone triphasée à l'état sain et en présence d'un défaut de court-circuit entre spires statorique à l'aide de l'environnement MATLAB.

La troisième partie présente le traitement du signal utilisé pour étudier le contenu spectral des formes d'onde qui résultant des simulations. En effet, l'analyse spectrale de l'information donnée par le courant statorique est réalisée comme on a élargie l'étude au couple de charge, la vitesse et le changement dans l'amplitude du courant dans les trois phases. Cette analyse mène à une caractérisation des défauts par des signatures spectrales issues du courant, et ce à partir d'une comparaison par rapport au fonctionnement sain du système, pris comme état de référence.

**Mots clés :** Machine asynchrone, défaut de court-circuit, Modèle de Park, Analyse spectrale, Diagnostic.

## **Abstract**

The objective of this work is to model and analyse the behavior of a healthy Induction machine then in the presence of an electrical fault in the stator. The purpose is to detect and analyse its faults from the machine's power currents.

The first part of this work consists of a bibliographical synthesis devoted to faults in asynchronous machines. A second part is devoted to the modelling of the operation of the machine in the healthy state and in the presence of a short-circuit fault between stator turns using the MATLAB environment.

The third part presents the signal processing used to study the spectral content of the waveforms resulting from the simulations. Indeed, the spectral analysis of the information given by the stator current is carried out as the study has been extended to the load torque, the speed and the change in the amplitude of the current in the three phases. This analysis leads to a characterization of the defects by spectral signatures from the current, and this from a comparison with the healthy functioning of the system, taken as a reference state.

**Key words:** Asynchronous machine (induction machine), short circuit fault, Park Model, Spectral Analysis, Diagnosis.

# Sommaire

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Dédicace              | <i>i</i>    |
| Remerciements         | <i>ii</i>   |
| Résumé                | <i>iii</i>  |
| Notations symboliques | <i>vii</i>  |
| Liste des figures     | <i>viii</i> |
| Introduction générale | 1           |

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction                                         | 5  |
| I.2. Les défaillances dans les machines électriques       | 5  |
| I.2. 1. Quelques statistiques                             | 6  |
| I.2. 2 Défaillances des roulements mécaniques             | 8  |
| I.2.3. Défaillances au rotor                              | 9  |
| I.2.3.1 Ruptures des barres dans les machines asynchrones | 10 |
| I.2.3.2 Ruptures d'anneaux                                | 10 |
| I.2.3.3 Excentricité statique et dynamique                | 11 |
| I.2.4 Défaillances au stator                              | 13 |
| I.2.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement             | 14 |
| I.2.4.2 Court-circuit entre spires                        | 14 |
| I.2.4.3 Court-circuit entre phases                        | 15 |
| I.2.4.4 Court-circuit phase-bâti / (défaut à la masse)    | 16 |
| I.2.4.5 Défauts de circuit magnétique                     | 17 |
| I.3. Surveillance des machines électriques                | 17 |
| I.3.1 Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut   | 17 |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| I.3.2 Approche signal                                        | 18 |
| I.3.3 Approche modèle                                        | 19 |
| I.4 Défaut court-circuit entre-spires au stator              | 20 |
| I.4.1 Définition                                             | 20 |
| I.4.2 Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne | 21 |
| I.5 Modélisation des défauts                                 | 22 |
| I.5.1 Méthode des réseaux de perméance                       | 23 |
| I.5.2 Méthode des circuits électriques                       | 24 |
| I.6 Conclusion                                               | 24 |

## CHAPITRE II. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASEE

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Introduction                                                                                        | 26 |
| II.2 Présentation de la machine asynchrone à bagues                                                       | 26 |
| II.2.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à bagues                                       | 27 |
| II.2.2 Domaines d'application de la machine asynchrone à bagues                                           | 28 |
| II.3 Modélisation de la machine asynchrone à bagues dans le référentiel ABC                               | 28 |
| II.3.1 Équations électriques                                                                              | 30 |
| II.3.2 Équations magnétiques                                                                              | 30 |
| II.3.3 Équations mécaniques                                                                               | 31 |
| II.3.4 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée                                 | 31 |
| II.3.5 Équations de la machine biphasée équivalente                                                       | 32 |
| II.3.6 Définition des différents référentiels                                                             | 32 |
| II.3.7 puissance absorbée et couple électromagnétique                                                     | 35 |
| II.4 Modélisation de la machine asynchrone à bagues avec défaut de court-circuit entre spires statoriques | 36 |
| II.4.1 Définition des paramètres du défaut                                                                | 37 |
| II.4.2 Équations électriques                                                                              | 38 |
| II.4.3 Équations magnétiques                                                                              | 38 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| II.4.4 Modèles Généralisés de la machine asynchrone à bagues            | 40 |
| II.5 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone triphasée | 41 |
| II.5.1 Schéma électrique équivalent                                     | 43 |
| II.5.2 Représentation d'état du modèle de défaut                        | 45 |
| II.6 Conclusion                                                         | 46 |

### CHAPITRE III. DIAGNOSTIC DU DEFAUT DE COURT-CIRCUIT PAR ANALYSE SPECTRALE

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction                                                                 | 48 |
| III.2 Méthode de traitement de signal                                              | 48 |
| III.2.1 La transformée de Fourier Rapide (FFT)                                     | 48 |
| III.2.2 Propriétés de la FFT                                                       | 48 |
| III.3 Etude de la machine asynchrone à l'état Sain                                 | 49 |
| III.3.1 Fonctionnement à vide                                                      | 49 |
| III.3.2 Fonctionnement en charge                                                   | 51 |
| III.4 Etude du comportement de la MAS avec un défaut de court-circuit entre spires | 53 |
| III.4.1 10% des spires de la phase "a" sont court-circuitées                       | 53 |
| III.4.2 20% des spires de la phase "a" sont court-circuitées                       | 56 |
| III.4.3 50% des spires de la phase "a" sont court-circuitées                       | 58 |
| III.4.4 80% des spires de la phase "a" sont court-circuitées                       | 60 |
| III.5 Conclusion                                                                   | 64 |
| III.5 Conclusion générale                                                          | 65 |
| Annexe                                                                             | 66 |
| Bibliographie                                                                      | 67 |

## *Liste des figures*

### **Chapitre I**

|           |                                                                                                                   |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. I.1  | Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances                                         | 6  |
| Fig. I.2  | Répartition des défauts dans les machines de fortes puissances                                                    | 7  |
| Fig. I.3  | Vue des éléments constitutifs d'un roulement à billes                                                             | 8  |
| Fig. I.4  | Défaut deux barres cassées                                                                                        | 10 |
| Fig. I.5  | Défaut d'un rotor à cage d'écureuil; rupture d'anneau de court-circuit                                            | 11 |
| Fig. I.6  | L'excentricité statique et dynamique                                                                              | 12 |
| Fig. I.7  | L'excentricité mixte                                                                                              | 12 |
| Fig. I.8  | Court-circuit dans une phase                                                                                      | 15 |
| Fig. I.9  | Dégradation causée par une surtension                                                                             | 16 |
| Fig. I.10 | Représentation de quelques grandeurs mesurable sur une machine électrique                                         | 18 |
| Fig. I.11 | Méthodes de surveillance d'une machine électrique soumise à un défaut                                             | 19 |
| Fig. I.12 | Principe général de la surveillance/diagnostic de MAS basé sur l'utilisation d'un modèle                          | 20 |
| Fig. I.13 | Un court-circuit entre spires dans une phase                                                                      | 21 |
| Fig. I.14 | Evolution des courants lors d'un court-circuit de 58 spires sur 464 spires dans la phase, résultats expérimentaux | 22 |

### **Chapitre II**

|           |                                                                          |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. II.1 | Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine             | 27 |
| Fig. II.2 | Représentation des enroulements d'une machine asynchrone                 | 29 |
| Fig. II.3 | Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents        | 32 |
| Fig. II.4 | Configuration du court-circuit entre spires dans la phase "a" statorique | 36 |
| Fig. II.5 | Premier modèle de la machine avec défaut statorique                      | 43 |
| Fig. II.6 | Modèle de la machine avec défauts statorique                             | 44 |

### **Chapitre III**

|            |                                                               |    |
|------------|---------------------------------------------------------------|----|
| Fig. III.1 | Courants statoriques de la MAS à l'état sain à vide avec zoom | 49 |
|------------|---------------------------------------------------------------|----|

|            |                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. III.2 | Spectre de courant statorique de MAS à vide à l'état sain                 | 50 |
| Fig. III.3 | Le couple électromagnétique de la MAS sain à vide                         | 50 |
| Fig. III.4 | La vitesse de la MAS sain à vide                                          | 50 |
| Fig. III.5 | Courants statoriques de la MAS à l'état sain en charge avec zoom          | 51 |
| Fig. III.6 | Le couple électromagnétique de la MAS sain en charge                      | 52 |
| Fig. III.7 | La vitesse de la MAS sain en charge                                       | 52 |
| Fig. III.8 | Courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 10%        | 54 |
| Fig. III.9 | Le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 10% | 55 |
| Fig.III.10 | La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 10%                  | 55 |
| Fig.III.11 | Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 10%  | 56 |
| Fig.III.12 | Courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 20%        | 56 |
| Fig.III.13 | Le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 20% | 57 |
| Fig.III.14 | La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 20%                  | 57 |
| Fig.III.15 | Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 20%  | 58 |
| Fig.III.16 | Courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 50%        | 58 |
| Fig.III.17 | Le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 50% | 59 |
| Fig.III.18 | La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 50%                  | 59 |
| Fig.III.19 | Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 50%  | 60 |
| Fig.III.20 | Courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 80%        | 60 |
| Fig.III.21 | Le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 80% | 61 |
| Fig.III.22 | La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 80%                  | 61 |
| Fig.III.23 | Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 80%  | 62 |

---

## ***Liste des tableaux***

### **Chapitre II**

|           |                                                                               |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. II.1 | Expressions des paramètres                                                    | 39 |
| Tab. II.2 | Matrices $R1$ , $L1$ , $L2$ par rapport à défauts dans les différentes phases | 40 |

## *Notations symboliques*

|                |                                                                              |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $g$            | glissements                                                                  |
| $\omega_{gl}$  | la vitesse angulaire de glissement                                           |
| $\omega_s$     | la vitesse angulaire de synchronisme                                         |
| $f_r$          | Fréquence de rotor                                                           |
| $f$            | Fréquence de stator                                                          |
| $v_s$          | Tension d'une phase statorique                                               |
| $v_r$          | Tension d'une phase rotorique                                                |
| $\varphi_s$    | Flux d'une phase statorique                                                  |
| $\varphi_r$    | Flux d'une phase rotorique                                                   |
| $R_s$          | Résistance de chaque enroulement du stator                                   |
| $R_r$          | Résistance de chaque enroulement du rotor                                    |
| $i_s$          | Courant d'une phase statorique                                               |
| $i_r$          | Courant d'une phase rotorique                                                |
| $L_s$          | Inductance de chaque enroulement du stator                                   |
| $L_r$          | Inductance de chaque enroulement du rotor                                    |
| $M_{sr}$       | Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor |
| $M_s$          | Inductance mutuelle entre deux phases statoriques                            |
| $M_r$          | Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques                             |
| $l_s$          | Inductance propre d'une phase statorique                                     |
| $l_r$          | Inductance propre d'une phase rotorique                                      |
| $L_{\sigma s}$ | Inductances de fuites du stator                                              |
| $L_{\sigma r}$ | Inductances de fuites du rotor                                               |
| $\Phi_f$       | Flux magnétiques pour les spires court-circuitées                            |
| $i_f$          | Courant de court-circuit                                                     |
| $R_f$          | Résistance pour les spires court-circuitées                                  |
| $L_m$          | Inductance magnétisante                                                      |
| $\theta_r$     | Angle entre les phases a dû stator et celle du rotor                         |

|                                 |                                              |
|---------------------------------|----------------------------------------------|
| $\omega_r = p . \Omega$         | vitesse électrique de rotation du rotor      |
| $\omega_a = \frac{d\theta}{dt}$ | vitesse de rotation du référentiel           |
| $C_{em}$                        | couple électromagnétique                     |
| $C_r$                           | couple résistant                             |
| $f_r$                           | coefficient de frottement                    |
| $j$                             | moment d'inertie                             |
| $p$                             | Nombre de paire de pôles                     |
| $p_a$                           | La puissance absorbée par le MAS             |
| $p_{em}$                        | la puissance électromagnétique               |
| $f_x$                           | le paramètre de localisation de défaut $f_x$ |
| $\mu$                           | le pourcentage de spires court-circuitées    |

# *Introduction générale*

## **INTRODUCTION GENERALE :**

La surveillance des machines électriques tournantes est aujourd'hui un élément indispensable et essentiel de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement des systèmes électriques. Les aspects de diagnostic et détection de défaut des organes de conversion électromécanique en font partie intégrante et requièrent la mise au point de techniques de mesure, d'acquisition, d'analyse et d'aide à la décision.

Les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique.

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 manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines.

Généralement, les méthodes de diagnostic nécessitent la connaissance de l'état sain de la machine quelle que soit la grandeur physique exploitée. La détection d'un défaut est alors basée sur la comparaison de la signature d'un état donné avec celle de l'état supposé sain, en considérant un indicateur issu d'une mesure que l'on sait être sensible à un défaut particulier. La difficulté de cette démarche est que, souvent, les indicateurs sensibles existent déjà pour la machine saine (cas de raies d'un spectre). C'est alors leur variation, souvent leur augmentation, qui est susceptible de donner des informations sur la présence d'un défaut. D'autre part, la charge de la machine peut constituer pour le diagnostic un facteur perturbant, car elle induit plusieurs états sains.

La modélisation des défauts dans les systèmes industriels et particulièrement les défauts d'ordre électriques, est une première étape nécessaire pour prédire le comportement du système en présence d'un défaut ou dès son apparition. Cette prédiction est nécessaire pour diverses raisons que nous allons présenter de manière non exhaustive.

La modélisation locale des effets de Ce défaut permet de prédire si le système peut continuer à fonctionner ou s'il faut l'arrêter immédiatement.

Etant donné qu'à la suite d'un défaut électrique statorique, il peut s'établir des courants d'amplitude dangereusement élevée dans certaines parties du bobinage statorique de machines électriques.

Dans ce contexte, nos travaux se sont orientés vers la modélisation des machines asynchrones en présence de défauts électriques, et particulièrement un défaut de court-circuit entre spires.

Le mémoire est structuré en trois chapitres:

- Le premier chapitre présente les différents types de défaillances qui peuvent survenir sur les machines électriques. Une étude bibliographique sur les différents types de défauts (électriques, mécaniques...) pouvant se produire dans les machines électriques est présentée ainsi que les méthodes de surveillance d'apparition de ces défauts.
- Le deuxième, est consacré à la modélisation de la machine asynchrone saine et défaillante. en présence d'un défaut de court-circuit entre spires d'une phase statorique et des modèles triphasé - biphasé dans les repères tournants de la famille des « repères de Park.
- Le troisième chapitre est la partie des résultats de simulation on présente des spectres et signatures obtenu des courants statoriques par le FFT et des grandeurs mécanique avec leurs interprétations.

La conclusion générale.

# Chapitre I

## *Etude bibliographique*

## **I.1 Introduction**

L'étude des défauts dans les dispositifs électriques est un domaine qui a pris une place importante depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels. En effet, la continuité de service est une qualité importante et incontournable que doit avoir tout système de nos jours pour satisfaire les exigences de l'utilisateur. Les éléments d'un système sont interdépendants si bien qu'une panne dans un élément peut entraîner l'arrêt total du système et ce type de situations a un coût non négligeable dans certaines applications [1].

Au cours de leur durée de vie, les machines électriques tournantes sont bien souvent soumises à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à certain nombre de défaillances [2].

Dans ce chapitre, nous citons des différents défauts dans les machines électriques, leur classification et leurs origines. Ensuite en va définir deux approches qui sont très importantes.

Après nous avons défini, le défaut de court-circuit entre spires statoriques particulièrement dans la machine asynchrone et leur influence sur les courants de lignes.

Nous présentons ensuite, sur la modélisation des défauts, en mettant l'accent sur les différentes méthodes de surveillance et de diagnostic les plus fréquemment utilisées.

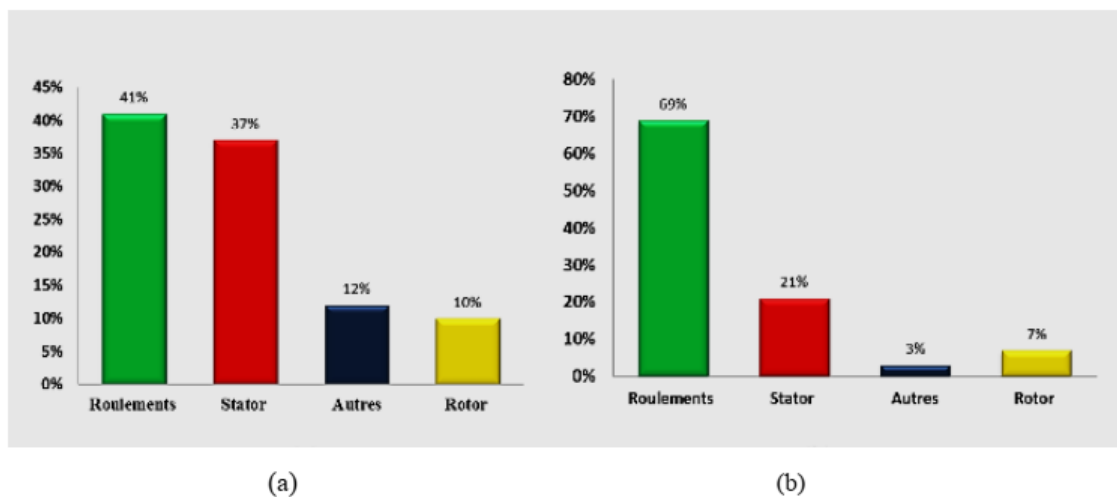
## **I.2 Les défaillances dans les machines électriques**

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques [1]. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes:

- les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations...
- Les amplificateurs de défauts: surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement...
- Les vices de fabrication et les erreurs humaines: défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine.....

### I.2.1 Quelques statistiques

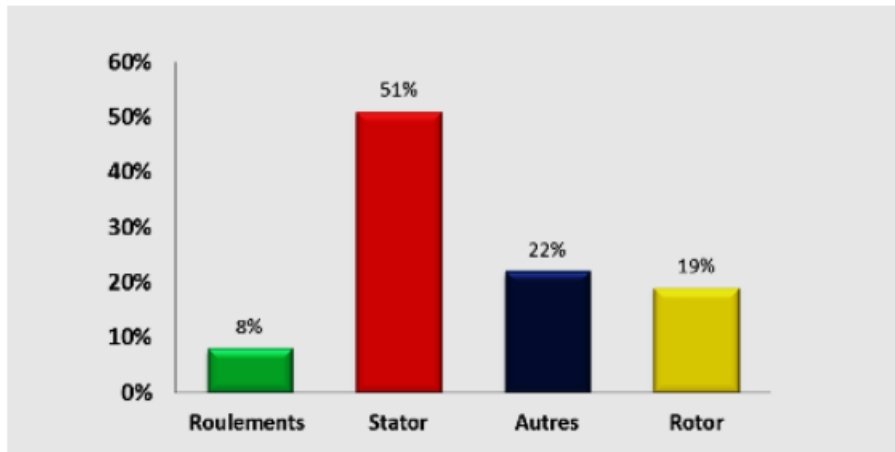
Statistiquement, ce n'est pas facile de donner une répartition exacte des défaillances des machines électriques, car l'enregistrement des pannes et des défaillances n'est pas systématique dans l'industrie exploitant des machines électriques tournantes [3].



**Figure I.2:** Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances [3].

Depuis les années 80, plusieurs études statistiques sur les défaillances des machines électriques ont été effectuées. Ces études concernent généralement des machines de moyennes et grandes puissances. Ainsi, les travaux de Thorsen et Dalva, réalisés dans

les années 90 sur des machines de 10 kW à 1 MW, montrent que les pannes mécaniques sont les plus fréquentes avec une majorité de 41% au niveau des roulements. Les pannes au stator représentent 37% et les moins fréquentes sont les pannes au rotor avec 10% (figure I.1.a) [3].



**Figure.I.1:** Répartition des défauts dans les machines de fortes puissances [3].

Toujours sur les machines de grandes puissances, une autre étude, réalisée une décennie plus tard, montre que 69 % des pannes se produisent au niveau des roulements, 21% au stator, 7% au niveau du rotor et 3% à d'autres niveaux de la machine (figure I.1.b). Cette répartition confirme que les défauts des machines électriques de grande puissance se produisent majoritairement au niveau des roulements et du bobinage statorique [3].

Par ailleurs, nous trouvons une autre étude sur des machines de faible et moyenne puissances (50kW – 200kW) qui montre que les défauts sont principalement situés au stator avec 51 %, ensuite au rotor avec 19 % et enfin 22 % qui englobent le reste : roulement, borniers, etc. (figure I.2). Cette même étude a constaté que les pannes au niveau du stator sont passées de 78% à 60% entre 1973 et 1988. Cela peut être également expliqué par l'amélioration des matériaux pour l'isolation comme pour les machines de grande puissance [3].

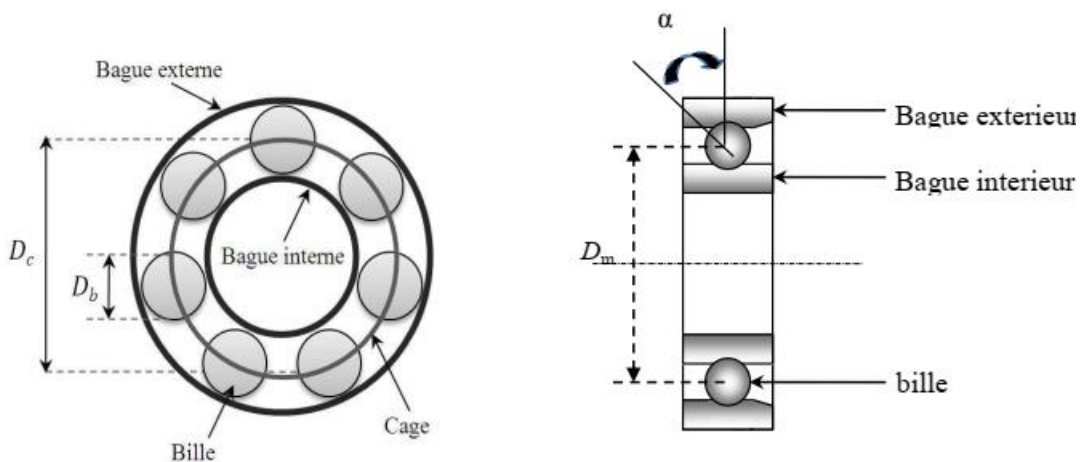
De ces exemples, nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance. Evidemment, ces statistiques évoluent avec le type de machines, le type d'alimentation, par exemple l'alimentation par

onduleur, l'augmentation de la vitesse, et l'environnement de fonctionnement de la machine qui peut être plus ou moins hostile [1].

IL est à noter qu'actuellement les machines électriques asynchrone ou synchrone sont souvent alimentées par des onduleurs de tension dont la fréquence de commutation de leurs composants augmente de plus en plus. Les bobinages de ces machines subissent des surtensions de niveaux plus élevés, ce qui entraîne le vieillissement prématuré de leur isolant et augmente ainsi le taux d'apparition de défauts électriques dans ces bobinages notamment ceux statoriques [1].

### **I.2.2 Défaillances des roulements mécaniques**

Les roulements à bille jouent un rôle très important dans la machine asynchrone comme tout type de machines tournantes. Les défauts de roulements peuvent être provoqués par un mauvais choix de matériau au cours de la fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causé par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. La graisse de lubrification qui garantit une bonne rotation en minimisant les effets des frottements, peut se rigidifier et causé une résistance à la rotation [4].



**Figure I.3:** Vue des éléments constitutifs d'un roulement à billes [11].

avec:

$D_b$  : Diamètre d'une bille.

$D_m$  : Diamètre moyen du roulement.

$D_c$  : Diamètre de la cage (entre les centres de deux billes opposées).

$\alpha$  : Angle de contact de la bille avec les bagues.  $N_b$  : Nombre de billes.

$f_r$ : Fréquence de rotation mécanique.

Ce type de défaut est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances, il est généralement lié à l'usure des roulements et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont l'usure due au vieillissement, une température de fonctionnement élevée, la perte de lubrification, l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande enroulement), le défaut d'assemblage, les courants d'arbres [4].

Ce type de défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans le cas le plus défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du rotor [4].

### **I.2.3 Défaillances au rotor**

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie rotorique au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer des problèmes tels que, Thermique (surchauffe), électromagnétique (excentricité), résiduel (déformation), dynamique (Arbre de transmission) et mécanique (roulement) [1].

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

- Rupture de barres dans les machines asynchrones
- Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit dans les machines asynchrones
- Excentricité statique et dynamique
- Désaimantation (MSAP)

### I.2.3.1 Ruptures des barres dans les machines asynchrones:

La cassure ou rupture des barres sont 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 de court-circuit. 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 [5]. 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 [5].

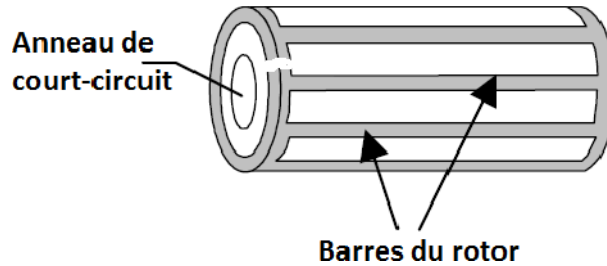


**Figure I.4:** Défaut deux barres cassées

### I.2.3.2 Ruptures d'anneaux:

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture des barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure I.5), [6]: La rupture d'une portion de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage, est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux comme il est difficile de le détecter, 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 [1].



**Figure I.5:** Défaut d'un rotor à cage d'écureuil; rupture d'anneau de court-circuit [6].

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 [1].

### **I.2.3.3 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 [7].

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 [7].

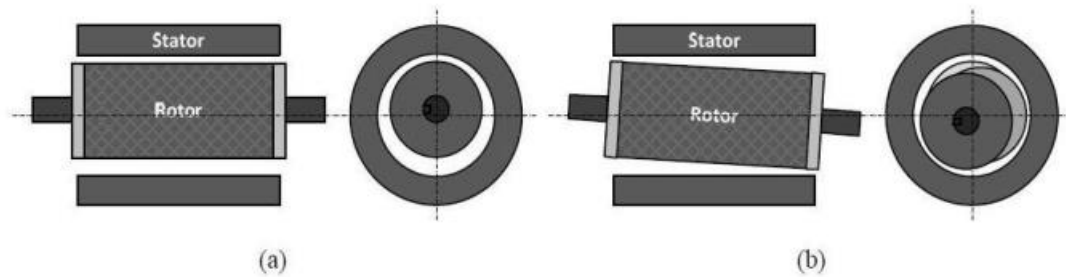
- Trois cas d'excentricité sont généralement distingués:

▪ *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.6-a)).

▪ *L'excentricité dynamique:*

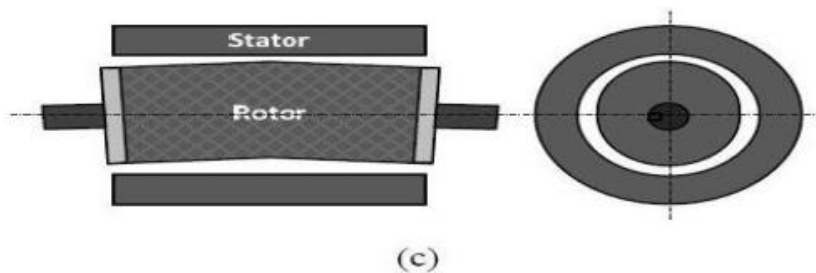
Corresponds, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator (Figure (I.6-b)). Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.



**Figure I.6:** L'excentricité statique et dynamique [8].

▪ *L'excentricité mixte :*

C'est la somme les deux cas (Figure (I.7)):



**Figure I.7:** L'excentricité mixte [8].

### I.2.4 Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème thermique (surcharge), électrique (diélectrique), mécanique (bobinage,) et environnemental (agression...etc.). Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit [9]:

- **Thermique:** l'isolation est conçue pour avoir une certaine durée de vie à la température nominale. Toutefois, si la température augmente au-dessus de cette température de fonctionnement, la durée de vie raccourcit rapidement. Cette augmentation de la température peut être due à une variation de tension ou de déséquilibre, à la répétition des démarrages dans un court laps de temps, à des surcharges, à une mauvaise ventilation ou alors à une haute température ambiante.
- **Electrique:** Une tension supérieure à la valeur nominale ou le fermeture des interrupteurs du convertisseur statique, vont conduire à la dégradation du diélectrique assurant l'isolation des bobines. La présence d'un fort champ électrique interne conduira à des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Il en résulte des spots carbonisés dans l'isolation. Ces spots causent des déformations du champ électrique (augmentation dans la région du défaut).
- **Mécanique:** les démarrages répétitifs de machine ont pour conséquence d'augmenter la température dans le cuivre (bobinage statorique et cage). Cet effet cyclique provoque des dilatations et contractions répétitives de l'isolant. Cela pourrait entraîner des fissures dans l'isolant qui peuvent se propager et provoquer un début de court-circuit interne. Les efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs ont des composantes alternatives qui provoquent des vibrations de la structure. Ces vibrations provoquent l'érosion et l'abrasion de l'isolant entraînant leur détérioration.
- **Environnemental:** La présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant peut détériorer la qualité de l'isolation et conduire à défaut d'enroulement. Le début de la dégradation entraîne des courants de fuites qui accélèrent la détérioration de l'isolant jusqu'au court-circuit franc. Une autre conséquence est la création de l'ozone et les oxydes d'azote qui peuvent se combiner avec l'humidité pour former de l'acide nitrique, qui détruit l'isolant.

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 entre phase et bâti, défaut de circuit magnétique [9].

#### **I.2.4.1 Défauts d'isolant dans un enroulement:**

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique...etc.) 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 thermique, électrique et mécanique.

De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce dernier se dégrade de manière prématurée ou accélérée, jusqu'à la cassure totale. Les différentes causes pour ce type de défaut sont [8]:

- 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, ou à une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- Vieillessement 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.2.4.2 Court-circuit entre spires:**

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Ce défaut 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

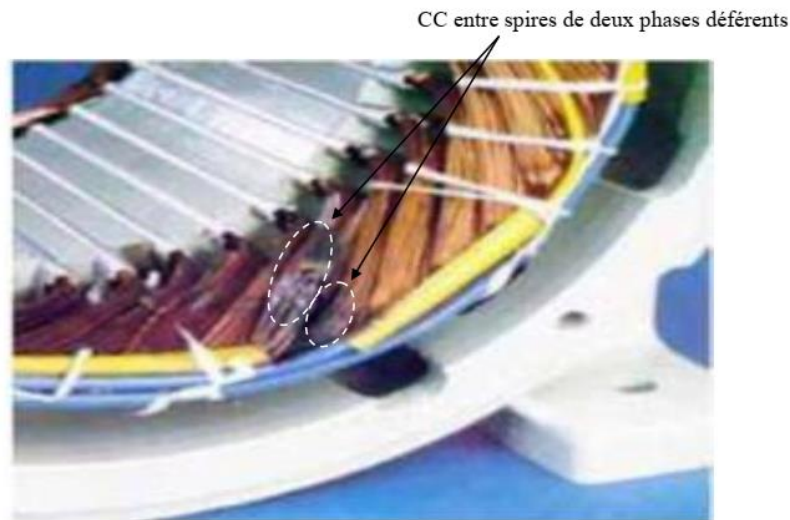
amplifie les courants dans le circuit rotorique dans le cas des machines asynchrones. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations de couple liées au déséquilibre des courants de phases engendré par le défaut [8].



**Figure.I.8:** Court-circuit dans une phase [8].

#### **I.2.4.3 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 a de moins graves conséquences; il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de la fusion des conducteurs [8].



**Figure.I.9:** Dégradation causée par une surtension [8].

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre dépend de la Localisation du défaut. Dans le cas des machines asynchrones, les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce type de défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [8].

#### **I.2.4.4 Court-circuit phase-bâti / (défaut à la masse):**

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. A l'exception des effets capacitifs, le bâti prend, alors, le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit [1].

Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux. 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 [1].

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, ce type de 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 [1].

#### **I.2.4.5 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 sur tension, d'élévation importante du courant, etc... [1].

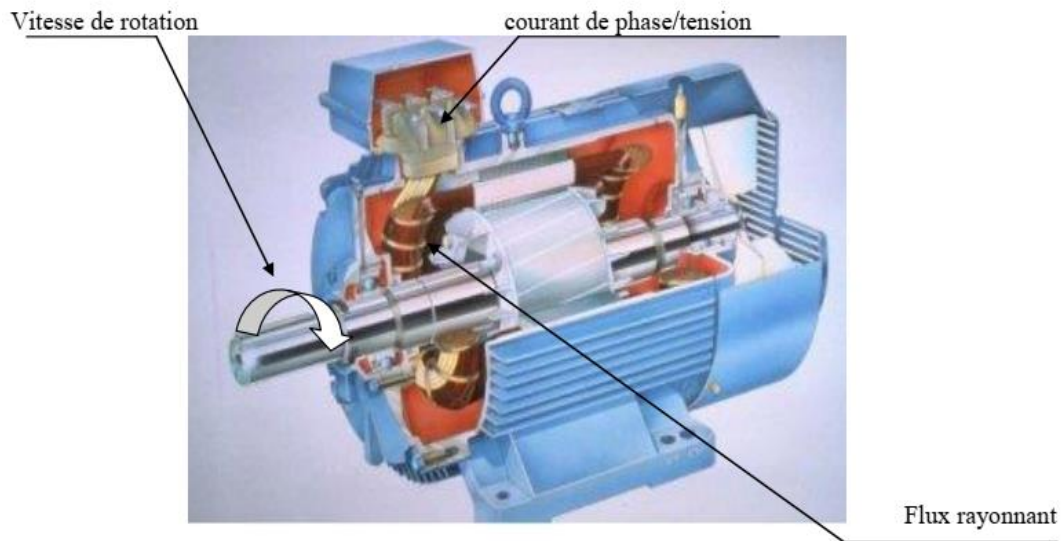
### **I.3 Surveillance des machines électriques**

#### **I.3.1 Des grandeurs mesurables et des signaux de défaut**

C'est l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut qui est la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts sur les machines électriques. Les grandeurs et signaux de défauts les plus fréquemment utilisés sont [10]:

- Les courants statoriques.
- Le flux rayonnant de dispersion.
- La tension d'alimentation.
- La tension de neutre.
- Le couple électromagnétique.
- La vitesse de rotation.
- La puissance instantanée.
- Les courants dans le repère de Park
- La vibration mécanique.

Ces signaux donnent des informations qui peuvent être ou non redondantes. Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux. Le traitement des informations mesurées est un travail d'identification de la panne à travers sa signature [10].



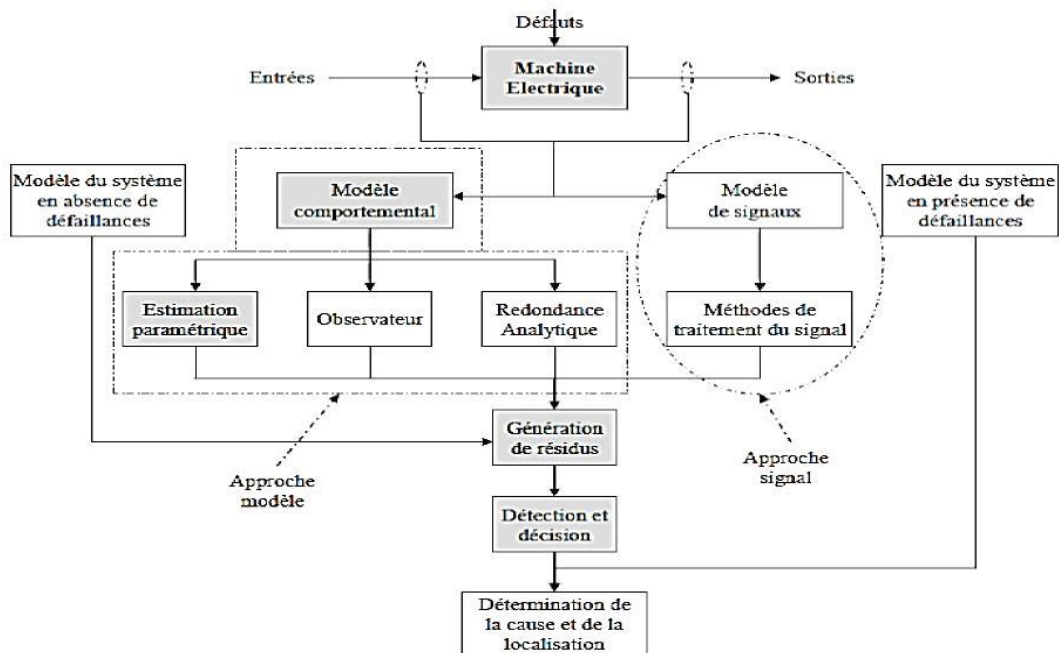
**Figure.I.10:** Représentation de quelques grandeurs mesurable sur une machine électrique [10].

### I.3.2 Approche signal

Le principe de la détection d'un défaut statorique par une approche signal repose sur l'existence, en cas de court-circuit entre spires, de propriétés particulières de certains signaux physiques prélevés sur la machine en fonctionnement. A partir de modèles de signaux, établis analytiquement, ou à partir de simulation, des signatures témoignant de la présence d'une défaillance peuvent être établis. Les courants statoriques sont également largement utilisés dans les stratégies de détection / diagnostic des défauts statoriques des machines. Les perturbations des forces magnétomotrices induites par le court-circuit statoriques induisent la présence d'harmoniques supplémentaires sur les courants statoriques des machines, ces signatures fréquentielles particulières sont analysées à l'aide de représentations fréquentielles pour mettre en évidence la présence des défauts [8].

Dans certains travaux, les courants statoriques sont exploités par l'intermédiaire de transformation comme la transformation de Park. Le vecteur courant ainsi obtenu présente alors des propriétés intéressantes pour réaliser une détection des défaillances liées aux court-circuits statoriques. Par des traitements appropriés, l'amplitude et la phase du vecteur de Park sont analysées pour mettre en

évidence l'apparition de composantes fréquentielles témoignant de l'apparition du défaut [8].

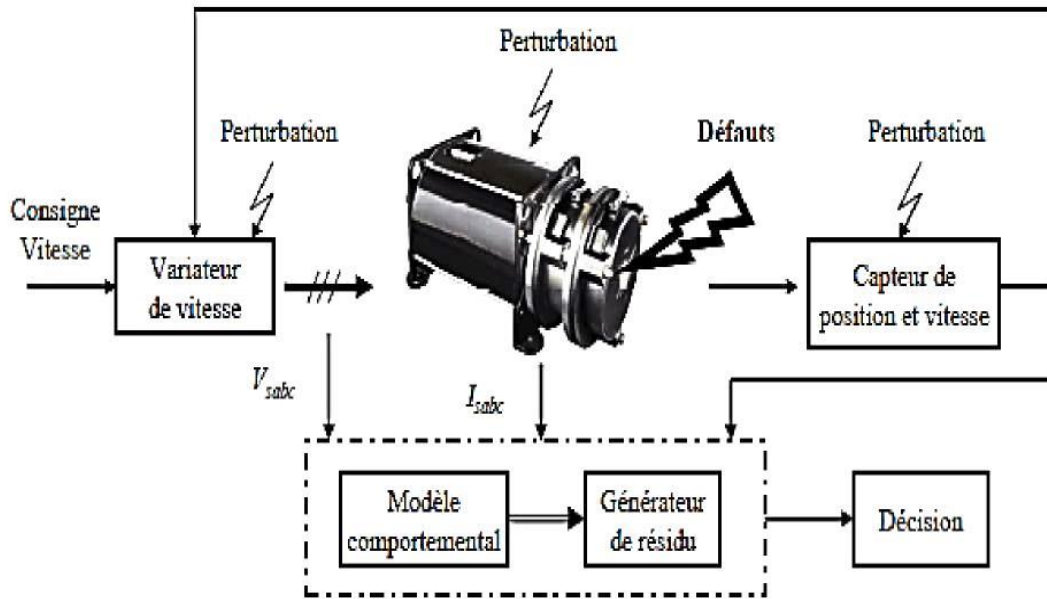


**Figure I.11:** Méthodes de surveillance d'une machine électrique soumise à un défaut [8].

### I.3.3 Approche modèle

Le principe de la détection de défauts statoriques par une approche modèle repose sur la comparaison du comportement réel de la machine avec celui fourni par un modèle de représentation de la machine auquel sont appliquées les mêmes excitations qu'au système réel.

La forme du modèle utilisé peut prendre plusieurs formes. Il peut être simplement basé sur une représentation en régime sain de la machine ou inclure dans sa formulation des éléments supplémentaires relatifs au défaut surveillé. Dans tous les cas, le principe de comparaison entre un dispositif surveillé et un modèle fait apparaître des différences comportementales de certaines grandeurs caractéristiques liées au fonctionnement de la machine. Ces différences sont appelées résidus. Ces résidus sont alors utilisés comme entrées d'un processus de détection des défauts [8]. Ce principe est illustré sur la (Figure I-12):



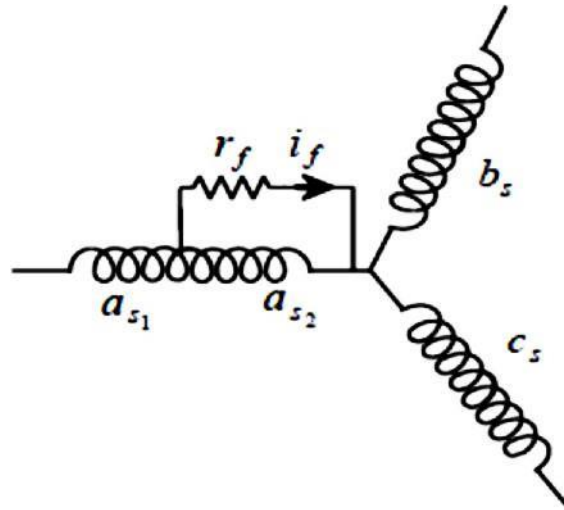
**Figure I.12:** Principe général de la surveillance/diagnostic de MAS basé sur l'utilisation d'un modèle [8].

## I.4 Défaut court-circuit entre-spires au stator

### I.4.1 Définitions:

Dans cette mémoire de fin étude nous intéressons à la modélisation et l'étude de défauts entre spires de l'enroulement statorique afin de pouvoir diagnostiquer ce défaut. Un défaut entre spires indique dégradation de l'isolant entre des spires d'un enroulement d'une même ou bien d'autre phase du stator. 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 [12].

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [12]. Le bobinage du stator de la machine avec défaut entre spires est représenté dans la (figure I.13):



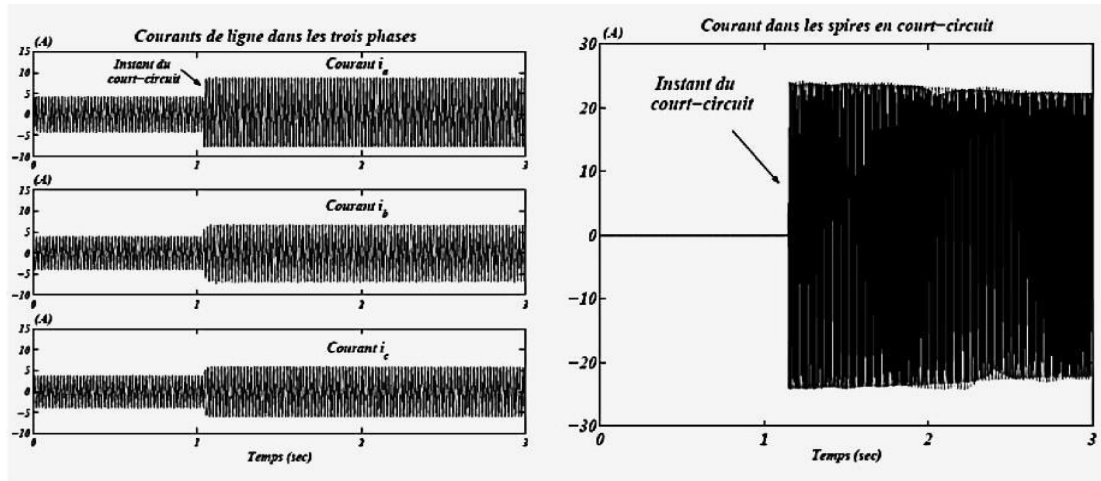
**Figure.I.13:** Un court-circuit entre spires dans une phase [1].

### I.4.2 Influence d'un court-circuit sur les courants de ligne

Un défaut entre spires dans le bobinage du stator de machines électriques provoque un courant de circulation dans les spires en défaut dont l'amplitude peut être très importante. Si le défaut reste non détecté, il se propage et peut aboutir à défauts de spire-spire ou alors spire-masse. L'augmentation de la chaleur due au court-circuit peut également conduire à la dégradation totale de l'enroulement du stator. En effet, le courant circulant dans les spires en court-circuit est plusieurs fois plus important que le courant nominal. L'augmentation de la température qui s'en suit entraîne la destruction en cascade des isolants et par effet cumulatif, la destruction complète de la machine [1]. La figure (I-14) montre la montée en courant dans les phases (abc) du stator suite à un court-circuit de 58 spires de 464 spires sur la phase (as) d'une machine de 1.1 kW à vide et alimenté directement par le réseau [1].

On remarque que le courant de la phase en défaut atteint trois fois le courant nominal de la machine. Notons que même si le défaut concerne uniquement la première phase (phase  $a$ ) statorique, toutes les phases sont affectées par le court-circuit [1].

Dans des cas bien plus grave, l'observation des spires en court-circuit révèle un courant d'environ 10 fois le courant nominal de la machine



**Figure.I.14:** Evolution des courants lors d'un court-circuit de 58 spires sur 464 spires dans la phase, résultats expérimentaux [1].

. Les fils en cuivre n'étant pas dimensionnés pour cette amplitude, il est évident que l'effet du court-circuit est destructeur en quelques secondes. La détection de défaut entre spires dès son apparition est donc indispensable pour éviter de court-circuit complet. Cela nous permet de réduire les temps d'arrêt et maintenance [1].

D'une façon générale, à la suite d'un court-circuit, apparaissent des vibrations et des oscillations de couple synonymes de présence de nouvelles composantes dans le couple électromagnétique, et par conséquent dans les courants statoriques. En effet, un court-circuit de spires est à l'origine d'un nouveau bobinage monophasé au stator traversé par un fort courant, il en résulte un champ magnétique additionnel dans la machine de fréquences  $= f_s$  (où  $f_s$  est la fréquence de synchronisme). Ces nouvelles composantes entraînent des harmoniques de fréquences  $k.f_s$  dans les courants absorbés par la machine [1].

## I.5 Modélisation des défauts

La modélisation et l'identification des paramètres de la machine électrique avec défaut entre spires du bobinage stator sont des étapes importantes pour la détection de ce type de défaut et son diagnostic. Les modèles doivent présenter un compromis entre simplicité et précision. L'utilisation des modèles externes simplifiés de défaut peut s'avérer limitée, car il est difficile, même théoriquement,

d'inclure toutes les imperfections qui existent dans la machine en présence d'un défaut. Toutefois, les modèles sont nécessaires pour étudier le comportement des différentes variables de la machine et d'en déduire des signatures caractéristiques d'un défaut quelconque. L'étude du comportement des machines électriques avec défaut grâce à ces modèles permet la prédiction des grandeurs externes qui peuvent être mesurées et exploité par des techniques de diagnostic [1].

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire l'évolution des variables internes de fonctionnement de la machine électrique [1].

Nous citons les deux grandes familles de modèles pouvant être adaptés aux dispositifs électromagnétiques en général, et aux machines électriques en présence de défaut en particulier; à savoir [1]:

- Les modèles de circuits magnétiques utilisant les réseaux de perméance.
- Les modèles de circuits électriques.

Les modèles de circuits magnétiques ou circuits électriques sont plutôt mis en œuvre avec des méthodes de résolution d'équation différentielles ordinaires.

Nous présentons un bref rappel des deux types de méthodes parmi plusieurs types souvent utilisées dans ces cas:

### **I.5.1 Méthode des réseaux de perméance**

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition du circuit magnétique de la machine électrique en tubes de flux élémentaires. Chaque tube ainsi obtenu, est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer  $\mu_r$  [12].

Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer qui varie en fonction de la position du rotor de la machine [12].

### **I.5.2 Méthode des circuits électriques**

Tout circuit magnétique, qu'il soit statique (transformateur) ou dynamique (machine tournante) peut être modélisé par un circuit électrique équivalent. Ce circuit fait intervenir des résistances, des inductances et des mutuelles dont les valeurs peuvent être déterminées de différentes manières. Dans les modèles circuits, la première étape consiste à représenter le dispositif par autant de circuits couplés qu'il en existe physiquement [1].

Les modèles circuits électriques sont rapides et prennent très peu de temps de calcul. Par contre, il est nécessaire de vérifier que les phénomènes physiques sont correctement représentés par ces modèles circuits électriques et de s'assurer de la pertinence des méthodes d'identification de leurs paramètres [1]

Ces modèles circuits électriques nécessitent une bonne représentativité des phénomènes physiques par un circuit électrique simplifié et une bonne identification des paramètres de ce circuit équivalent avec une méthode quelconque. Les inductances propres et mutuelles sont des paramètres importants de la machine; elles prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître dans la machine [1].

### **I.6 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents types de défauts pouvant survenir dans une machine électrique. Ils peuvent être d'origine électrique, mécanique ou magnétique. Un des défauts les plus rencontrés étant le court-circuit entre spires qui est souvent dû à la dégradation de l'isolant suite à un échauffement excessif ou un champ électrique fort. A cet effet notre travail consiste le court-circuit entre spires statorique de moteur asynchrone.

# Chapitre II

## *Modélisation de la machine asynchrone triphasée*

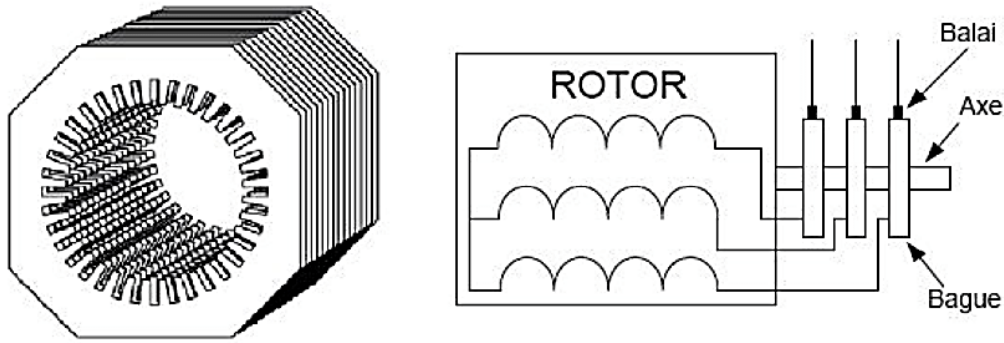
## II.1 Introduction

Dans ce chapitre on décrit le modèle dynamique d'une machine asynchrone à rotor bobiné. La machine asynchrone à rotor bobiné se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre.

Afin d'établir la modélisation de la machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine asynchrone à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles.

## II.2 Présentation de la machine asynchrone triphasée à bagues

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La machine asynchrone à bagues on à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées synchrone. Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne. La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à bagues [2]



**Fig II-1** : Structure du stator et des contacts rotoriques de la machine [2].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.

### II.2.1 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à bagues

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant des f.m.m des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi f$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega$  ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f.m.m des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que [2].

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = g\omega_s \quad (II.1)$$

Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés

Pour que la rotation du vecteur résultant des f.m.m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence, définie à partir de :

$$\omega_{gl} = 2\pi f_r \quad \text{C'est-à-dire} \quad f_{r0} = f g$$

### **II.2.2 Domaines d'application de la machine asynchrone à bagues [1]**

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la machine asynchrone à rotor bobiné est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens.

La machine asynchrone à rotor bobiné peut être utilisée comme moteur dans des applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines ;
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime ;
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

De plus, le fonctionnement en générateur présente la machine asynchrone à rotor bobiné comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

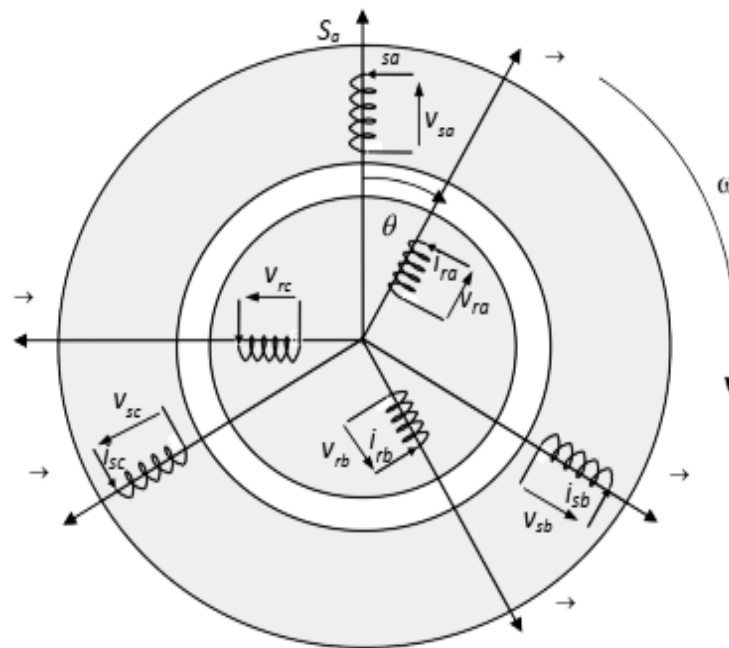
### **II.3 Modélisation de la machine asynchrone triphasée à bagues dans le référentiel ABC [12]**

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le but de diagnostic du défaut de court-circuit entre spires, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont :

- L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;
- La f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale ;
- La symétrie de construction est parfaite.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [11]

- L'additivité des flux ;
- La constance des inductances propres ;
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.



**Fig II.2:** Représentation des enroulements d'une machine asynchrone [11]

Nous allons procéder à l'établissement des équations mathématiques qui régissent le fonctionnement de la machine asynchrone triphasée.

### II.3.1 Équations électriques

Nous partons des équations générales de la machine asynchrone à rotor bobine qui s'écrivent à partir de la loi de Faraday qui donne la relation entre la tension  $\mathbf{v}$  aux bornes d'une bobine de résistance  $R$ , d'inductance  $\mathbf{L}$ , le courant  $\mathbf{I}$ , et la variation de flux  $\varphi$  dans un repère triphasé

Elles concernent les tensions triphasées statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} [v_s] = \frac{d}{dt} [\varphi_s] + R_s [i_s] \\ [v_r] = \frac{d}{dt} [\varphi_r] + R_r [i_r] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

où les tensions des trois phases statoriques et rotoriques, sont respectivement

$$[v_s] = (v_a, v_b, v_c)^T \quad \text{et} \quad [v_r] = (v_A, v_B, v_C)^T$$

et les vecteurs des courants traversant ces phases sont:

$$[i_s] = (i_a, i_b, i_c)^T \quad \text{et} \quad [i_r] = (i_A, i_B, i_C)^T$$

les vecteurs des flux totalisés traversant les enroulements statoriques et rotoriques sont :

$$[\varphi_s] = (\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c)^T \quad \text{et} \quad [\varphi_r] = (\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C)^T$$

Les matrices de résistances statorique et rotorique

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

### II.3.2 Équations magnétiques

Les expressions des flux statoriques et rotoriques sous forme matricielle condensée s'écrivent :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_s][i_s] + M_{sr} [i_r] \\ [\varphi_r] = [L_r][i_r] + M_{rs} [i_s] \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

avec

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix} ; \quad [L_r] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

où :

$\theta_r$  : Angle entre les phases a dû stator et celle du rotor.

$l_s, (l_r)$  : Inductance propre d'une phase statorique (rotorique).

$M_s, M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotoriques).

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une phase du rotor.

### II.3.3 Équation mécanique

Elle exprime la relation entre couple moteur et couple résistant.

$$C_{em} - C_r - f_r \Omega = j \frac{d}{dt} \Omega \quad (II.4)$$

$C_{em}, C_r, f_r, j$  : couple électromagnétique, couple résistant, coefficient de frottement et moment d'inertie, respectivement.

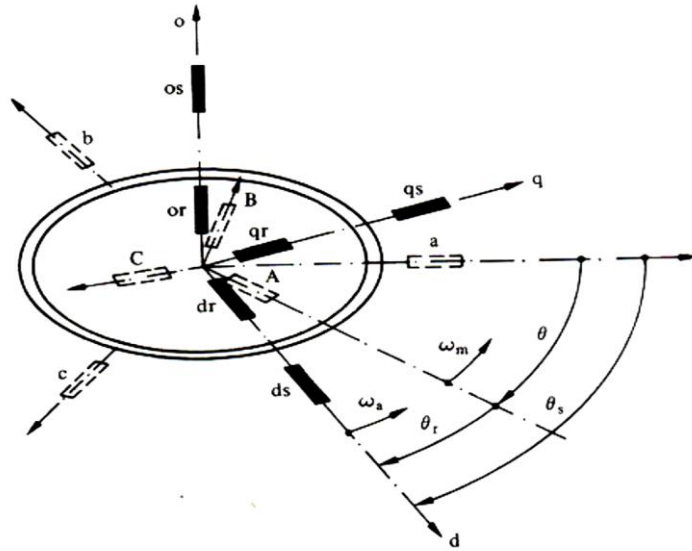
Nous aboutirons ainsi à un système de six équations différentielles et une expression du couple dont certains coefficients font intervenir des fonctions sinusoïdales dues au mouvement de rotation du rotor, d'où la complexité de la résolution analytique. Afin de surmonter cette difficulté, on va considérer les enroulements biphasés équivalents aux enroulements statoriques et rotoriques.

### II.3.4 Transformation de Park applique à la machine asynchrone triphasée

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents. Ainsi les enroulements statoriques  $a, b, c$  sont remplacés par 3 enroulements équivalents

$ds, qs, os$  et les enroulements rotoriques  $A, B, C$  par  $dr, qr, or$ . La matrice de transformation de Park est telle que :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$



**Fig. II.3** - Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents [12].

$\omega_a$  Désigne la vitesse angulaire électrique du système d'axes  $d, q, o$  et  $\omega_m$  celle du rotor.

Les tensions, courants et flux dans le nouveau repère sont définis comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

### II.3.5 Équations de la machine biphasée équivalente

Pour simplifier la représentation des équations électriques de la machine asynchrone, on a utilisé la transformation de Park, permettant de rendre la matrice impédance indépendante de la variable  $\theta_r$ .

Les équations électriques et magnétiques donnent alors le système suivant :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \\ v_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.7)$$

Dans cette équation apparaît une tension nulle au rotor correspondant au court-circuit des enroulements.

et les équations de flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (II.8)$$

en posant :

$$\omega_a = \frac{d\theta}{dt} \text{ vitesse de rotation du référentiel.}$$

$$\omega_r = p \cdot \Omega = p \frac{d\theta_r}{dt} \text{ vitesse électrique de rotation du rotor .}$$

$L_s, L_r$  : Inductances propres cycliques du stator et du rotor respectivement

$M$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$$M = \frac{3}{2} M_{sr} .$$

### II.3.6 Définition des différents référentiels [13]

Le référentiel est le système (d, q) associé à la rotation  $\omega_a$ . Dans notre cas, nous allons adopter un seul référentiel pour le rotor et le stator. Il existe trois possibilités de référentiels dans la pratique :

- Référentiel fixe par rapport au stator : il se traduit par la condition :  $\omega_a = 0$

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Le référentiel fixe est intéressant lorsqu'on veut étudier la variation de la fréquence d'alimentation, associée ou non à la variation de la vitesse de rotation.

- Référentiel fixe par rapport au rotor  $\omega_a = \omega_r$  :  
il correspond aux transformations des grandeurs de la machine dans un référentiel tournant à la vitesse du rotor,

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_r \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Ce référentiel est particulièrement avantageux dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse de rotation du rotor est considérée comme constante, par exemple pour l'étude des contraintes résultant d'un court-circuit.

- Référentiel fixe par rapport au champ tournant  $\omega_a = \omega_s$  :
- il correspond aux transformations des grandeurs de la machine dans un référentiel tournant à la vitesse synchrone,

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine. Il est utilisé dans les problèmes d'alimentation des machines asynchrones

par convertisseur statique de fréquence, et lorsqu'on veut étudier la fonction de transfert du moteur par rapport à de petites variations de la vitesse autour d'un régime donné.

Le choix se fait en fonction du problème étudié. Parmi les relations que nous venons de présenter, les seules qui soient affectées par le choix du référentiel sont les équations (1.7). Le glissement de la machine ( $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ ) est faible dans les conditions réelles de fonctionnement donc ( $\omega_s \approx \omega_r = \omega$ ).

### II.3.7 Puissance absorbée et couple électromagnétique [12].

La puissance absorbée par le MAS selon le système d'axes  $(d, q)$  tout en négligeant les composantes homopolaires est exprimée par [16].

$$p_a = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant les tensions  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  par leurs expressions (II.11) dans (II.12)

$$p_a = \{R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2)\} + \left\{i_{ds} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\varphi_{qs}}{dt}\right\} + \{\omega_s(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds})\} \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.13) se compose de trois termes

- le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- le second représente la variation de l'énergie électromagnétique ;
- le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $p_{em}$ ).

Sachant que :

$$c_{em} = \frac{p_{em}}{\Omega_s} = p \frac{p_{em}}{\omega_s} \quad (\text{II.14})$$

Alors, l'expression de couple électromagnétique est égale à :

$$c_{em} = P(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant les flux  $(\varphi_{ds}, \varphi_{qs})$  donnés par la relation (II.8) dans la relation (II.15) on obtient :

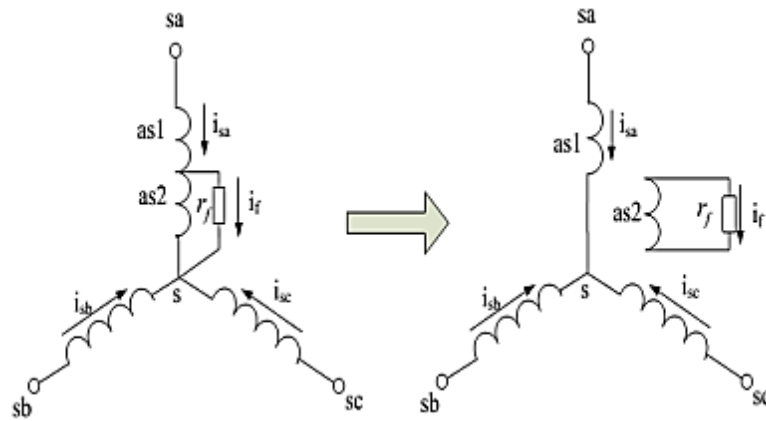
$$c_{em} = PM(i_{ds}i_{qs} - i_{qs}i_{ds}) \quad (II.16)$$

En substituant les courants rotoriques par leurs expressions (II.8) :

$$c_{em} = \frac{PM}{l_r}(\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \quad (II.17)$$

## II.4 Modélisation de la machine asynchrone triphasée avec défaut de court-circuit entre spires statoriques [20] [21] [22] [23] [24]

L'un des défauts les plus communs dans les machines électriques entre autres la machine asynchrone est le défaut de court-circuit entre-spires qui est causé par de nombreuses raisons comme le bruit mécaniques, dégradation de l'isolant du bobinage qui peut conduire à un amorçage, un contact entre spires et les surtensions transitoires. Ce défaut peut se produire dans une phase ou parfois plusieurs phases simultanément, La stratégie de modélisation est de considérer les parties court-circuitées comme certains circuits supplémentaires placés en parallèle aux circuits d'enroulement d'origine de la machine, puis représenter les relations électriques et magnétiques entre tous ces circuits à l'aide de la théorie du circuit. [14],



**Fig. II.4** - Configuration du court-circuit entre spires dans la phase "a" statorique [14]

Nous allons commencer par l'élaboration du modèle pour un cas particulier : le défaut ne se produit que dans une phase statorique "a", l'autre cas : le modèle est

généralisé pour représenter le défaut dans une phase quelconque du stator. Avant de dériver les modèles, certaines hypothèses ont été formulées :

- chaque phase de stator de la machine a le même nombre des spires et le déplacement spatial est uniforme.
- les trois phases du stator et du rotor ont des f.m.m distribuées de façon sinusoïdale.
- la machine fonctionne dans un régime linéaire et la saturation est négligée.
- l'effet de peau est négligeable.
- le défaut d'isolation est négligeable.

#### II.4.1 Définition des paramètres du défaut :

Le défaut de court-circuit dans une seule phase peut être définir par deux paramètres; le paramètre de niveau de défaut  $\mu$  et le paramètres de localisation de défaut  $f_x$  où  $\mu$  représente le pourcentage des spires court-circuités qui ont été utilisé pour quantifier la sévérité du défaut. Il est calculé par la formule suivante [14] [15]:

$$\mu = \frac{\text{Nombre des spires en court circuit}}{\text{Nombre de spires totales}} \quad (\text{II. 18})$$

si :

$$\begin{aligned} \mu &= 0 && \text{machine saine} \\ 0 \leq \mu &\leq 1 && \text{machine défaillante} \\ \mu &= 1 && \text{machine complètement défaillante} \end{aligned}$$

Le paramètres de localisation de défaut  $f_x$  est un vecteur et peut prendre trois valeurs différentes qui correspond défauts dans les phases « a », « b » et « c » respectivement

$$\begin{aligned} f_a [1 \ 0 \ 0]^T & \text{phase a défaillant} \\ f_b [0 \ 1 \ 0]^T & \text{phase b défaillant} \\ f_c [0 \ 0 \ 1]^T & \text{phase c défaillant} \end{aligned}$$

Ces deux paramètres ( $\mu$  et  $f_x$ ) seront exploités pour développer le modèle de la machine avec défaut de court-circuit entre spire dans une seule phase du stator.

## II.4.2 Équations électriques

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ 0 \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ - \\ V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{sa1} & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{sa2} & 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{sb} & 0 & | & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{sc} & | & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & | & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & r_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & r_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 & r_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sa} - I_f \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ - \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa1} \\ \Phi_{sa2} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ - \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

Les indices "s" et "r" désignent le stator et le rotor, et "a", "b" et "c" désignent les trois phases. Par conséquent  $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  représentent les tensions de chaque phase et  $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$  représentent les courants dans chaque phase,  $I_f$  est le courant de défaut de court-circuit.

## II.4.3 Equations magnétique

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa1} \\ \Phi_{sa2} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \\ - \\ \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa1sa1} & L_{sa1sa2} & L_{sa1sb} & L_{sa1sc} & | & L_{sa1ra} & L_{sa1rb} & L_{sa1rc} \\ L_{sa2sa1} & L_{sa2sa2} & L_{sa2sb} & L_{sa2sc} & | & L_{sa2ra} & L_{sa2rb} & L_{sa2rc} \\ L_{sbsa1} & L_{sbsa2} & L_{sbsb} & L_{sbsc} & | & L_{sbra} & L_{sbrb} & L_{sbrc} \\ L_{scsa1} & L_{scsa2} & L_{scsb} & L_{scsc} & | & L_{scra} & L_{scrib} & L_{scrc} \\ - & - & - & - & | & - & - & - \\ L_{rasa1} & L_{rasa2} & L_{rasb} & L_{rasc} & | & L_{rara} & L_{rarb} & L_{rarc} \\ L_{rbsa1} & L_{rbsa2} & L_{rbsb} & L_{rbsc} & | & L_{rbra} & L_{rbrb} & L_{rbrc} \\ L_{rcsa1} & L_{rcsa2} & L_{rcsb} & L_{rcsc} & | & L_{rcra} & L_{rcrb} & L_{rcrc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sa} - I_f \\ I_{sb} \\ I_{sc} \\ - \\ I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

$\Phi_{sa1}, \Phi_{sa2}$  : Flux magnétiques des spires de la phase a non court-circuitées et les spires court-circuitées respectivement.

$\Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux magnétiques des phases du stator "b", "c".

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux des trois phases "a", "b", "c" du rotor.

Les paramètres du modèle peuvent être classés en deux groupes, les paramètres touchés par le défaut et les paramètres sans défaut. Comme indiqué dans le tableau 1, les paramètres avec indice "sa" est affectée par le défaut de court-circuit et peuvent être exprimées en fonction du paramètre de niveau du défaut de court-circuit  $\mu$ .

|                       | Paramètres sans défauts                                                                                                                                                                                                                                                            | Paramètres en cas de défauts                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Résistances           | $r_{sb} = r_{sc} = r_s$<br>$r_{ra} = r_{rb} = r_{rc} = r_r$                                                                                                                                                                                                                        | $r_{sa1} = (1 - \mu) r_s$<br>$r_{sa2} = \mu r_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Inductances propres   | $L_{sbsb} = L_{scsc} = L_{\sigma s} + M_s$<br>$L_{rara} = L_{rbrb} = L_{rcrc} = L_{\sigma r} + M_r$                                                                                                                                                                                | $L_{sa1sa1} = (1 - \mu) L_{\sigma s} + (1 - \mu)^2 M_s$<br>$L_{sa2sa2} = \mu L_{\sigma s} + \mu^2 M_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Inductances mutuelles | $L_{rarb} = L_{rbra} = L_{rarc} = L_{rcra}$<br>$= L_{rbrc} = L_{rcrb} = -\frac{1}{2} M_r$<br>$L_{sbrb} = L_{rbsb} = L_{scrc} = L_{rcsc}$<br>$= M_{sr} \cos(\Theta)$<br>$L_{sbrc} = L_{rcsb} = M_{sr} \cos(\Theta + 2\pi/3)$<br>$L_{srb} = L_{rcsb} = M_{sr} \cos(\Theta - 2\pi/3)$ | $L_{sa1sa2} = L_{sa2sa1} = -\mu (1 - \mu) M_s$<br>$L_{sa1sb} = L_{sbsa1} = L_{sa1sc} = L_{scsa1}$<br>$= -\frac{1}{2} (1 - \mu) M_s$<br>$L_{sa1ra} = L_{rasa1} = (1 - \mu) M_{sr} \cos(\Theta)$<br>$L_{sa1rb} = L_{rbsa1} = (1 - \mu) M_{sr} \cos(\Theta + 2\pi/3)$<br>$L_{sa1rc} = L_{rcsa1} = (1 - \mu) M_{sr} \cos(\Theta - 2\pi/3)$<br>$L_{sa2ra} = L_{rasa2} = \mu M_{sr} \cos(\Theta)$<br>$L_{sa2rb} = L_{rbsa2} = \mu M_{sr} \cos(\Theta + 2\pi/3)$<br>$L_{sa2rc} = L_{rcsa2} = \mu M_{sr} \cos(\Theta - 2\pi/3)$ |

Tableau II.1 Expressions des paramètres

Une représentation plus compacte du modèle est obtenue tel que :

$$\begin{bmatrix} V_{sabc} \\ V_{rabc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0_{3 \times 3} & -\mu R_1 \\ 0_{3 \times 3} & R_r & 0_{3 \times 1} \\ \mu R_1 & 0_{1 \times 3} & -\mu r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \\ I_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \\ \Phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} & -\mu L_1 \\ L_{sr} & L_{rr} & -\mu L_2 \\ \mu L_1 & \mu L_2 & -\mu L_{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$\Phi_{sa}$  : représente le flux magnétique totale dans la phase statorique "a" qui est la somme de  $\Phi_{sa1}$  et  $\Phi_{sa2}$  où  $\Phi_{sa2}$  est le flux dans les spires en court-circuit qu'on désigne par  $\Phi_f$ .

$$R_s = r_s \times I_3, \quad R_r = r_r \times I_3, \quad R_1 = [r_s \ 0 \ 0]^t$$

où  $I_3$  est la matrice unité 3x3

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L\sigma_s + M_s & -\frac{1}{2}M_s & -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s & L\sigma_s + M_s & -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s & -\frac{1}{2}M_s & L\sigma_s + M_s \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L\sigma_r + M_r & -\frac{1}{2}M_r & -\frac{1}{2}M_r \\ -\frac{1}{2}M_r & L\sigma_r + M_r & -\frac{1}{2}M_r \\ -\frac{1}{2}M_r & -\frac{1}{2}M_r & L\sigma_r + M_r \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = M_s \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$L_1 = [L\sigma_s + M_s \quad -\frac{1}{2}M_s \quad -\frac{1}{2}M_s]^t$$

$$L_2 = [\cos(\theta) \quad \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \quad \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})]^t$$

$$L_{DD} = L_{ls} + \mu M_s$$

#### II.4.4 Modèles Généralisés de la machine asynchrone triphasée à bagues

Dans ce paragraphe, un modèle plus généralisé de la machine asynchrone triphasée à rotor bobiné sera proposé. Il permet de représenter les défauts de court-circuit dans n'importe quelle phase du stator. La même méthode décrite au paragraphe précédent sera utilisée pour calculer les modèles de court-circuit de spires dans les autres phases statoriques "b" et "c", respectivement. Toutes les matrices et les paramètres sont toujours les mêmes à l'exception des matrices  $R_1, L_1, L_2$  leurs expressions sont données dans le tableau 2 :

|    | Défaut dans Sa                                                                        | Défaut dans Sb                                                                        | Défaut dans Sc                                                                        |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| R1 | $[r_s \quad 0 \quad 0]^t$                                                             | $[0 \quad r_s \quad 0]^t$                                                             | $[0 \quad 0 \quad r_s]^t$                                                             |
| L1 | $\begin{bmatrix} L\sigma_s + M_s \\ -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}M_s \\ L\sigma_s + M_s \\ -\frac{1}{2}M_s \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s \\ L\sigma_s + M_s \end{bmatrix}$ |

|    |                                                                                                                |                                                                                                                |                                                                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L2 | $\begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta) \end{bmatrix}$ |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Tableau II.2 :** Matrices  $R1$ ,  $L1$ ,  $L2$  par rapport à défauts dans les différentes phases

Le paramètre de position de défaut  $f_x$  a été exploité pour donner une représentation unifiée des matrices  $R1$ ,  $L1$  et  $L2$  :

$$R1 = r_s f_x, \quad L1 = L_{ss} f_x, \quad L2 = L_{sr} f_x$$

$$\begin{bmatrix} V_{sabc} \\ V_{rabc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0_{3 \times 3} & -\mu r_s f_x \\ 0_{3 \times 3} & R_r & 0_{3 \times 1} \\ \mu r_s f_x & 0_{1 \times 3} & -\mu r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \\ I_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \\ \Phi_f \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \\ \Phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} & -\mu L_{ss} f_x \\ L_{sr} & L_{rr} & -\mu L_{sr} f_x \\ \mu L_{ss} f_x & \mu L_{sr} f_x & -\mu L_{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sabc} \\ I_{rabc} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

C'est un modèle généralisé pouvant représenter le défaut de court-circuit des spires à tous les niveaux dans n'importe quelle phase, Par exemple, avec  $\mu = 0.01$  et  $f_x = [0 \ 1 \ 0]^T$  le modèle peut représenter une machine avec un défaut de court-circuit des spires avec 1% (c'est à dire une phase d'enroulement est court-circuité par 1%) dans la phase statorique "b".

## II.5 Transformation de Park applique à la machine asynchrone triphasée [18] [19] [20]

Dans une optique de diagnostic de la machine asynchrone par analyse spectral du courant statorique, notre choix s'est porté sur le repère de Park lié au rotor.

L'équation de tension et de flux dans les spires en court-circuit exprimées dans le repère biphasé d'axe d et q lié au rotor sont les suivantes :

$$0 = \mu R_f I_f + \frac{d}{dt} \Phi_f \quad (II.25)$$

$$\Phi_f = \frac{2}{3} \mu^2 L_m i_0 + \sqrt{\frac{2}{3}} \mu L_m [\cos(\theta) \sin(\theta)] (I_{dqs} + I_{dqr}) \quad (II.26)$$

$$L_m = \frac{3}{2} M_s \quad \text{Inductance magnétisante}$$

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. Ce champ magnétique est à l'origine du flux  $\Phi_f$ . En projetant  $i_0$  et  $\Phi_f$  sur les axes d et q de Park, on leur associe les vecteurs stationnaires :

$$\mathbf{i}_{dqf} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} i_f \quad \Phi_{dqf} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \Phi_f$$

Les relations (II.19) et (II.20) deviennent des relations entre des vecteurs stationnaires par rapport au rotor. Ainsi, dans le repère rotorique, l'ensemble des équations de la machine au stator, au rotor et à la spire en court-circuit est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dqs} = R_s I_{dqs} + \frac{d}{dt} \Phi_{dqs} - \omega_s P \left( \frac{n}{2} \right) \Phi_{dqs} \\ \Phi_{dqs} = L_{\sigma s} I_{dqs} + L_m (I_{dqs} + I_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \mu i_{dqf}) \\ 0 = R_s I_{dqs} + \frac{d}{dt} \Phi_{dqr} \\ \Phi_{dqr} = L_m (I_{dqs} + I_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \mu i_{dqf}) \\ 0 = \mu R_f I_{dqf} + \frac{d}{dt} \Phi_{dqf} \\ \Phi_{dqf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \mu L_m Q(\theta) (I_{dqs} + I_{dqr} + \sqrt{\frac{2}{3}} \mu i_{dqf}) \end{array} \right. \quad (II.27)$$

Avec:

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

Par analogie avec l'étude du schéma équivalent ramené au primaire des transformateurs, les équations de flux de la machine asynchrone en défaut statorique deviennent :

$$\Phi_{dqs} = \Phi_{dq\sigma s} + \Phi_{dqm} = L_{\sigma s} I_{dqs} + L_m (I_{dqs} + I_{dqr} - \tilde{i}_{dqf})$$

$$\Phi_{dqr} = \Phi_{dqm} = L_m (I_{dqs} + I_{dqr} - \tilde{i}_{dqf})$$

$$\Phi_{dqf} = \mu Q(\theta) \Phi_{dqm}$$

Avec:

$$\tilde{I}_{dqf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \mu I_{dqf} \quad ; \quad \Phi_{dqf} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Phi_{dqf}$$

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

$$\frac{3 R_r}{2 \mu} Q(\theta) \tilde{I}_{dqf} - \frac{d}{dt} \Phi_{dqm} = 0$$

$$R_f \tilde{I}_{dqf} - \frac{d}{dt} \Phi_{dqm} = 0$$

$$\tilde{I}_{dqf} = R_f^{-1} \frac{d}{dt} \Phi_{dqm}$$

$$\text{Avec : } R_f = \frac{3 R_r}{2 \mu} Q(\theta)$$

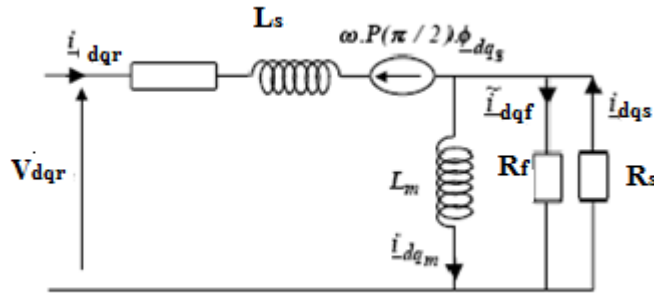


Fig. II.5: Premier modèle de la machine avec défaut statorique [18]

### II.5.1 Schéma électrique équivalent :

D'après l'équation (II.27), la bobine qui représentant le défaut se ramène à un simple quadripôle résistif mis en parallèle avec l'inductance magnétisante et la résistance statorique. Dans le repère de Park, la mise en équation d'état d'un tel système reste complexe ; il s'avère plus judicieux d'établir le schéma équivalent de la machine avec résistance statorique et résistance de défaut totalisé au stator. Ainsi, la résistance équivalente  $R_{eq}$  est la mise en parallèle de la résistance statorique  $R_s$  et la

résistance de défaut  $R_f$ . L'expression de la matrice résistance équivalente au rotor est alors obtenue comme suit :

$$\mathbf{R}_{eq}^{-1} = \mathbf{R}_s^{-1} + \mathbf{R}_f^{-1}$$

$$\mathbf{R}_{eq}^{-1} = \mathbf{R}_s^{-1} + \frac{3}{2} \mu \mathbf{R}_s^{-1} \mathbf{Q}(\theta)$$

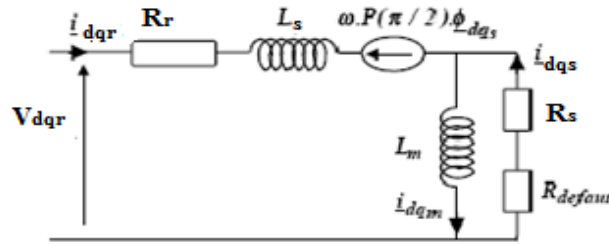
En inversant, on obtient ainsi l'expression de la matrice résistance équivalente :

$$R_{eq} = R_s + R_{déf} = R_r - \frac{\alpha}{1+\alpha} (\theta_0) R_s \quad (\text{II.28})$$

Avec :  $\alpha = \frac{2}{3} \mu$

Ainsi, la résistance équivalente au rotor est la mise en série de la résistance saine  $R_s$  et d'une matrice résistance de défaut  $R_{défaut}$

La figure () illustre le schéma équivalent de la machine asynchrone avec défaut statorique en régime dynamique avec fuite ramenée au stator



**Fig. II.6-** Modèle de la machine avec défauts statorique [18]

les expressions respectives de la résistance saine  $R_s$  et de la résistance de défaut

$R_{défaut}$  :

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

$$R_{défaut} = \frac{\alpha}{1+\alpha} R_s \begin{bmatrix} \cos(\theta)^2 & \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) & \sin(\theta)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

### II.5.2 Représentation d'état du modèle de défaut [18]:

Différentes classes de modèles peuvent être découplées selon les objectifs de l'utilisateur. Dans notre cas, il s'agit de simuler le système dans le repère de Park lié au rotor, d'où la nécessité d'accéder à la position du rotor. On y parvient en introduisant l'équation électromécanique de la machine :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_e(t) - f_v \Omega(t) - C_r \quad (II.30)$$

$\Omega = \omega/p$  : étant 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 être représenté par le produit vectoriel suivant :

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{Lr} (\mathbf{i}_s \wedge \Phi_r) \quad (II.31)$$

En remplaçant dans l'équation électromécanique, on obtient :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P^2}{J} (\mathbf{i}_{qs} \Phi_{dr} - \mathbf{i}_{ds} \Phi_{qr}) - \frac{f_v}{J} \omega - \frac{P}{J} C_r \quad (II.32)$$

le système peut alors être décrit par le système d'équations non linéaires :

$$\underline{x} = [A]\underline{x} + B.\underline{u}$$

$$\underline{y} = C\underline{x} + D.\underline{u}$$

Où :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Rs}{L\sigma s} - \frac{Rr}{L\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) + \omega & \frac{Rr}{2L\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) + \omega & -\frac{Rr}{LmL\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & -\frac{Rr}{2LmL\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) + \frac{1}{L\sigma s} \omega & 0 & 0 \\ \frac{Rr}{2L\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) + \omega & -\frac{Rs}{L\sigma s} - \frac{Rr}{L\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) + \omega & -\frac{Rr}{2LmL\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) + \frac{1}{L\sigma s} \omega & \frac{Rr}{LmL\sigma s} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & 0 & 0 \\ Rr \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & -Rr \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) & -\frac{Rr}{Lm} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & \frac{Rr}{2Lm} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) & 0 & 0 \\ -Rr \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) & Rr \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & \frac{Rr}{2Lm} \left( \frac{1+\alpha \sin(2\theta)}{1+\alpha} \right) & -\frac{Rr}{Lm} \left( \frac{1+\alpha \sin^2 \theta}{1+\alpha} \right) & 0 & 0 \\ \frac{P^2}{J} \Phi_{rq} & 0 & \frac{P^2}{J} \dot{i}_{sq} & 0 & \frac{f_v}{J} \omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L\sigma s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L\sigma s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{P}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad u = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ Cr \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} ; \quad D = [0]$$

## II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, On que la majorité des sujets traitant le fonctionnement moteur puis à l'étude de la modélisation de la machine asynchrone triphasé à rotor bobiné. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone est un système à équations différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

# Chapitre III

## *Diagnostic du défaut de court-circuit par analyse spectrale*

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

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation, réalisée avec Matlab. Cette étude traite le diagnostic et la détection des défauts de court-circuit entre spires statoriques dans les moteurs asynchrones triphasés (MAS).

La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique).

En va étudier le comportement global de la MAS dans son état sain et avec défaut, à vide et en charge.

### **III.2.Méthode de traitement de signal [20]:**

Le diagnostic d'une défaillance ou d'une dégradation fait appel le plus souvent à l'utilisation de signatures. Ces signatures contiennent les informations jugées pertinentes par les spécialistes des matériaux pour la détection d'une défaillance ou d'une dégradation. La complexité des signatures dépend de la nature des systèmes et des matériels à diagnostiquer qui varie en fonction de l'anomalie recherchée. Cette approche fait appel à des techniques du traitement de signal.

#### **III.2.1.La transformée de Fourier Rapide (FFT) :**

La transformée de Fourier rapide ou Fast Fourier Transformation (FFT), est une technique mathématique de calcul rapide élaborée en 1965 par J. W. Cooley et J. W. Tuckey. La FFT permet de ramener le calcul de la transformée de Fourier discrète de  $N^2$  à  $N \cdot \log(N)$  opérations. Cette réduction de la complexité de calcul a suffi à faire passer facilement résolubles de nombreux problèmes liés à l'analyse spectrale. Pour une meilleure visualisation d'une analyse fréquentielle.

#### **III.2.2.Propriétés de la FFT :**

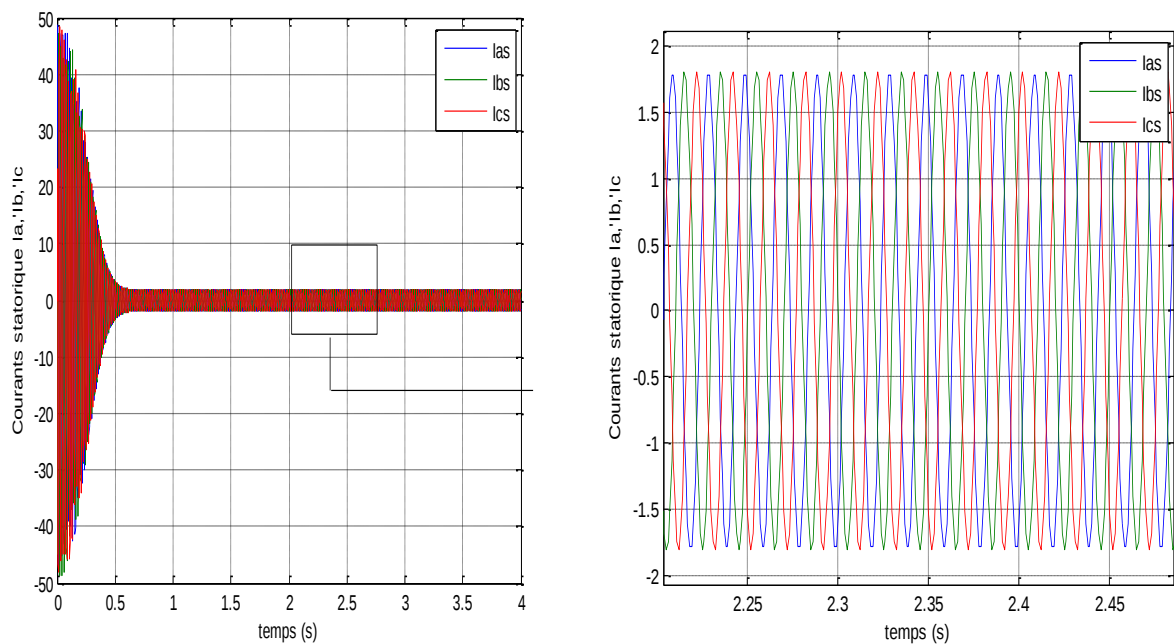
La FFT est un algorithme permettant de transformer les données du domaine temporel au domaine fréquentiel. Puisque c'est exactement ce que nous voulions réaliser pour l'analyse spectrale il semble facile d'implanter un tel algorithme sur un analyseur. la FFT est un algorithme de calcul qui va nécessiter l'échantillonnage du signal temporel pour quantifier numériquement les valeurs du signal :

$$f_{st} = f_s * \left[ n \frac{(1-s)}{P} + k \right] \begin{matrix} | n = 1,2,3... \\ | k = 1,3,5... \end{matrix}$$

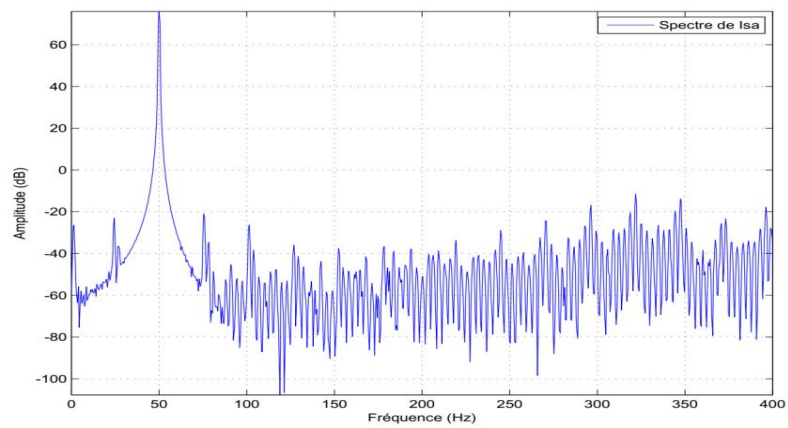
Avec ( $f_{st}$ ) les fréquences induites par un court-circuit de spires au stator,  $n=1,2,3...$  ,  $k=1,3,5...$  P est le nombre de paires de pôles et (s) est le glissement

### III.3. Etude de la machine asynchrone à l'état Sain :

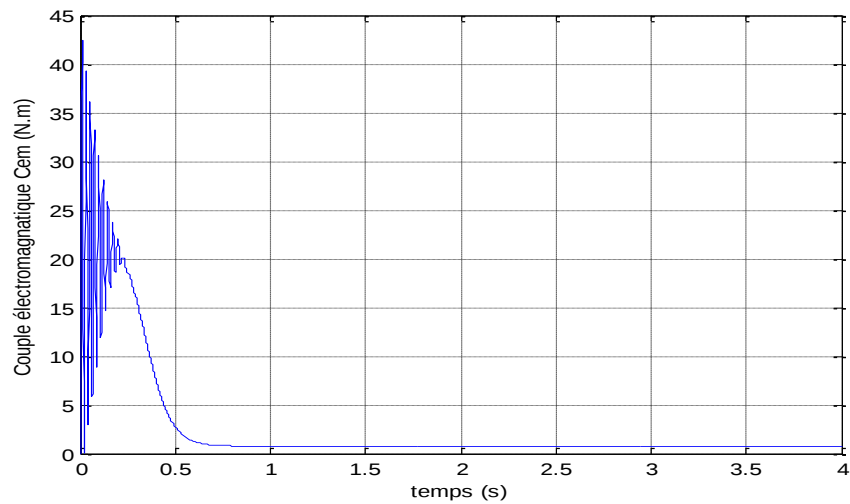
#### III.3.1. Fonctionnement à vide : le couple résistant de la charge $C_r = 0 \text{ N.m}$



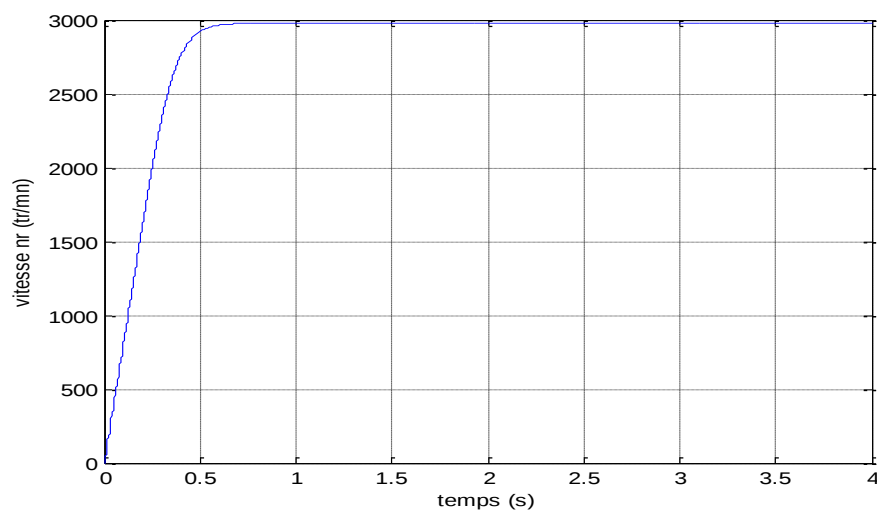
**Fig.III.1:** courants statoriques de la MAS à l'état sain à vide avec zoom.



**Fig.III.2:** Spectre de courant statorique de MAS à vide à l'état sain,



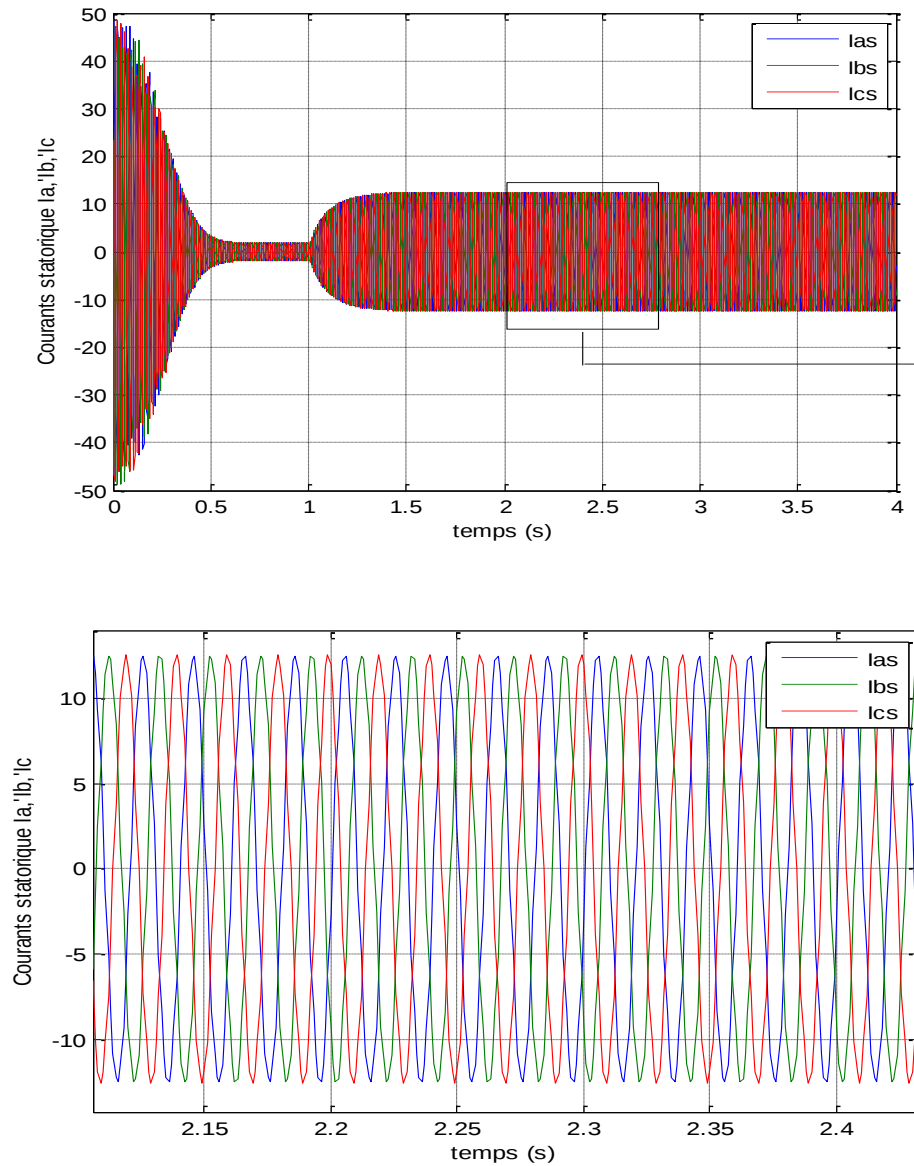
**Fig.III.3:** le couple électromagnétique de la MAS sain à vide.



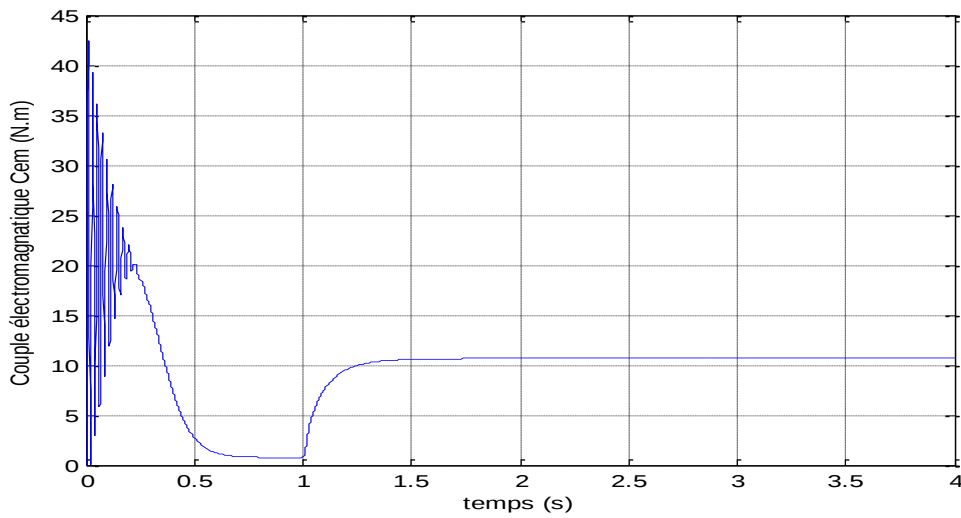
**Fig.III.4:** La vitesse de la MAS sain à vide

### III.3.2. Fonctionnement en charge : le couple résistant de la charge $C_r = 10 \text{ N.m}$

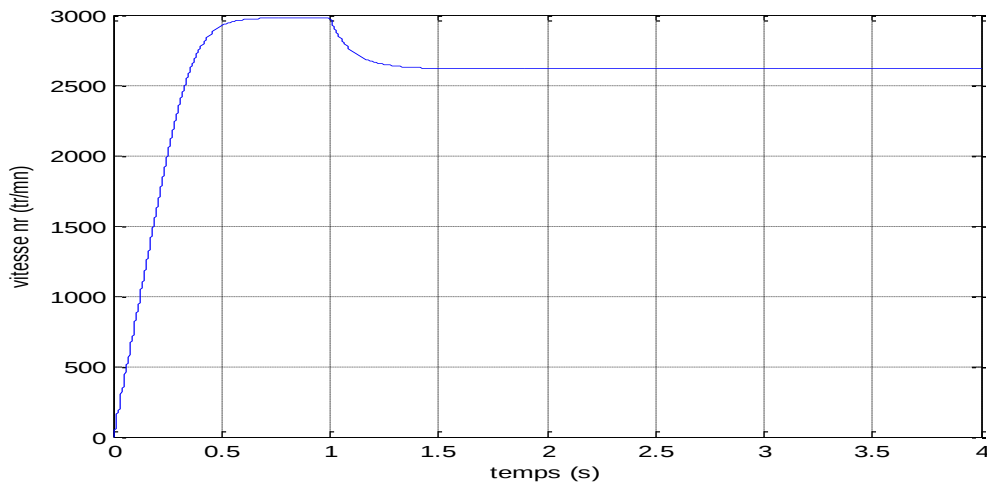
La machine est chargée à l'instant  $t=1 \text{ s}$ .



**Fig.III.5:** courants statoriques de la MAS à l'état sain en charge avec zoom..



**Fig.III.6:** le couple électromagnétique de la MAS sain en charge.



**Fig.III.7:** La vitesse de la MAS sain en charge.

### Interprétation des résultats :

#### 1- Machine à vide :

Dans la figure III.1 et après l'application de la tension on remarque des ondulations dans les signaux des courants triphasé, et la valeur de crête apparaît au démarrage, l'amplitude est approximativement égale à **50A**, et après ils diminuent en un temps très court de **0,5 s** puis ils se stabilisent, après l'instant **0.5 s** les trois courants sinusoïdaux symétriques de même amplitude de **1,8 A**.

La figure III.2 montre le spectre de courant statorique de MAS, on remarque un rai avec une amplitude très important à la fréquence de 50 Hz qui correspond à la fréquence de l'harmonique fondamentale.

La figure III.3 et III.4 contiennent deux grandeurs mécaniques très importantes pour les machines à savoir : le couple électromagnétique (figure III.3) et la vitesse (figure III.4) , le couple  $C_{em}$  passe par une phase transitoire qui dure jusqu'à l'instant 0,5 s où il se stabilise à une valeur qui correspond au couple mécanique de valeur très faible car la machine est à vide .Par contre la courbe de la vitesse montre que celle-ci augmente de zéro à l'instant de démarrage jusqu'à 3000 tr/min dans un intervalle de temps égale à 0,5 s qui correspond au régime transitoire.

## **2- Machine en charge :**

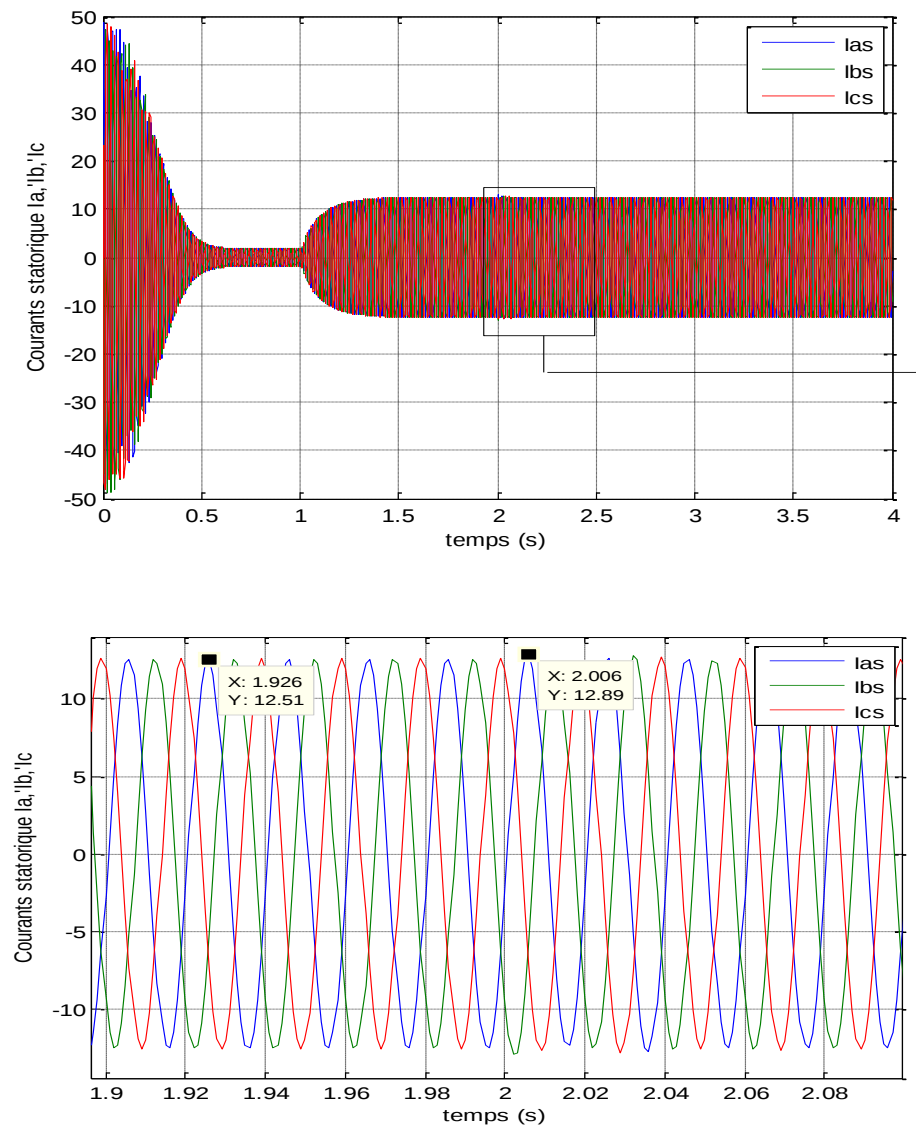
Dans la figure III.5 on remarque qu'à l'instant  $t=1$  s lorsque nous appliquons une charge avec un couple  $C_r=10$  N.m, l'amplitude des courants augmentent jusqu'à 12.5 A avec la conservation de la forme sinusoïdal symétrique et cela explique que lorsque la machine est chargée, elle demande un couple plus important ce qui demande un appel de courant plus important assurant ainsi un comportement stable et puissant de la machine.

La figure III.6 et III.7 nous montre qu'à l'instant  $t=1$  s, lorsqu'on applique une charge il se produit une diminution de la vitesse l'amenant à 2620 tr/min; alors que la machine doit développer un couple de 10 N.m, que lui demande la charge

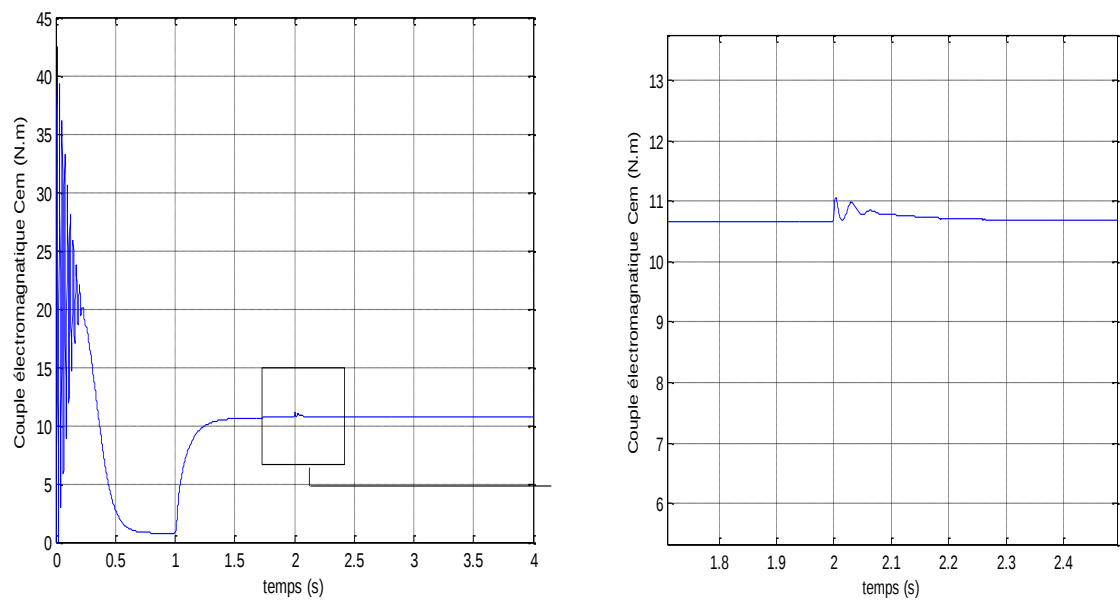
## **III.4. Etude du comportement de la MAS avec un défaut de court-circuit entre spires :**

Les spires sont court-circuitées à l'instant  $t=2$  s

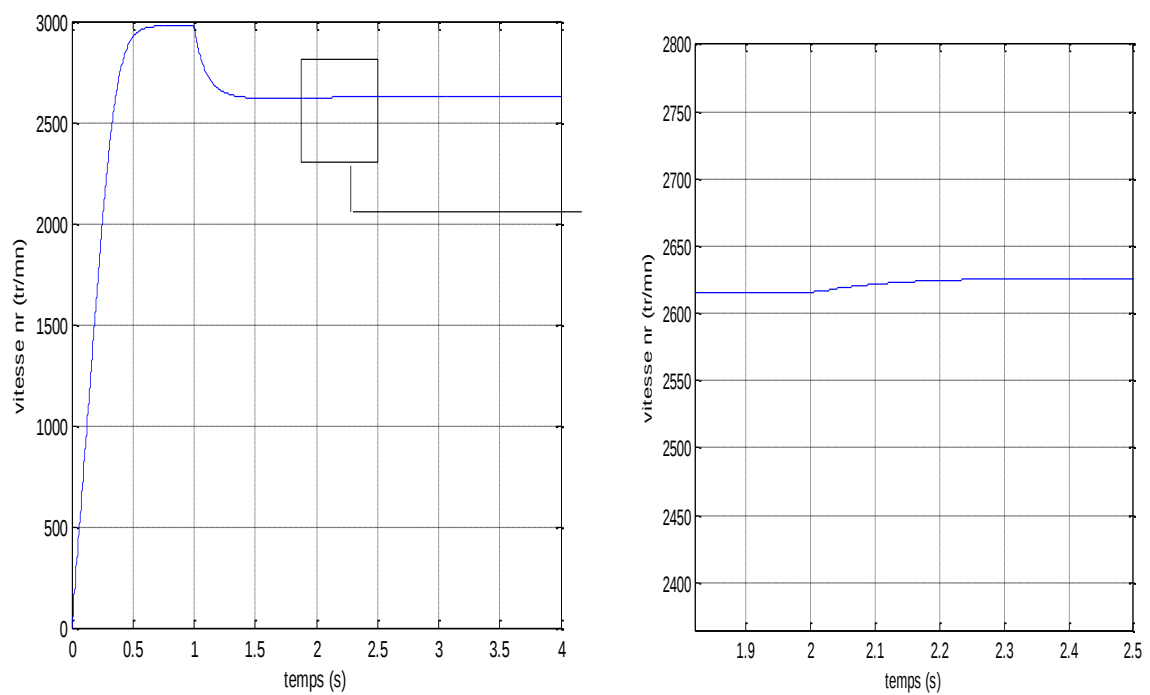
### **III.4.1. 10% des spires de la phase "a" sont court-circuitées**



**Fig.III.8:** courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 10%



**Fig.III.9:** le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 10%



**Fig.III.10:** La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 10%

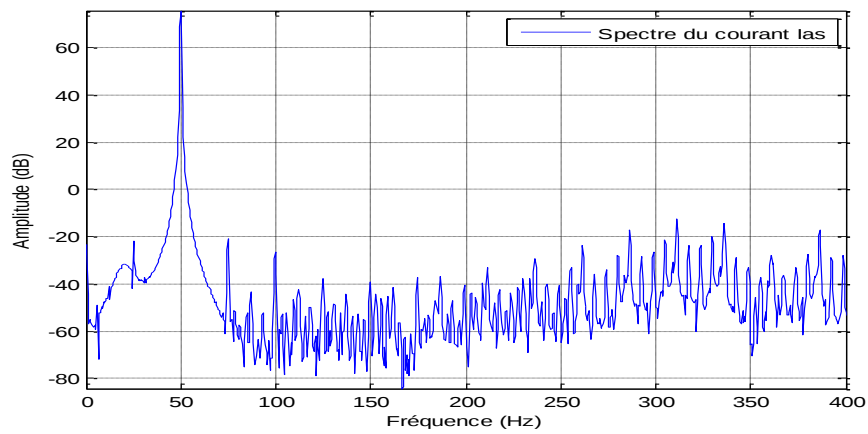


Fig.III.11: Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 10%

### III.4.2. 20% des spires de la phase "a" sont court-circuitées

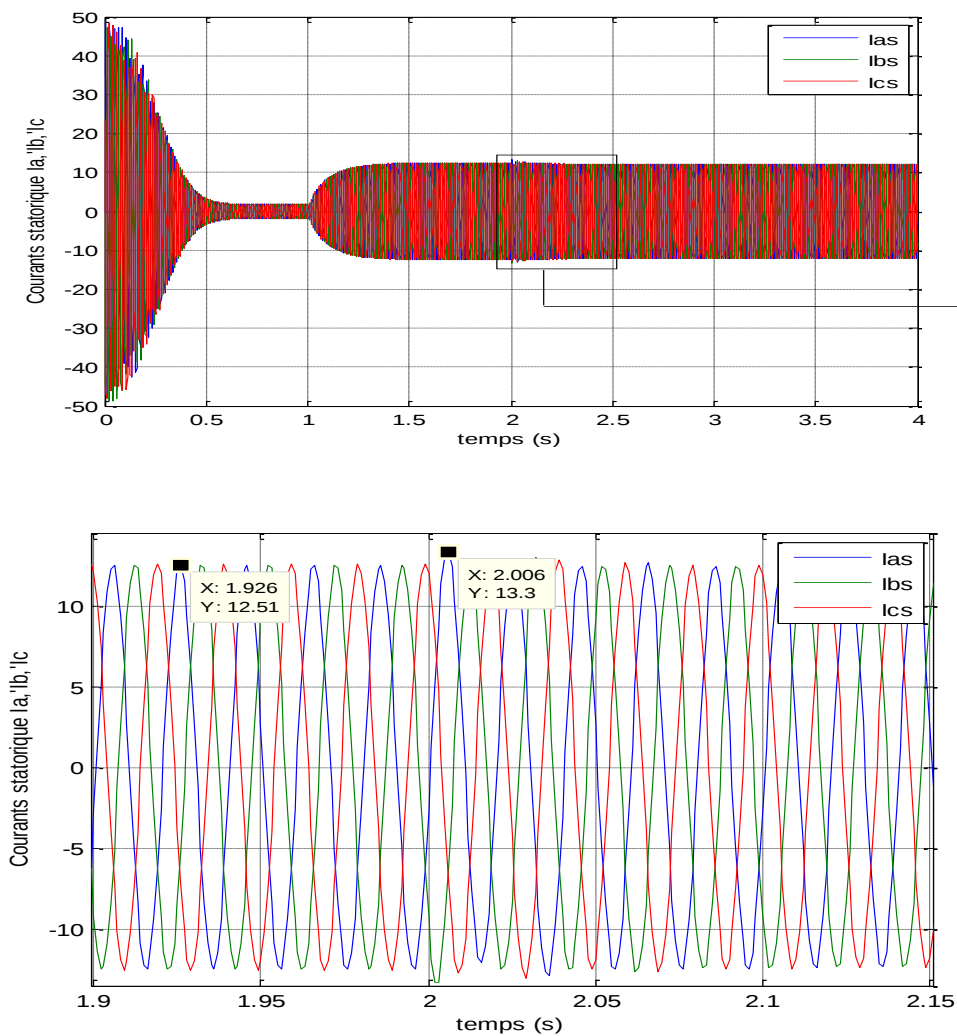
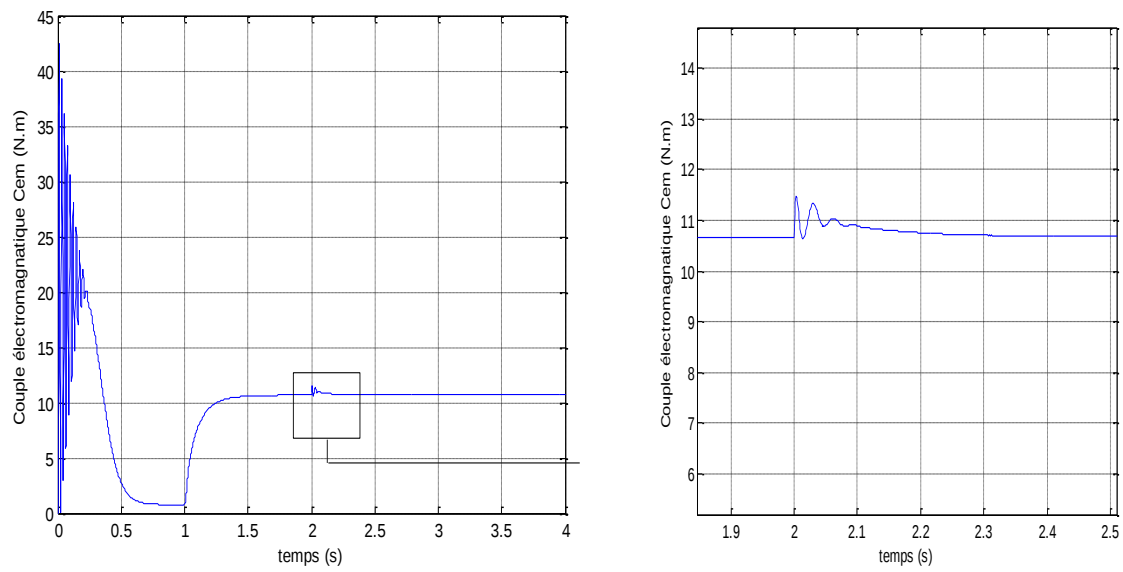
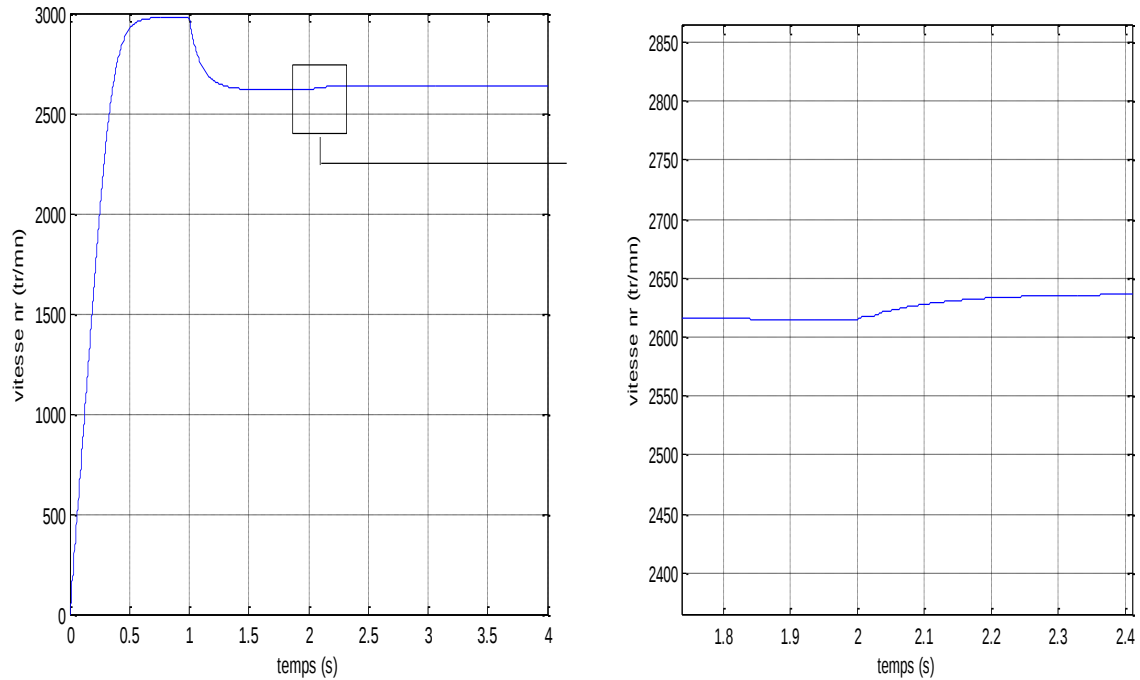


Fig.III.12: courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 20%



**Fig.III.13:** le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 20%



**Fig.III.14:** La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 20%

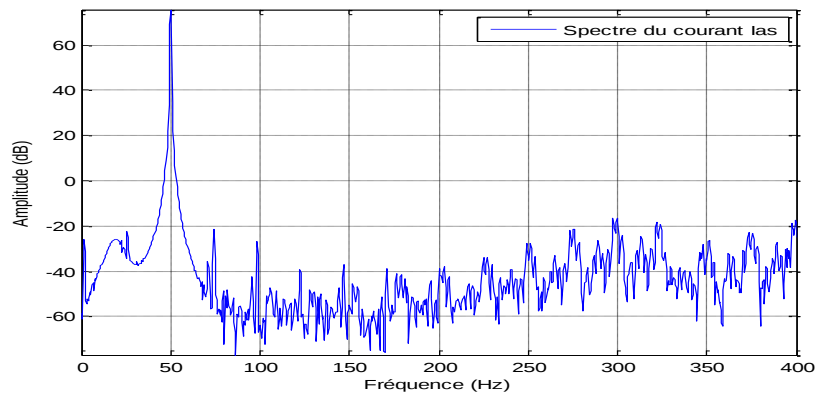


Fig.III.15: Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 20%

### III.4.3. 50% des spires de la phase "a" sont court-circuitées

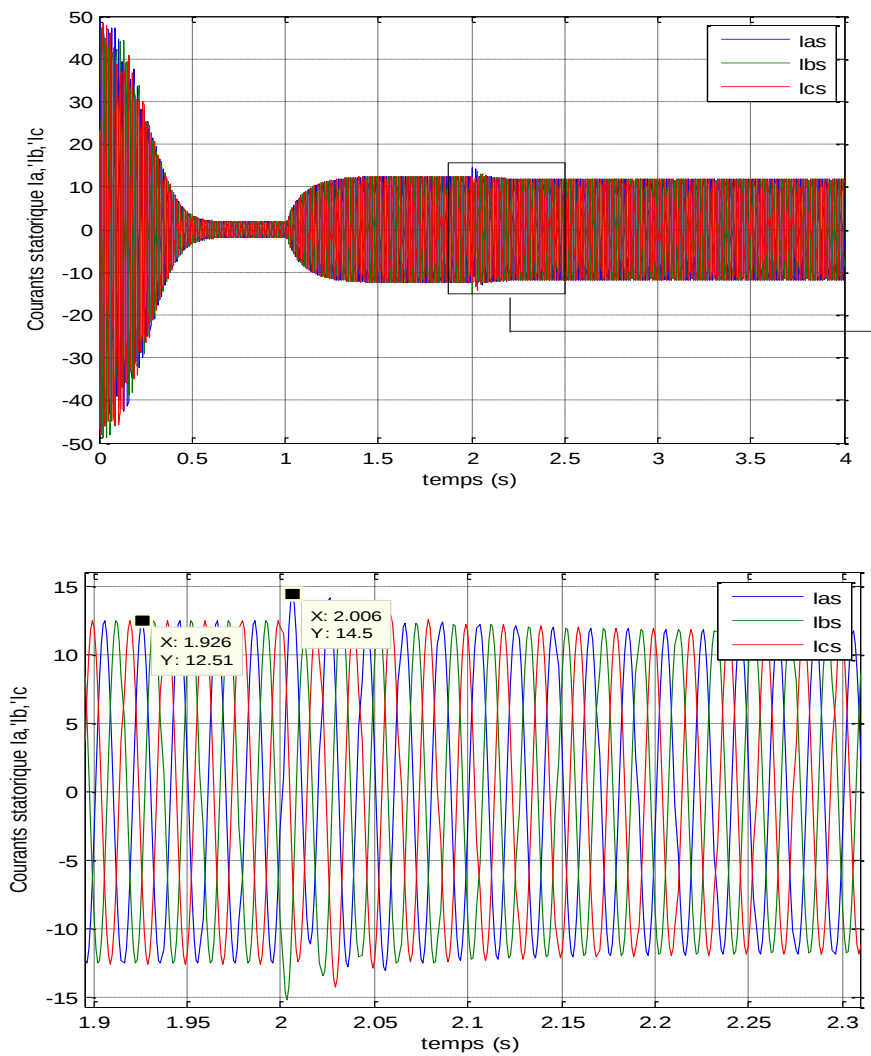
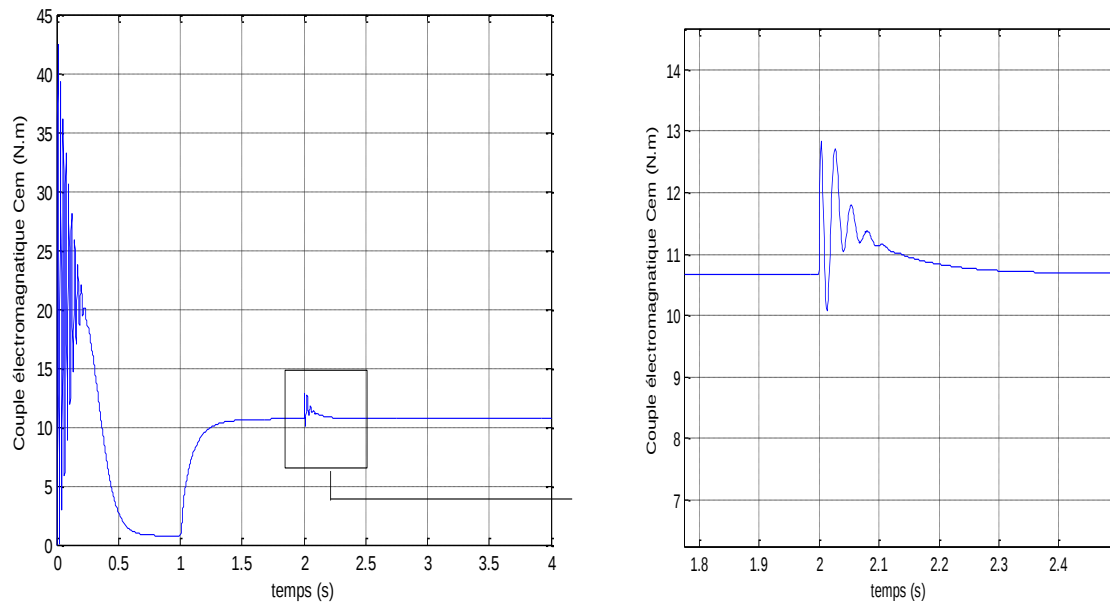
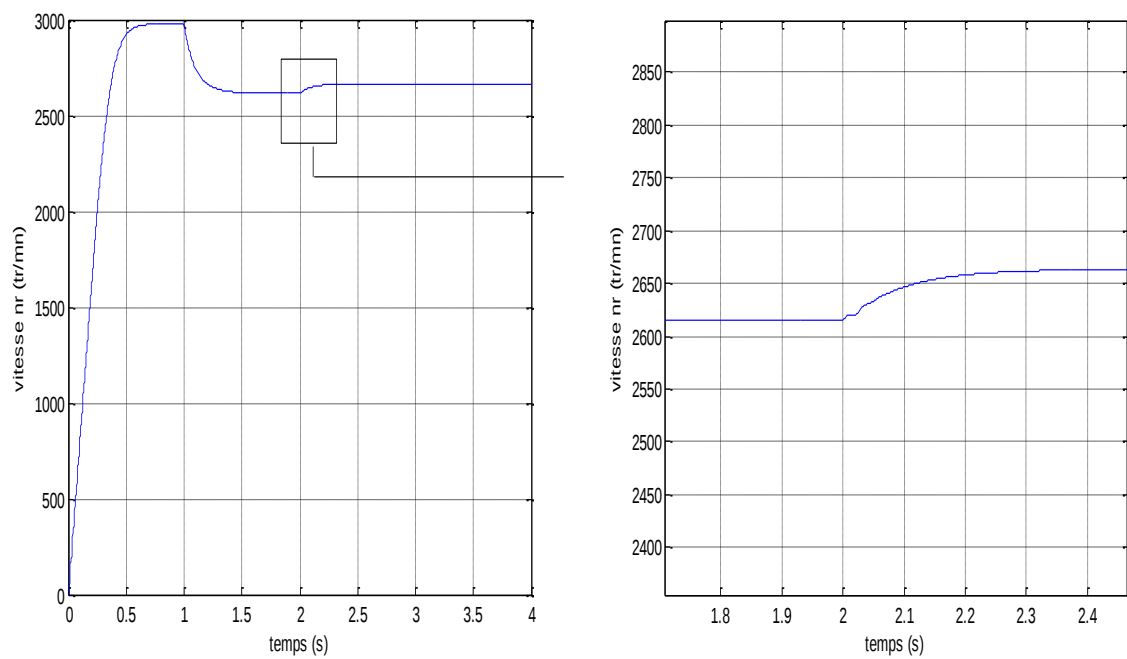


Fig.III.16: courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 50%



**Fig.III.17:** le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 50%



**Fig.III.18:** La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 50%

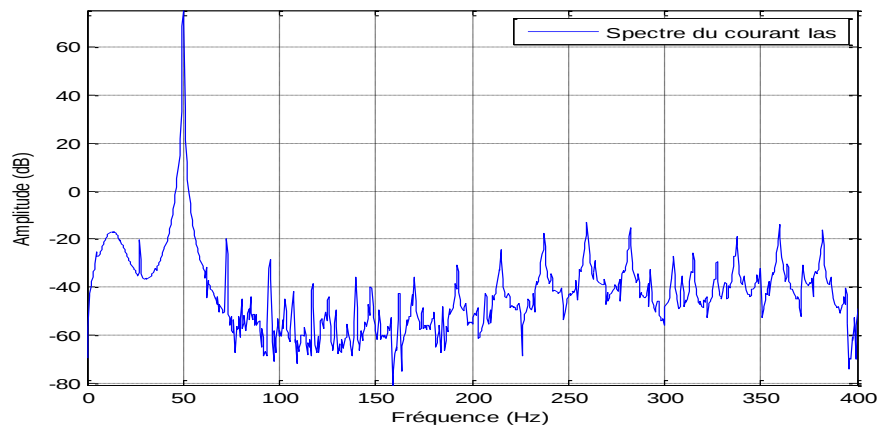


Fig.III.19: Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 50%

#### III.4.4. 80% des spires de la phase "a" sont court-circuitées

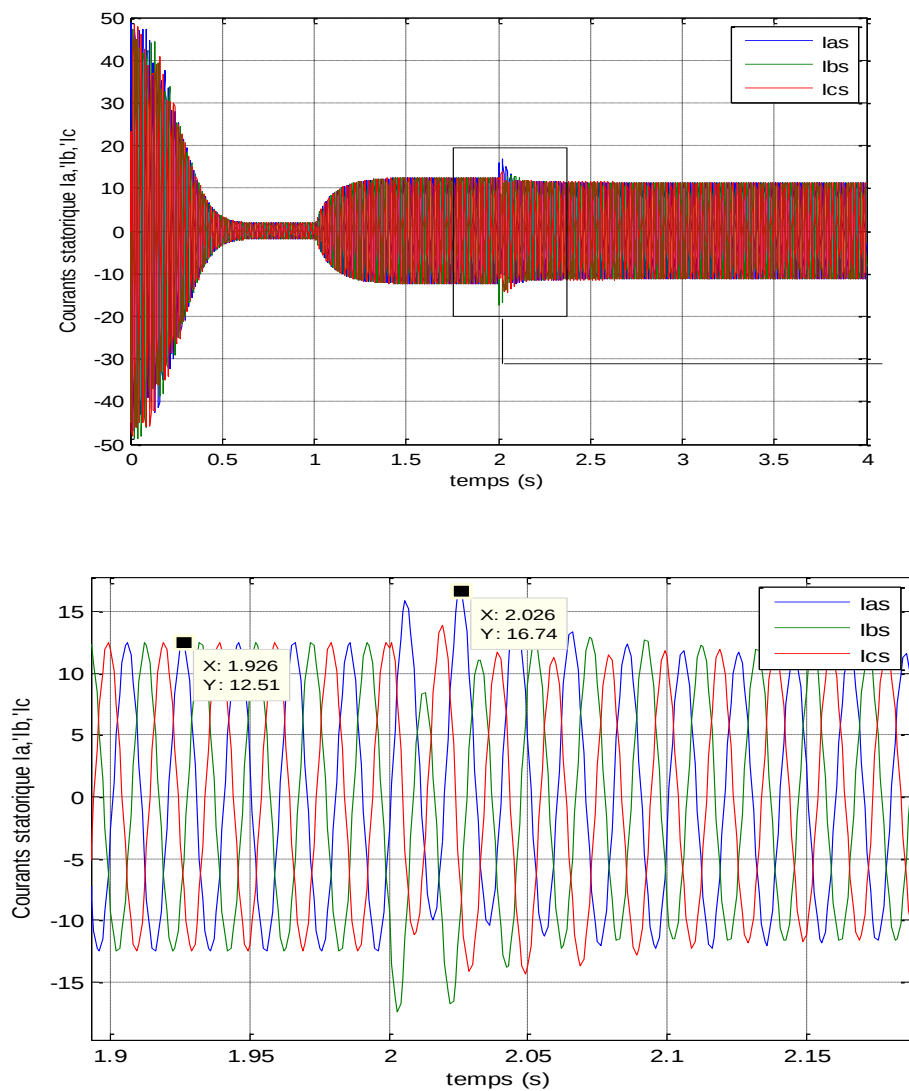
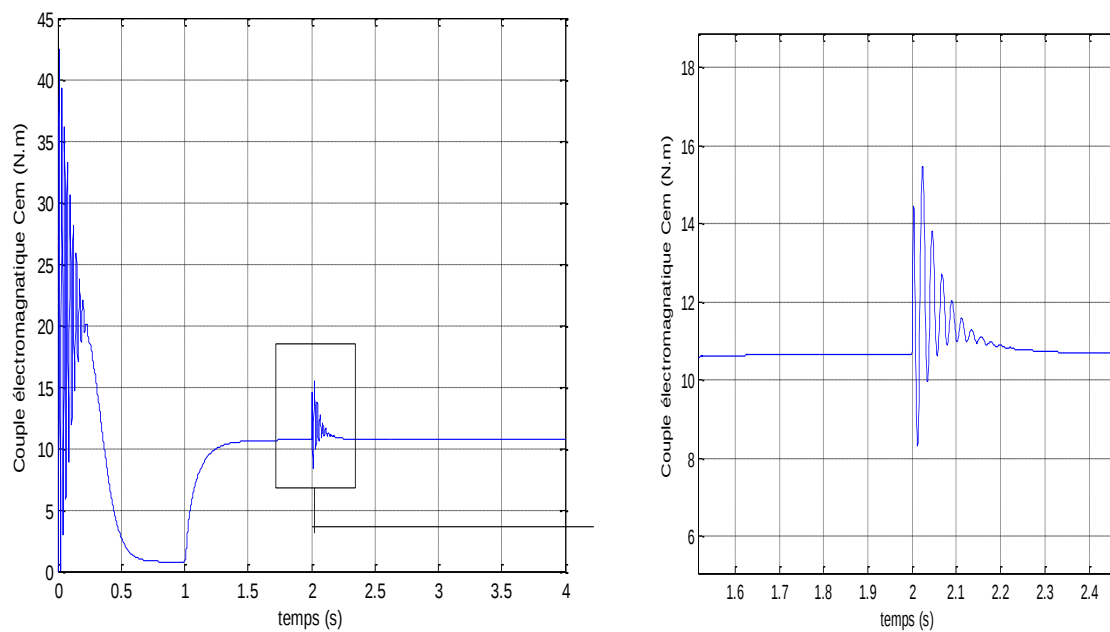
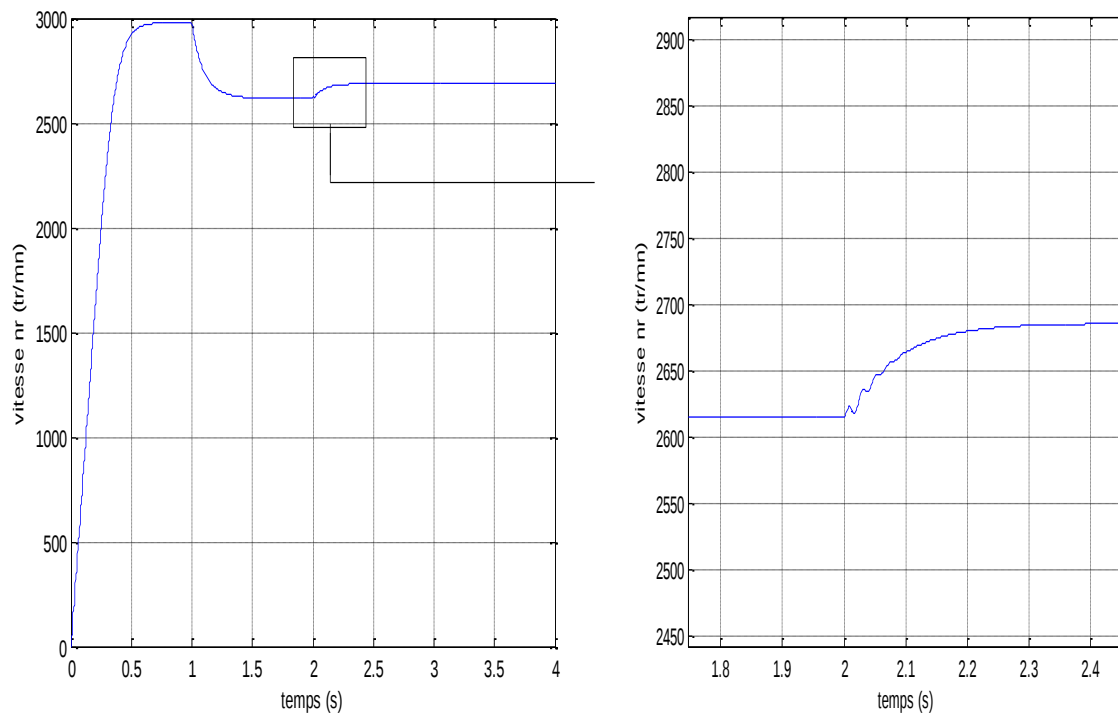


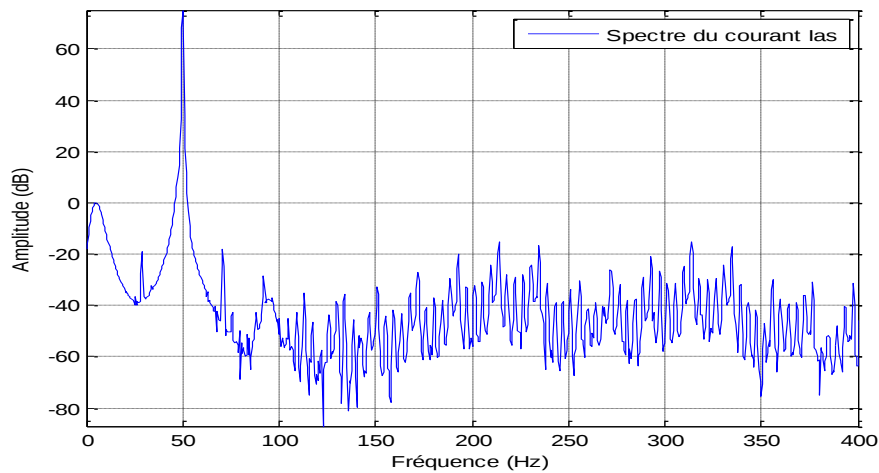
Fig.III.20: courants statoriques de la MAS avec défaut de court-circuit de 80%



**Fig.III.21:** le couple électromagnétique de la MAS avec défaut de court-circuit de 80%



**Fig.III.22:** La vitesse de la MAS avec défaut de court-circuit de 80%



**Fig.III.23:** Spectre de courant statorique de MAS avec défaut de court-circuit de 80%

### Interprétation des résultats :

#### 1- 10% des spires de la phase "a" court-circuités :

Sur la figure III.8 pour laquelle  $\mu = 10\%$ , on constate qu'il n'y a pas une différence appréciable entre la valeur de courant dans le cas sain et le cas avec défaut, il y a une différence à même négligeable de 0.4 A.

Les figures III.9 et III.10 nous montre qu'à l'instant  $t=2$  s, lorsqu'on applique un court-circuit il se produit une petite augmentation de la vitesse et le couple, mais dans le couple, ce changement est instantané, puis il revient à son état d'origine.

En constate sur le spectre du courant représentés dans figure III.11 correspondant à  $\mu = 10\%$  que dès qu'il se produit le court-circuit des raies apparaissent autour de l'harmonique fondamental de 50 Hz

#### 2- 20% des spires de la phase "a" court-circuités :

D'après le graphe de la figure III.12 et pour  $\mu = 20\%$ , on constate une petite augmentation sur l'amplitude du courant de la phase défaillante.

La figure III.13 et III.14 nous montre à l'instant  $t=2$  s, lorsqu'on applique un court-circuit de 20%, il se produit une petite augmentation de la vitesse et le couple, mais pour le couple, ce changement est instantanée, il revient en suite à valeur qui correspond au couple de charge.

En constate sur le spectre du courant représentés dans figure III.15 correspondant à  $\mu = 20\%$  que dès qu'il se produit le court-circuit des raies apparaissent autour de l'harmonique fondamental de 50 Hz

### **3- 50% des spires de la phase "a" court-circuités :**

D'après le graphe de la figure III.16 et pour  $\mu = 50\%$ , on constate une augmentation sur l'allure de courant de la phase défaillante, et on remarque aussi qu'il y'a une influence du défaut de la phase **a** sur l'amplitude des courants dans les autres phases (**b**, **c**).

La figure III.17 et III.18 nous montre à l'instant  $t=2$  s, lorsqu'on applique un court-circuit de 50%, il se produit une augmentation de la vitesse et le couple, mais dans le couple, ce changement est instantanée, puis revient à son état origine.

En constate sur le spectre du courant représentés dans figure III.19 correspondant à  $\mu = 50\%$  que dès qu'il se produit le court-circuit des raies apparaissent autour de l'harmonique fondamental de 50 Hz

### **4- 80% des spires de la phase "a" court-circuités :**

D'après les graphes de la figure III.20, III.21, III.22 et pour  $\mu = 80\%$ , on constate un déséquilibre notable entre les amplitudes des courants dans les trois phases statoriques. Dans ce cas de figure, Il est impératif d'arrêter la machine, car ce déséquilibre entraîne des perturbations au niveau de la vitesse et du couple électromagnétique du moteur

En constate sur le spectre du courant représentés dans figure III.23 correspondant à  $\mu = 80\%$ , que dès qu'il se produit le court-circuit des raies apparaissent autour de l'harmonique fondamental de 50 Hz, et lorsque le rapport de spire en court-circuit  $M$  augmente de nouvelles raies

## **III.5 Conclusion :**

Nous avons démontré que la surveillance du courant statorique possède une bonne capacité d'aide à la détection d'un « certain » nombre de défauts mécaniques ou électrique qui affectent le fonctionnement de la machine asynchrone. Le traitement du courant par analyse spectrale permet de mettre en évidence l'existence de ces

défauts qui se manifestent par la génération de nouvelles raies liées aux fréquences caractéristiques de la machine.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts statoriques dans les générateurs asynchrones à double alimentation triphasés. Nous avons focalisé l'étude sur ce type de machines pour deux raisons : la première, parce que les générateurs asynchrones à double alimentation sont parmi les machines les plus privilégiées pour la production d'énergie éolienne, tandis que la deuxième réside dans la détection des court-circuits entre spires statoriques qui fait l'objet de beaucoup de travaux de recherche actuellement est c'est l'objectif de ce travail.

Le présent travail a eu pour motivation l'intérêt porté au diagnostic des défauts des générateurs asynchrones à double alimentation, à partir des courants d'alimentation de la machine, pour apporter une contribution à l'étude de la sûreté de fonctionnement de ces générateurs. Les efforts ont été focalisés sur les défauts de court-circuit entre spires statoriques dans ces machines.

La simulation du fonctionnement du système électromécanique en présence de ces défauts a permis d'effectuer une étude qualitative des formes d'onde relatives au courant de phase. Cela a été réalisé afin de rendre compte des changements introduits par la présence des défauts de court-circuit entre spires statoriques.

On a exploité les formes d'onde obtenues en simulation dans le but de compléter l'étude des défauts par une analyse spectrale et de quantifier leur impact sur les courants. Ceci a été établi par la détermination de signatures spectrales, lesquelles sont la résultante de la comparaison du contenu des spectres obtenus pour un fonctionnement sain et défaillant du générateur. Quelques conclusions ont pu être tirées de cette partie.

Une première conclusion concerne l'utilisation d'une fenêtre temporelle ce qu'est indispensable pour permettre un diagnostic fiable de la machine.

La deuxième consiste à dire que le court-circuit entre spires se manifeste dans le spectre du courant statorique par l'appariation des raies à des fréquences bien déterminées, ainsi que l'amplitude de ces raies qui augmentent avec l'augmentation du pourcentage des spires en court-circuit.

## *Annexe*

Paramètre de la machine étudiée: [15]

| <b><i>Paramètres</i></b>                | <b><i>Symboles</i></b> | <b><i>Valeurs</i></b> |
|-----------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Tension                                 | $V$                    | 310 V                 |
| Fréquence d'alimentation                | $F$                    | 50 Hz                 |
| Nombre de pair de pôles                 | $P$                    | 1                     |
| Couple nominal                          | $Cr$                   | 10 N.m                |
| Moment d'inertie de la machine          | $J$                    | 023976 $K_g. m^2$     |
| Résistance de phase                     | $R_s$                  | 2.86 $\Omega$         |
| Résistance propre d'une phase rotorique | $R_r$                  | 2.756 $\Omega$        |
| Inductance propre                       | $L_p$                  | 0.395 H               |
| Inductance magnétisante                 | $Lm$                   | (1.5)* $L_p$ H        |
| Inductance de fuite totalisée au stator | $Lf$                   | 0.009594 H            |
| Fréquence d'échantillonnage             | $Fe$                   | 1000                  |
| Nombre de points de la séquence         | $N$                    | 1001                  |
| La rigidité                             | $K$                    | 2400                  |
| Amplitude de l'excitation               | $Tm$                   | 10                    |
| harmonique teta <sub>0</sub>            | $\theta_0$             | 0                     |

# Bibliographie

- [1] Babak VASEGHI, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires », Thèse, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, Génie Electrique, 2009.
- [2] BELHAMDI Saad, « Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande » Thèse, université Mohamed khider–Biskra, génie électrique, 2014.
- [3] Esseddik Ferdjallah Kherkhachi, « Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification paramétrique » Thèse, université de Nantes Angers le Mans – laboratoire : institut de recherche en énergie électrique de Nantes Atlantique (IREENA), génie électrique, 30 octobre 2015
- [4] Mohamed ARHOUDAM « Détection des défauts électriques et mécaniques dans la machine asynchrone par l'analyse du courant statorique » .these, Ecole Normale Supérieure de l'enseignement Technique - RABAT 27 juin 2013/2014.
- [5] Abba Bouguerne, « Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones, », Mémoire université mentouri – constantine, Faculté des sciences de l'ingénieur , département d'électrotechnique , 2009.
- [6] ANDRIAN CEBAN, « Méthode globale de diagnostic des machines électriques » Thèse, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI Université d'Artois – Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement, 2012.
- [7] 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.
- [8] ABDELALI Ameer 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.
- [9] Ondel O. « Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur – machine asynchrone » Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006
- [10] H. Razik, « La machine asynchrone à vitesse variable: capteurs, modèles, contrôle et diagnostic », Editeur Hermes Science, 2006.
- [11] INTERNET ([www.bacmoteur.wordpress.com](http://www.bacmoteur.wordpress.com) / [www.fr.m.wikipedia.org/wiki.com](http://www.fr.m.wikipedia.org/wiki.com) ).
- [12] BENCHABANE Fateh « Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering » Diplôme magister Université Mohammed khaidar de biskra 2005
- [13] CHATELAIN J. "Machines électriques" Traité d'électricité, d'Electronique et d'Electrotechnique - Edition Dunod - Suisse 1983.
- [14] POLOUJADOFF M. "Machines asynchrones-Régimes quelconques" Technique de l'ingénieur, Volume D3, article 485. France

- [15] BACHANI M. " *Identification paramétrique de la machine asynchrone* " Mémoire de Master - Université Mohamed Boudiaf d'Oran, Algérie, 2013.
- [16] SMAILI M. " *Modélisation et commande d'un aérogénérateur a machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération* " thèse de doctorat, Université Québec, Canada, 2013.
- [17] CHATELAIN J. "Machines électriques" Traité d'électricité, d'Electronique et d'Electrotechnique - Edition Dunod - Suisse 1983.
- [18] POLOUJADOFF M. "Machines asynchrones-Régimes quelconques" Technique de l'ingénieur, Volume D3, article 485. France
- [19] BAZI S. "Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur" Thèse de Doctorat, Université du Batna décembre 2016.
- [20] BOURDIM S. "Contribution au diagnostic des generateurs utilises dans les systemes eoliens". Thèse de Doctorat de l'Université Hadj Lakhdar Batna, juin 2015.
- [21] SALEM K. "Etude d'une éolienne a base d'une génératrice gada intégrée dans un réseau moyen tension." Mémoire de Master de l'université de M'sila, 2012.
- [22] HARRAT R. , LAKEHAL M. "Analyse des grandeurs électriques pour le diagnostic des défauts électriques et mécaniques dans la machine Asynchrone." Mémoire de Master de l'Université Amar Têlidji Laghouat, 2013.
- [23] HUBERT R.<sup>(1)</sup> , OUMAAMAR MED E.K<sup>(2)</sup> " Diagnostic des défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone par traitement de signal" Document de Cours : <sup>(1)</sup> Université de nancy, France, <sup>(2)</sup> Université Mantouri, Constantine, Algérie 2010
- [24] KERROUM B. "Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction." Mémoire de Master de l'Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.