

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



## MEMOIRE DE MAGISTER

EN ELECTROTECHNIQUE  
OPTION : Machines Electriques

Présenté par

M<sup>elle</sup> YASSA Nacera

### *THEME*

**Modélisation des machines asynchrones  
dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires  
et des cassures de barres et d'anneaux.**

Soutenue le: 09 Mai 2009

Devant la commission d'examen :

|                           |            |                            |            |
|---------------------------|------------|----------------------------|------------|
| M. Salah HADDAD           | Professeur | Université Mouloud MAMMERI | Président  |
| M. Nacerddine BENAMROUCHE | Professeur | Université Mouloud MAMMERI | Rapporteur |
| M. Mohamed MEGHERBI       | M.C        | Université Mouloud MAMMERI | Examineur  |
| M. Kamel HAMMOUCHE        | M.C        | Université Mouloud MAMMERI | Examineur  |
| M. M'hemed RACHEK         | M.C. (B)   | Université Mouloud MAMMERI | Examineur  |

# Sommaire

|                                                                                                 |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale.....</b>                                                               | <b>1</b> |
| <b>Chapitre I    Constitution et présentation des défauts de la machine asynchrone</b>          |          |
| <b>I.1 Introduction .....</b>                                                                   | <b>4</b> |
| I.2 constitution de la machine asynchrone .....                                                 | 4        |
| I.2.1 Le stator .....                                                                           | 4        |
| I.2.2 Le rotor .....                                                                            | 5        |
| I.2.3 Les organes mécaniques.....                                                               | 6        |
| I.3 principe de fonctionnement.....                                                             | 6        |
| I.3.1 Vitesse de glissement .....                                                               | 7        |
| I.4 Classification des défauts dans la machine asynchrone et leurs techniques de diagnostic.... | 7        |
| I.4.1 Défaillances au stator .....                                                              | 9        |
| I.4.1.1 Les courts- circuits internes.....                                                      | 9        |
| I.4.1.2 Défaut d'isolant .....                                                                  | 10       |
| I.4.1.3 Décharges partielles .....                                                              | 11       |
| I.4.2 Défaillances au rotor .....                                                               | 11       |
| I.4.2.1 Ruptures de barres .....                                                                | 11       |
| I.4.2.2 Ruptures de portions d'anneaux de court -circuit .....                                  | 11       |
| I.4.2.3 Excentricité statique et dynamique.....                                                 | 12       |
| I.4.3 Défaillance d'ordre mécanique .....                                                       | 13       |
| I.4.3.1 Défaillance de l'arbre .....                                                            | 13       |
| I.4.3.2 Défaillance des roulements à billes .....                                               | 13       |
| I.4.3.3 Défaillance des flasques .....                                                          | 14       |
| I.5 Organisation générale de la procédure de diagnostic .....                                   | 14       |
| I.5.1 Fiabilité du diagnostic.....                                                              | 16       |
| I.6 Etat de l'art des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone.....                      | 16       |
| I.6.1 Différents types de maintenance .....                                                     | 16       |
| I.6.2 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone ...           | 16       |
| I.6.2.1 Détection à partir des méthodes internes .....                                          | 17       |
| I.6.2.2 Détection à partir des méthodes externes.....                                           | 18       |
| I.6.2.2.1 Analyse des signaux vibratoires.....                                                  | 19       |
| I.6.2.2.2 Analyse du couple .....                                                               | 20       |
| I.6.2.2.3 Analyse du flux.....                                                                  | 20       |
| I.6.2.2.4 Analyse du vecteur de Park .....                                                      | 20       |
| I.6.2.2.5 Analyse des courants statoriques .....                                                | 24       |
| I.7 Conclusion .....                                                                            | 27       |

# Sommaire

## **Chapitre II Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction.....                                                                     | 28 |
| II.2 Modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné .....                           | 28 |
| II.3 Présentation du modèle.....                                                          | 29 |
| II.3.1 Equations électriques de la machine .....                                          | 29 |
| II.3.2 Expression du flux .....                                                           | 30 |
| II.3.3 Expression du couple électromagnétique .....                                       | 31 |
| II.3.4 Equation mécanique.....                                                            | 32 |
| II.3.5 Etablissement du modèle d'état .....                                               | 32 |
| II.4 Validation du modèle triphasé-triphasé de la machine asynchrone à rotor bobiné ..... | 35 |
| II.4.1 Résultats de simulation en régime sain.....                                        | 37 |
| II.4.2 Interprétation des résultats de simulation .....                                   | 40 |
| II.5 Conclusion.....                                                                      | 41 |

## **Chapitre III Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence des défauts**

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                                                | 42 |
| III.2 Influence d'un court circuit sur les courants de lignes .....                     | 42 |
| III.3 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné avec défaut de court circuit ..... | 43 |
| III.3.1 Modélisation dans le repère triphasé .....                                      | 44 |
| III.3.2 Représentation d'état du modèle de défaut .....                                 | 46 |
| III.4 Résultats de simulation.....                                                      | 47 |
| III.4.1 Validation du modèle de la machine en présence de défaut de .....               | 47 |
| 30% de spires en court-circuit                                                          |    |
| III.4.2 Validation du modèle de la machine en présence de défaut de .....               | 49 |
| 35% de spires en court-circuit                                                          |    |
| III.4.3 Validation du modèle de la machine en présence de défaut de .....               | 51 |
| 40% de spires en court-circuit                                                          |    |
| III.5 Interprétation des résultats .....                                                | 55 |
| III.6 Conclusion.....                                                                   | 56 |

## **Chapitre IV Modélisation triphasée- polyphasée de la machine asynchrone à cage**

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction.....                                          | 57 |
| IV.2 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain..... | 57 |

# Sommaire

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.2.1 Structure du stator .....                                                                         | 57 |
| IV.2.2 Structure du rotor .....                                                                          | 58 |
| IV .3 Mise en équation .....                                                                             | 58 |
| IV.3.1 Equations différentielles associées au stator .....                                               | 59 |
| IV.3.2 Equations différentielles associées au rotor .....                                                | 60 |
| IV.3.3 Equation d'état.....                                                                              | 62 |
| IV.4 Calcul des inductances et des mutuelles .....                                                       | 63 |
| IV.4.1 Inductances statoriques .....                                                                     | 63 |
| IV.4.1 Inductances rotoriques .....                                                                      | 64 |
| IV.4.1 Inductances stator-rotor.....                                                                     | 65 |
| IV.5 Résultats de simulation .....                                                                       | 67 |
| IV.5.1 Exploitation du modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain .....                       | 67 |
| V.6 Conclusion.....                                                                                      | 69 |
| <b>V. Modélisation de la machine asynchrone à cage en présence des défauts</b>                           |    |
| V.1 Introduction .....                                                                                   | 70 |
| V.2 Origines des raies dues aux défauts rotoriques .....                                                 | 70 |
| V.3 Modèle de la machine en présence de défaut de cassures de barres .....                               | 71 |
| V.3.1 Représentation d'état du modèle de défaut.....                                                     | 72 |
| V.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en présence de défaut de ruptures de portions d'anneaux ..... | 72 |
| V.4.1 Représentation d'état du modèle de défaut.....                                                     | 72 |
| V.5 Interprétation des résultats de simulation.....                                                      | 73 |
| V.6 Validation du modèle de la machine avec défaut de cassures de barres.....                            | 74 |
| V. 7 Validation de modèle de la machine avec défaut de cassure de portions d'anneaux .....               | 81 |
| V.8 Conclusion.....                                                                                      | 85 |
| Conclusion générale .....                                                                                | 87 |

Annexes

Bibliographie

# **Introduction générale**

Dans les secteurs industriels, les chaînes de production doivent être dotées de systèmes de protection fiables, car une quelconque défaillance peut mener un à dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des techniques de diagnostic. La problématique du diagnostic est en effet liée à celle de la maintenance, or celle-ci fait intervenir des facteurs économiques (coût de la maintenance par rapport au gain espéré), des facteurs humains (qualification, formation du personnel) et des facteurs industriels difficiles à évaluer [Didier, 04]. Le diagnostic des défaillances des systèmes industriels lorsqu'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Sa vocation première est de détecter et puis de localiser une possible défaillance des matériels.

Le travail proposé porte sur le diagnostic des machines asynchrones triphasées. Ces dernières, de part leur robustesse, leur simplicité de construction et leur faible coût d'achat, sont largement utilisées en milieu industriel. Leur continuité de fonctionnement nécessite la mise en place de programmes de maintenance préventive et corrective, permettant en partie d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations [Casimir, 03a].

Tant dans le domaine du diagnostic que dans celui de la commande des machines électriques, il est intéressant de disposer de modèles capables de représenter le comportement du système en présence de déséquilibres structurels. La mise au point d'une procédure de diagnostic pour la machine asynchrone recouvre un certain nombre de problèmes qui doivent être résolus. L'un de ces problèmes est celui de la synthèse de modèles décrivant le comportement de la machine [Khatir, 07]. Ceci non pas d'une façon moyenne comme pour la commande, mais d'une façon plus exacte en intégrant certains paramètres pour décrire le plus précisément possible le comportement de la machine. Pour cela, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèles de type circuit, modèles multi-enroulements) pour une description adaptée aux défauts, que ce soit pour une simulation plus réaliste ou pour une utilisation dans la méthode de détection.

Les défauts qui apparaissent dans la machine asynchrone ont des causes variées. Ils peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur, ou bien aux conditions d'utilisation, ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service

En effet, l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un cout de réparation non négligeable pour l'entreprise sans oublier la perte de production occasionnée.

Il existe plusieurs procédures de diagnostic [Zwingelstein, 95]. Le choix d'une approche est lié à la connaissance que l'on souhaite acquérir sur le système, mais aussi à la complexité de ce système. Ainsi deux types de procédures sont utilisés dans le domaine du diagnostic : les méthodes de diagnostic à base de modèles analytiques et les méthodes sans modèle.

Les méthodes à base de modèles analytiques reposent sur le suivi des paramètres et des grandeurs de la machine, au moyen d'algorithmes d'observation. Elles détectent les défaillances en comparant l'évolution de l'écart entre le modèle et le processus réel. Le principal avantage de ces méthodes réside dans l'intégration d'une connaissance a priori du système et donc un filtrage de l'information [Casimir, 03a].

Les méthodes sans modèle sont basées sur l'extraction d'information par le biais du traitement des signaux mesurés. Les signaux mesurables (les courants, les tensions, la vitesse, ...) peuvent fournir des informations significatives sur les défauts.

L'objectif principal de notre travail est l'élaboration de modèles de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné, et à rotor à cage d'écureuil, cela en régime sain et en présence des défauts, en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés(**CEMC**). Cette dernière est basée sur la représentation des bobinages de la machine par des circuits électriques distribués sans utiliser aucune transformation [Khezzar, 04][Houdouin,02]. Ce type d'approche offre un modèle de machine flexible, un temps de calcul raisonnable et ne nécessite aucun recours au calcul de champs. Les défauts étudiés sont le court-circuit inter-spires pour la machine asynchrone à rotor bobiné, et la rupture des barres et d'anneaux de court-circuit concernant la machine à cage d'écureuil. Les différents modèles de la machine sont programmés et simulé sous logiciel **MATLAB**.

Ce mémoire comporte cinq chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons en premier temps les éléments de construction de la machine asynchrone ainsi que les différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux. Dans un deuxième temps, nous citons quelques techniques de détection de ces défauts. Nous terminons ce chapitre par une synthèse de toutes les pannes citées auparavant, en définissant leurs causes et leurs conséquences.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, le modèle présenté est un modèle réel triphasé-triphasé.

Le troisième chapitre présente un modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné, en présence de défaut de court-circuit entre-spires d'une phase statorique, pour différents pourcentage de spires en court-circuit, ce modèle nous permet d'étudier l'influence de ce défaut sur l'évolution des grandeurs de la machine telle que le courant, la vitesse et le couple.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du modèle de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil. Nous utilisons un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques pour analyser le comportement de la machine. Ce modèle représente la machine par des enroulements au stator et au rotor. Le nombre d'enroulements utilisé pour représenter le rotor est égal au nombre de barres de la cage. Le développement de ce modèle peut donner une vision plus claire sur les paramètres de la cage du moteur d'une façon générale et en particulier sur l'évolution des courants rotoriques. Les résistances des anneaux et des barres de la cage seront calculées à partir des équations des mailles.

Dans le cinquième chapitre, nous abordons le problème de la machine à cage présentant des défaillances de structure, nous nous intéressons, plus spécialement, à la rupture de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuit, et à leurs impacts sur le fonctionnement de la machine. Nous terminons par une conclusion sur l'ensemble de cette étude et nous proposons des perspectives du travail.

Les annexes contiennent les paramètres des machines étudiées, et une représentation de la méthode Rung-kutta, que nous avons développée lors de nos simulations.

# **Chapitre I**

## **Constitution et présentation des défauts de la machine asynchrone**

**I.1 Introduction**

Le moteur asynchrone est largement utilisé dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique avantageuse, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, et son faible coût etc .... L'apparition des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il rentre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc...) [Bouharkat, 05]. L'objectif de ce premier chapitre est d'effectuer quelques rappels élémentaires sur les éléments de constitution de la machine asynchrone. A ce propos, nous nous intéressons à la réalisation des enroulements statoriques et des encoches rotoriques, nous effectuons ensuite une présentation des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces éléments, en citant leurs causes et effets sur le comportement de la machine. Finalement nous rappelons brièvement les techniques de base couramment utilisées pour la détection des divers défauts.

**I.2 Constitution de la machine asynchrone**

Nous nous limitons à la présentation succincte des machines asynchrones triphasées, en donnant quelques précisions sur les éléments constitutifs de ces machines. La machine asynchrone triphasée peut se décomposer, du point de vue de sa construction, en trois parties distinctes :

- Le stator, (partie fixe) où est fixée l'alimentation, est constitué de disques en tôles magnétiques empilés portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.
- Le rotor (partie tournante), permet de mettre en rotation la charge mécanique, il est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement qui peut être bobiné semblable à celui du stator ou injecté de type cage.
- Les organes mécaniques, permettent la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles.

**I.2.1 Le stator**

Le stator de la machine asynchrone est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques FIG.I.1. Les tôles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être décomposé en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [Bachir, 02]. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer un champ

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

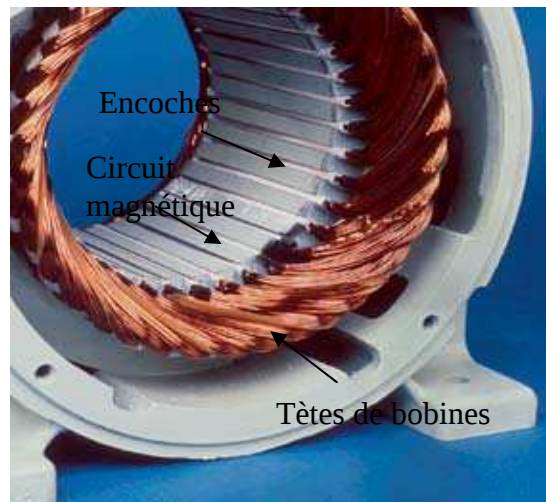


FIG.I.1 photo du stator d'une machine asynchrone [Ondel, 06l]

### **I.2.2 Le rotor**

Le rotor se décompose aussi d'un circuit magnétique constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Le rotor de la machine asynchrone peut être de deux types : bobiné ou à cage d'écureuil.

Le rotor bobiné est construit de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans leurs encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors accessibles grâce à un système de bagues- balais positionné sur l'arbre de la machine [Bounchard, 97]. Le rotor à cage est constitué de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits, ces barres sont reliées entre elles à chacune des extrémités du rotor par un anneau de court circuit FIG.I.2. Très souvent les barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et aussi diminuer fortement le bruit lors de l'accélération de la machine. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [Scheaffer, 99].

Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible. Le rotor à cage d'écureuil peut aussi être considéré comme un enroulement polyphasé fermé.

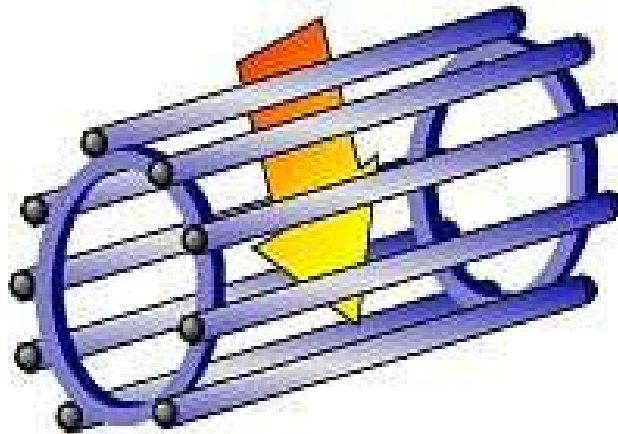


FIG.I.2 Rotor à cage d'écureuil

### **I.2.3 Les organes mécaniques**

L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur le quel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre [Ondel, 06]. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulement pour les machines de petite et moyenne puissance.

### **I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone**

Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois d'induction : la machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le secondaire (le rotor) est en court circuit [Caron ,95] [Genon ,00].

Les courants statoriques, de fréquence  $f_s$  ou de pulsation  $\omega_s$ , créent un flux tournant à la vitesse synchrone  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$ . Ce flux balayant le bobinage rotorique en court circuit y induit des forces

électromotrices (f.e.m), qui produisent des courants, c'est l'action du flux tournant sur les courants qu'il a lui-même induit qui crée le couple.

**I.3.1 Vitesse de glissement**

En fonctionnement normal, le rotor de la machine asynchrone tourne à la vitesse  $n_r$  tours par minute, soit  $\Omega_r$  radians par seconde. La force magnétomotrice produite par les courants statoriques tourne à la vitesse de synchronisme  $n_s$  tours par minute.

La vitesse  $\Omega_r$  est généralement inférieure à  $\Omega_s$ , on définit le glissement  $g$  ou la variation relative des vitesses par la formule suivante

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$$

I.1

$n_r$  vitesse de rotation du rotor [tr/min],

$n_s$  vitesse de rotation de synchronisme [tr/min],

$\Omega_r$  vitesse angulaire réelle de la machine [rd/s],

$\Omega_s$  vitesse de synchronisme [rd/s],

Si la vitesse  $\Omega_r$  du rotor est égale à la vitesse  $\Omega_s$  du champ tournant statorique alors, le rotor est fixe par rapport au champ statorique. Dans ce cas, il n'y a pas de mouvement relatif par rapport au rotor ( $g=0$ ), les forces électromotrices induites et les courants rotoriques dans les bobinages du rotor sont nuls ainsi que leur pulsation ou par conséquent leur fréquence.

La vitesse du rotor est nulle (rotor bloqué,  $g=1$ ) alors, le moteur se comporte dans ce cas comme un simple transformateur triphasé ayant un secondaire en court-circuit.

Dans le cas où  $0 < g < 1$ , le champ statorique induit dans les conducteurs du rotor des forces électromotrices et des courants de pulsation  $g.\omega_s$ . L'interaction entre le champ d'induction, qui se déplace à la vitesse  $g.\omega_s / p$  par rapport au rotor, et les courants de pulsation  $g.\omega_s$  induits dans celui-ci génère un couple dirigé dans le sens de la rotation de la machine

**I.4 Classification des défauts dans la machine asynchrone et leurs techniques de diagnostic**

Au cours de sa durée de vie, la machine asynchrone est bien souvent soumise à des sollicitations sévères qui peuvent conduire à un certain nombre de défaillances. Ces défaillances peuvent évidemment concerner les différents sous systèmes des entraînements électriques à savoir la mécanique proprement dite (arbre de transmission, réducteurs...) et les convertisseurs statiques associés [Phuong, 07]. Dans cette partie, nous présentons les différents types de défauts apparaissant dans la machine asynchrone. Ces défaillances peuvent être d'origine diverses :

- mécaniques : mauvaise fabrication, vibrations de la machine, forces électromagnétiques déséquilibrées, force centrifuge, fluctuations de la charge.
- électriques : dégradations d'isolement, décharges partielles, étincelles.
- thermiques : pertes dans le cuivre, manque de refroidissement général ou localisé.
- environnementales : humidité, ozone, poussière

Ces défauts produisent un ou plusieurs symptômes qui peuvent être :

- un déséquilibre des courants de lignes et des tensions ;
- une augmentation des oscillations du couple ;
- une diminution du couple moyen ;
- une augmentation des pertes ;
- un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de système industriel [Phuong, 07] sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50kw à 200kw) a donné les résultats suivants (FIG.I.3)

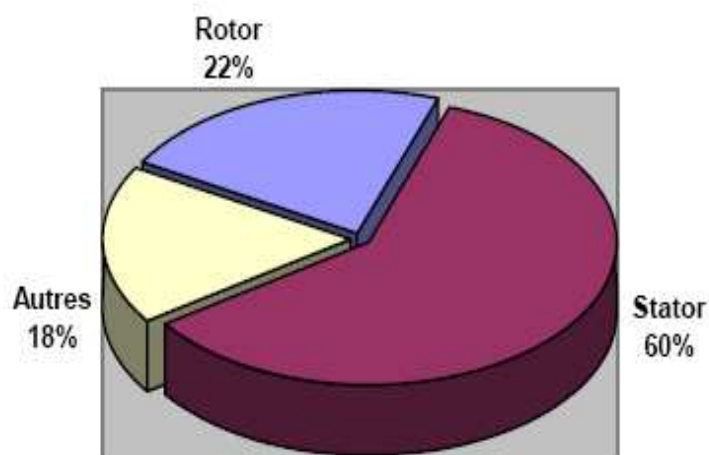


FIG.I.3 Proportion des défauts [Phuong, 07].

D'autres parts, les mêmes études montrent qu'en 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et au rotor de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants pendant cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est établie comme suit :

|                     |     |              |    |
|---------------------|-----|--------------|----|
| Enroulements stator | 51% | Tôles stator | 9% |
| Défauts au rotor    | 22% | Roulements   | 8% |
| Autres              | 10% |              |    |

Une autre étude statistique faite sur des machines asynchrones de grande puissance (100KW à 1MW) a donné les résultats suivants [Thorsen, 95] :

|                     |     |                    |     |
|---------------------|-----|--------------------|-----|
| Enroulements stator | 13% | Couplage mécanique | 4%  |
| Défauts au rotor    | 8%  | Roulements         | 41% |
| Autres              | 34% |                    |     |

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ce type de machines ; ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ceux –ci exigent une maintenance mécanique accrue.

#### **I.4.1 Défaillances au stator**

Même si les vibrations des conducteurs d'encoches et les divers frottements qui en résultent, suite à de grandes sollicitations de la machine, accélèrent l'usure des isolants, il reste que le facteur principal du vieillissement est l'échauffement anormal des bobinages [Bachir, 02]. En effet, les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator sont : les courts-circuits internes, défaut d'isolant et décharge partielle [Toliat, 05].

##### **I.4.1.1 Les courts- circuits internes**

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statoriques de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. Nous pouvons citer, par exemple, les défauts de type court-circuit inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Les courts-circuits apparaissant entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou encore entre deux phases statoriques [Nandi, 05] [Schaeffer, 99a]. Ces défauts ont le plus souvent une origine mécanique. En effet, des vibrations excessives peuvent mener à un desserrement des boulons de la plaque à bornes de la machine créant ainsi le court-circuit. Une cosse mal serrée à la jonction du câble d'alimentation et des bornes de la machine peut être à l'origine d'une ouverture de la phase. Le défaut le plus couramment rencontré reste encore la fusion d'un fusible de protection [Didier, 04].

**a. Court-circuit entre phases**

L'apparition d'un court-circuit entre phases, induirait des courants très élevés conduisant la fusion des conducteurs. Cependant, un court-circuit au bobinage près du neutre où entre deux phases n'a pas un effet radical, il conduit à un déséquilibre de phase sans provoquer la fusion des conducteurs [Ondel, 06]. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont amplifiés lors de l'apparition de ce défaut.

**b. Court-circuit entre une phase et le neutre**

Le courant dans la phase concernée a une amplitude supérieure par rapport au courant des autres phases. Toute fois, les courants qui parcourent ces phases sont amplifiés par rapport au cas de la machine saine. Plus important est le nombre de spires en court-circuit, plus forte est l'augmentation des courants [Boumegoura, 01]. De plus, le facteur de puissance diminue avec l'augmentation du nombre de spires en court circuit, ce qui explique la modification des bobinages, qui implique une variation de l'inductance propre de la phase affectée par le défaut et affecte les autres phases par couplage magnétique.

**c. Court-circuit entre spires**

Un court-circuit entre spires de la même phase est assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Dans ce cas, la machine peut continuer à fonctionner, mais si le courant de court -circuit est important il peut entraîner une légère variation d'amplitude sur les autres phases, modifier le facteur de puissance et amplifier les courants dans le circuit rotorique [Phuong,07][Ondel,06] .

Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage, et de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un deuxième court-circuit). Il est donc important de détecter un tel défaut très rapidement avant la destruction complète de la machine.

**I.4.1.2 Défaut d'isolant**

La dégradation des isolants dans les enroulements est à l'origine des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques qui se traduisent par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température et de tension. De ce fait, si

l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Les différentes causes de ce type de défaut sont : une tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation, un courant élevé dans l'enrouement dû à un court-circuit et une surchauffe qui entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.

#### **I.4.1.3 Décharge partielle**

Ce phénomène naturel dû aux décharges dans les isolants entre conducteurs ou entre conducteur et la masse s'amplifie avec le vieillissement des isolants. Il est pratiquement imperceptible dans les isolants neufs par les moyens de mesure classiques car son effet n'est pas discernable par rapport aux bruits de mesure [Boumegoura, 01]. Sa présence précède l'apparition des courts-circuits entre phases ou entre phase et masse lorsque ces décharges partielles ont suffisamment détérioré les isolants.

#### **I.4.2 Défaillances au rotor**

Les défauts qui sont les plus fréquents, localisés au niveau du rotor sont : rupture totale ou partielle des barres, rupture totale ou partielle de portion d'anneau de court-circuit, et excentricité statique et dynamique [Aderiano, 06].

##### **I.4.1.2.1 Ruptures de barres**

Les cassures de barres sont les défauts les plus fréquents au niveau du rotor, elles se présentent par des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres de la cage. Ces défauts se traduisent par une augmentation de la résistance équivalente d'un enroulement rotorique. La rupture d'une barre peut être due à plusieurs phénomènes qui sont souvent indépendants les uns des autres. Nous pouvons citer par exemple une mauvaise utilisation de la machine (charge trop importante) ou encore l'environnement hostile dans lequel elle fonctionne [Faiz,06][Szabo, 04]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et [Faiz,07] augmente l'hétérogénéité électrique et magnétique qui se traduisent par des oscillations engendrant des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine.

##### **I.4.1.2.2 Ruptures de portions d'anneaux de court-circuit**

Les cassures de portions d'anneaux sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations entre les barres et les anneaux. Ce type de défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la

rupture de barres, par conséquent, il est difficile de le détecter (FIG.I.4). Les anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques [Ondel, 06].

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques, ce qui engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres. Un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge peuvent entraîner leur cassure.

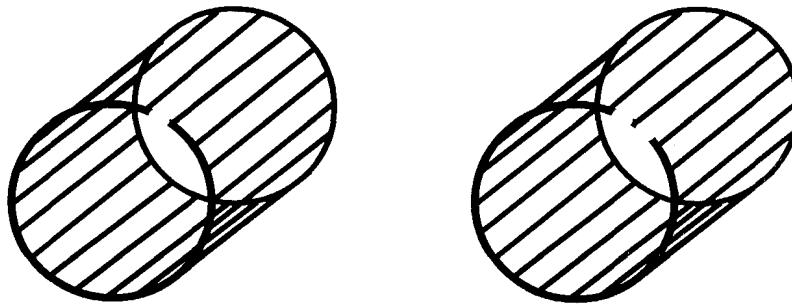
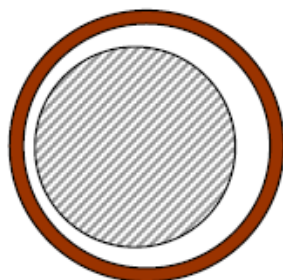


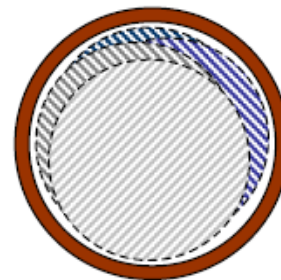
FIG.I.4 Rupture d'une et de deux portions d'anneaux

#### I.4.1.2.3 Excentricité statique et dynamique

Les excentricités peuvent être statiques, dynamiques ou mixtes. Il s'agit d'un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator qui peut avoir pour origine un positionnement incorrect des paliers lors de l'assemblage, un défaut de roulement (usure), un défaut de charge, ou un défaut de fabrication. L'excentricité statique de l'entrefer correspond au cas où le centre de rotation de l'arbre du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator. L'excentricité dynamique, correspond au cas où le centre du rotor diffère du centre géométrique du stator, de plus le centre du rotor tourne autour du centre géométrique du stator. L'excentricité mixte est la combinaison des deux cas présentés précédemment, [Devanneaux, 01,] [Faiz, 06]. On peut présenter l'excentricité statique et dynamique de la manière suivante ; FIG.I.5



Excentricité statique



Excentricité dynamique

FIG.I.5 Modélisation schématique de l'excentricité statique et dynamique

Ce défaut modifie le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui peut engendrer une dégradation de son isolant.

### **I.4.3 Défaillance d'ordre mécanique**

Ces défaillances peuvent apparaître au niveau des flasques, des roulements à billes ou encore de l'arbre du moteur [Didier, 04] [Bigret, 95] [Ondel, 06].

#### **I.4.3.1 Défaillance de l'arbre**

L'arbre de la machine peut laisser apparaître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des micro-fissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une analyse vibratoire, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillances.

#### **I.4.3.2 Défaillance des roulements à billes**

Les roulements à billes représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine. Ils permettent d'assurer une bonne rotation du rotor. Le défaut des roulements est le défaut le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Parmi les principales causes de ce défaut ; l'usure due au vieillissement, la température de fonctionnement élevée, un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication et le défaut de montage. Les courants électriques circulant au niveau des roulements d'une machine asynchrone provoquent pour des vitesses importantes la détérioration de ces derniers [Lahcène, 05]. Ce défaut se traduit par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinale de la machine. Dans le cas défavorable, la présence d'un roulement défectueux peut amener au blocage du moteur. L'analyse vibratoire ou l'analyse harmonique permet de détecter ce type de défaillances.

### **I.4.3.3 Défaillance des flasques**

Ces défaillances sont généralement initiées à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes induisant une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire où une analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

## **I.5 Organisation générale de la procédure de diagnostic**

La procédure de diagnostic de défaillances et de dégradation susceptible d'affecter les différentes entités d'un moteur électrique s'articule autour des étapes suivantes [Zwingelstein, 95]:

- L'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux, à partir des moyens de mesures appropriés ou d'observations réalisées par les personnels de surveillance.
- L'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes révélateurs de défaillances et de dégradation en vue de la détection d'un dysfonctionnement.
- La détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnement normaux, et la définition d'indicateurs de confiance dans la détection.
- La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet.
- La prise de décision en fonction des conséquences futures des défaillances et des dégradations. Cette prise de décision peut conduire à un arrêt de l'installation si les conséquences de la défaillance sont importantes pour la sécurité des personnes et des biens ou à une reconfiguration du fonctionnement du procédé pour éviter une perte de production en attendant le prochain arrêt de production le plus propice aux opérations de maintenance corrective. La FIG.I.6 représente l'ensemble des tâches à réaliser pour assurer un fonctionnement satisfaisant d'un processus industriel.

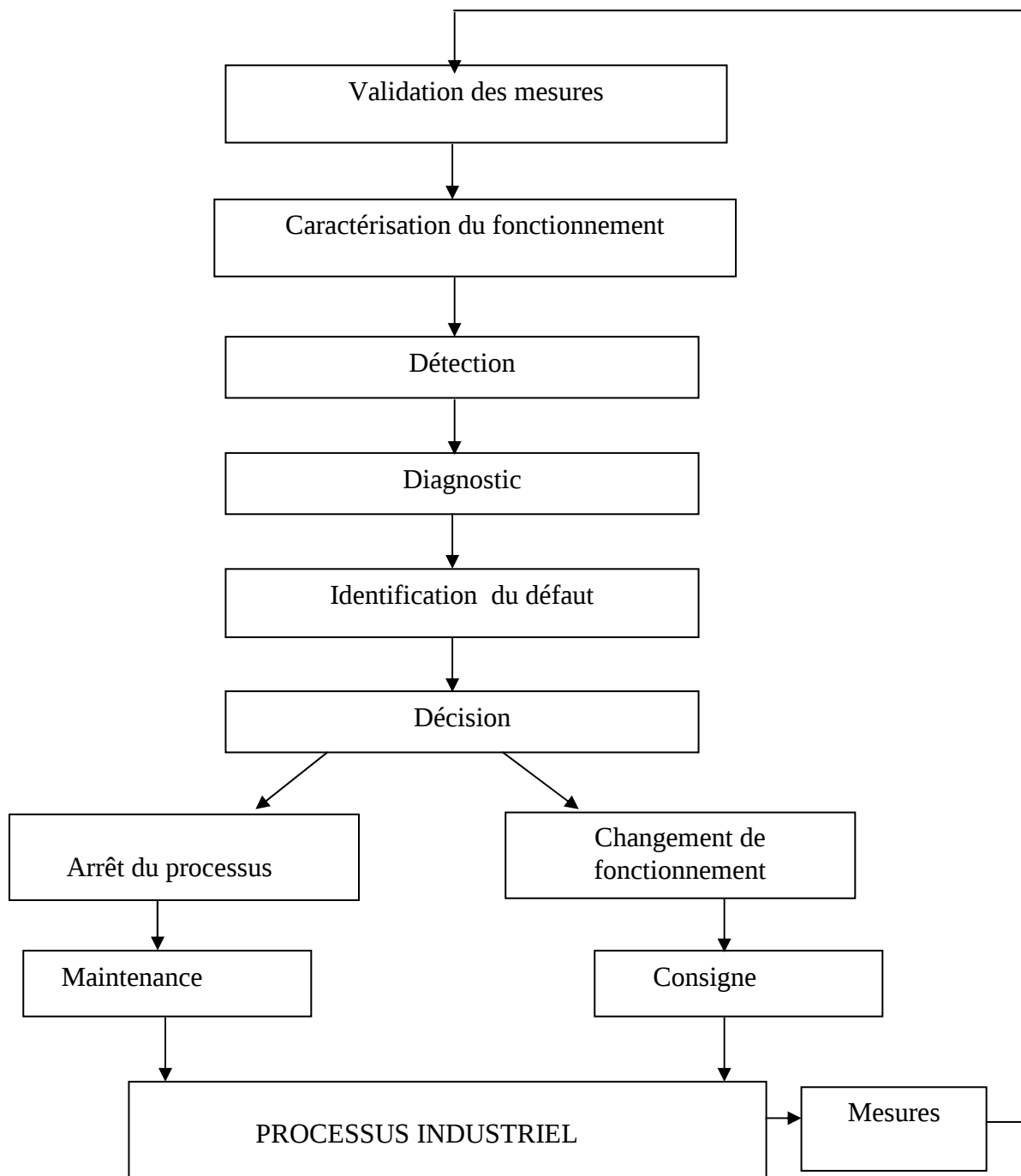


FIG.I.6 Différentes phases de diagnostic [Zwingelstein, 95]

### **I.5.1 Fiabilité du diagnostic**

Le diagnostic sera souvent facilité si l'expert dispose :

-de la fiche cinématique de la machine, d'un historique des pannes et des modifications apportées à la machine depuis sa mise en service.

-de l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature vibratoire initiale de l'installation considérée en bon état et leurs profils d'évolution. La signature initiale apporte dans ce cas à l'expert les éléments de référence qui lui permettront de statuer sur l'importance et la gravité des évolutions. L'établissement de la signature initiale d'une installation doit donc faire l'objet du plus grand soin et faire appel aux mêmes techniques et méthodologies d'investigation que le diagnostic [Boulenger, 03].

Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic mais sont rarement disponibles, tout au moins sous une forme facile à exploiter. Comme la fiabilité du diagnostic repose avant tout sur l'identification de toutes les images vibratoires contenues dans les signaux délivrés par les capteurs, le traitement du signal joue un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase de l'identification systématique de toutes les images vibratoires nécessite de suivre une démarche rigoureuse en méthodologie.

## **I.6 Etat de l'art des méthodes de diagnostic**

### **I.6.1 Différents types de maintenance**

Les différents types de maintenance utilisés dans les applications industrielles dépendent principalement du niveau de criticité du système considéré. Plus la criticité est importante, plus les moyens et donc le coût associé seront élevés [Phuong, 07]. On distingue :

- La maintenance préventive. Celle-ci consiste à changer les systèmes à date fixe prédéterminée. Le coût associé est important.
- La maintenance corrective. L'évaluation du système est réalisée fréquemment grâce à une instrumentation supplémentaire. Notons que plus cette évaluation est fréquente plus les coûts d'immobilisation du système seront réduits. C'est dans le cadre de la maintenance corrective que l'utilisation de méthodes de diagnostic devient fondamentale. En effet, plus le diagnostic sera précis, plus l'intervention sera courte.
- La maintenance prédictive. L'intervention est effectuée avant l'apparition des défauts.

### I.6.2 Méthodes de détection et de diagnostic des défauts de la machine asynchrone

L'apparition d'un défaut au niveau de l'entraînement modifie le fonctionnement de ce dernier, ce qui affecte ses performances. Etant donnée la diversité de ces défauts et la complexité des relations cause à effet, de nombreuses méthodes, permettent de réaliser une démarche de diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées [Zwingelstein, 95]. Dans cette partie, nous allons faire une présentation des différentes méthodes de détection ainsi que des signatures qui en découlent. Ces méthodes sont classées en deux grandes familles, analytique ou heuristique, en fonction de la forme prise par la connaissance du comportement du système. La distinction est donc faite entre, les méthodes qui effectuent l'analyse des signaux d'acquisitions sans connaissance a priori, et celles qui nécessitent la formulation d'un modèle mathématique.

#### I.6.2.1 Détection à partir des méthodes internes (connaissance a priori)

Ces méthodes sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système. Elles s'appuient sur le suivi d'évolution des paramètres caractéristiques du système étudié ou sur la différence entre le modèle et le processus. Une comparaison entre les paramètres mesurés ou calculés et ceux associés à un mode de fonctionnement normal (sain) nous renseigne sur la présence éventuelle de défaut. Nous pouvons citer trois approches qui peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques.

- La surveillance par les observateurs.
- La surveillance par la méthode des résidus.
- La surveillance par estimation paramétrique.

Le principe général de ces méthodes est illustré par la FIG.I.7

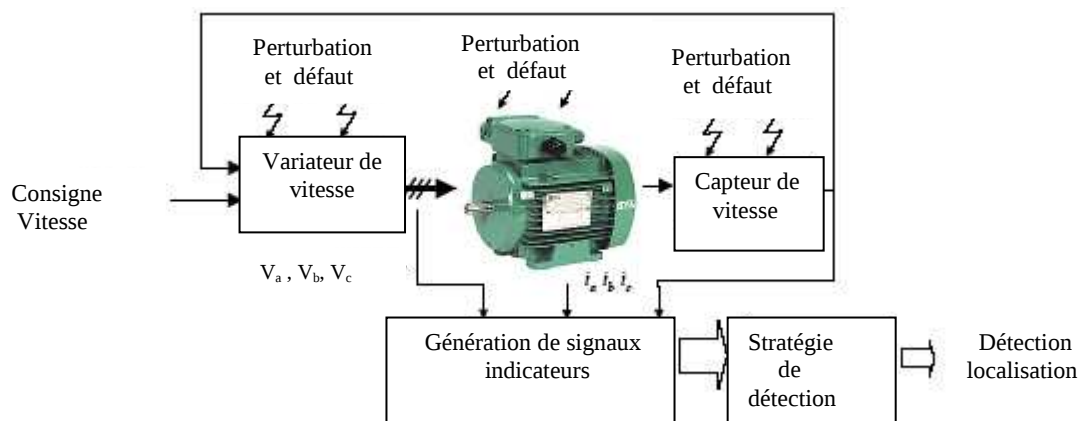


FIG.I.7 Principe général de diagnostic à base de modèle [Bachir, 02]

Les observateurs sont généralement utilisés dans la synthèse des lois de commande des machines à induction. Ils sont choisis et calculés en fonction du critère de stabilité et de performances. Un défaut se traduisant par la rupture des hypothèses d'équilibre du modèle, il peut se révéler dans la rupture des grandeurs observées par rapport aux grandeurs mesurées, la comparaison de la sortie réelle avec la sortie observée peut donc fournir des informations exploitables pour la détection et la localisation des défauts [Isermann , 97].

Comme pour les observateurs, la méthode des résidus consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller [Bachir, 02]. Ce modèle est de manière générale constitué d'un ensemble de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbation, entrée inconnue) et variables connues (consigne, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient.

Concernant la détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique, Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres physiques au cours de fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence des défauts. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux de système étudié. Les paramètres peuvent aussi être identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le filtre de Kalman [Ondel, 06] [Eltabach, 02]. En tant qu'un algorithme l'identification en temps réel, le filtre de Kalman étendu délivre un modèle adaptatif, capable de prendre en compte les évolutions normales des paramètres de la machine telles que la variation des résistances (en fonction de la température) ou encore la variation des inductances (en fonction du niveau de saturation). Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance correspondant au type de défaut que l'on voudra détecter [Didier, 04].

#### **I.6.2.2 Détection à partir des méthodes externes (sans connaissance a priori)**

Ces méthodes se basent sur l'analyse spectrale des signaux ou des mesures que fournit la machine lors de son fonctionnement telle que les courants, le couple estimé et les flux. Le principe de ces méthodes repose sur l'existence de caractéristiques fréquentielles propres au fonctionnement sain et défaillant du procédé [Mansouri ,05]. La première étape est basée sur la connaissance du système sain (par mesure ou par modèles numériques). La deuxième étape consiste ensuite en une création « artificielle » de défaut (à nouveau par modèle numérique).

La signature du défaut, c'est à-dire sa répercussion sur certaines grandeurs, est alors identifiée. Une observation est ensuite réalisée sur un convertisseur réel [Phuong,07]. Une analyse est portée sur les grandeurs (approche traitement du signal) consistant en la reconnaissance de signatures de défauts déjà connues [Neelam, 07] [Jayaswal,08 ]. Nous nous intéressons aux méthodes reposant sur l'analyse fréquentielle par mesure des grandeurs suivantes :

- La surveillance des vibrations avec des capteurs de vibrations (accéléromètres...)
- La surveillance du couple électromagnétique.
- La surveillance du flux.
- L'analyse du courant de phase avec la méthode MCSA (Motor Current Signature Analysis) parce que les machines sont généralement équipées d'un capteur de courant ;

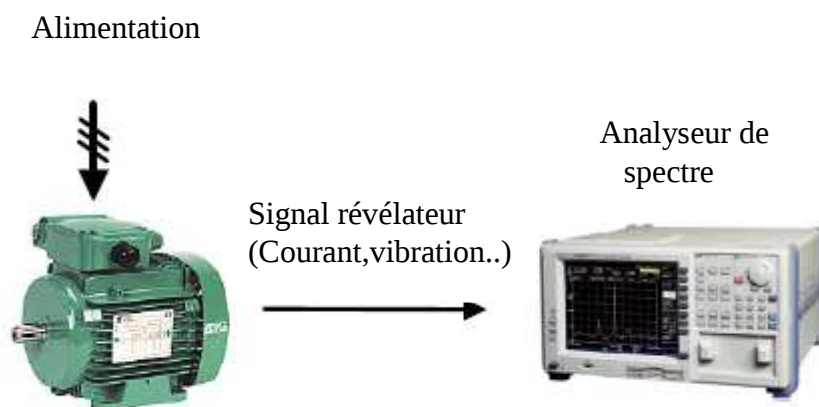


FIG.I. 8 Principe de la surveillance par analyse spectrale [Bachir,02].

Les grandeurs mesurées sont analysées du point de vue spectrale. En effet, en ce qui concerne la détection de la présence d'un défaut dans la machine asynchrone, les méthodes de diagnostic sont classiquement basées sur l'analyse fréquentielle des signaux en utilisant une transformée de Fourier [Bellini, 00]. En effet, une comparaison de l'amplitude des composantes signataires de défaut avec un seuil de référence (seuil calculé lorsque la machine est saine) est utilisée pour détecter la présence d'une anomalie.

#### **I.6.2.2.1 Analyse des signaux vibratoires**

L'analyse vibratoire de la machine peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales [Bigret, 95]. Au même titre que les courants, les vibrations de la machine fournissent des informations sur pratiquement tous les

défauts mécaniques fréquemment rencontrés [Casimir, 03a] [Jayaswal, 08]. Cependant cette analyse comporte les inconvénients dus au problème d'accessibilité et des difficultés rencontrées dans les connexions mécaniques des accéléromètres pour effectuer les mesures nécessaires au voisinage direct du défaut. De plus, le coût de ces capteurs reste relativement élevé par rapport aux autres capteurs tels que les capteurs de vitesse ou de courant. Pour s'affranchir de ces problèmes, les recherches focalisent leurs efforts pour détecter et localiser les défauts par l'analyse d'autres signaux.

#### **I.6.2.2.2 Analyse du couple électromagnétique**

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, le spectre fréquentiel du couple électromagnétique laisse apparaître des composantes supplémentaires. L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Les oscillations du couple provoquées par certains défauts rotoriques peuvent servir à détecter ceux-ci [Ondel, 06]. Il a été montré par une analyse théorique et des essais comment le spectre du couple se trouve modifié lorsqu'un des deux anneaux d'une cage est cassé. Les fréquences d'encoches présentées dans le spectre du couple sont données par [Casimir, 03a]

$$f_{sb} = f_s \left[ \frac{N_r(1-g)}{p} \pm n \right] \pm 2.g.f_s \quad \text{I.2}$$

$f_s$  fréquence d'alimentation,

$p$  nombre de paire de pôle,

$g$  glissement ,

$N_r$  nombre de barres rotoriques,

$n=1,2,3,... \in \mathbb{N}$ ,

#### **I.6.2.2.3 Analyse du flux**

Certaines études conduites sur l'analyse du flux de dispersion de la machine asynchrone, pour la détection des courts-circuits entre spires statoriques, ont montré que l'apparition de ce type de défaut induisait des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel du flux de dispersion [Henao, 05]. Cette approche permet de détecter, tant un défaut statorique, qu'un défaut rotorique en utilisant un capteur de flux.

Les composantes fréquentielles du flux de fuite dans l'axe du rotor qui permettent de détecter et d'identifier des courts-circuits dans les enroulements statoriques sont  $k.f_s \pm n.f_r$ , avec  $n$  et  $k$  des nombres entiers et  $k$  impair, ces composantes présentent dans le spectre du flux pour une machine saine, vont augmenter avec l'apparition d'un défaut [Henao, 99].

#### **I.6.2.2.4 Analyse du vecteur de Park**

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park [Didier, 04]. En fonction des courants de phases  $i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$ , les courants de Park  $i_d(t), i_q(t)$  peuvent être calculés grâce aux relations suivantes

$$i_d(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \quad \text{I.3}$$

$$i_q(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \quad \text{I.4}$$

En présence d'une barre cassée, le courant absorbé par le moteur asynchrone contient des composantes latérales de part et d'autre de sa composante fondamentale dont les fréquences sont données par la relation

$$(1 \pm 2kg).f_s. \quad \text{I.5}$$

Ces composantes seront, par conséquent, aussi présentes dans les courants de Park  $i_d(t), i_q(t)$  (équations I.3, I.4). Dans ces conditions, il est très simple de montrer que le spectre du module  $\sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2}$  contient une composante continue générée par la composante fondamentale du courant statorique plus des composantes de fréquence  $2gk.f_s$ . De cette façon, le spectre des courants de Park, en éliminant préalablement la composante continue, ne contiendra que les composantes spécifiques au défaut de la machine [Boucherma, 06]. Il sera alors plus facile de détecter ces composantes et de diagnostiquer la présence d'un défaut rotorique.

#### **I.6.2.2.5 Analyse des courants statoriques**

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre résultant contient des renseignements sur la majorité des

défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone [Menacer, 04] [Theys, 99]. Dans cette analyse fréquentielle, il est préférable de faire une étude globale sur les courants, car un défaut au rotor est visible sur le spectre des trois courants de lignes.

#### **I.6.2.2.5.1 Rupture de barre ou portion d'anneau**

La rupture de barres d'une machine asynchrone est un des défauts le plus couramment étudié en raison de sa simplicité de réalisation. Ce défaut induit des modifications dans les courants du stator, et entraîne donc l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal [Adriano, 06]. En effet, lors de l'apparition d'une rupture de barre, des harmoniques de flux sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences [Thomson, 03]

$$f = (1 \pm 2.g) f_s \quad \text{I.6}$$

De plus, les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailantes.

#### **I.6.2.2.5.2 Excentricité**

La variation de la longueur de l'entrefer entraîne des variations dans la densité du flux d'entrefer. Les enroulements statoriques sont électriquement modifiés, ce qui entraîne des effets dans le spectre des courants. L'identification du type de l'excentricité est possible par la visualisation dans ce spectre des composantes fréquentielles suivantes [Benbouzid, 00].

Pour l'excentricité statique

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[ 1 \pm \frac{n \cdot N_r \cdot (1-g)}{p} \right]$$

I.7

Pour l'excentricité dynamique

$$f_{exc} = f_s \cdot [1 \pm 2..n(1-g)] \quad \text{I.8}$$

Pour le désalignement

$$f_{exc} = f_s \cdot \left[ 1 \pm \frac{n \cdot (1-g)}{p} \right] \quad \text{I.9}$$

#### **I.6.2.2.5.3 Défaut de roulement à billes**

La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre du courant statorique est basée sur le fait que toutes les excentricités interfèrent sur le champ dans l'entrefer de la machine

asynchrone, pour cela les harmoniques contenus dans le spectre du courant statorique peuvent être décrits [Arqués, 96] par :

$$f_{exc} = \left( 1 + k \left( \frac{(1-g)}{p/2} \right) \right) f_s \quad \text{I.10}$$

$$k = 1, 3, 5, \dots, n \in N$$

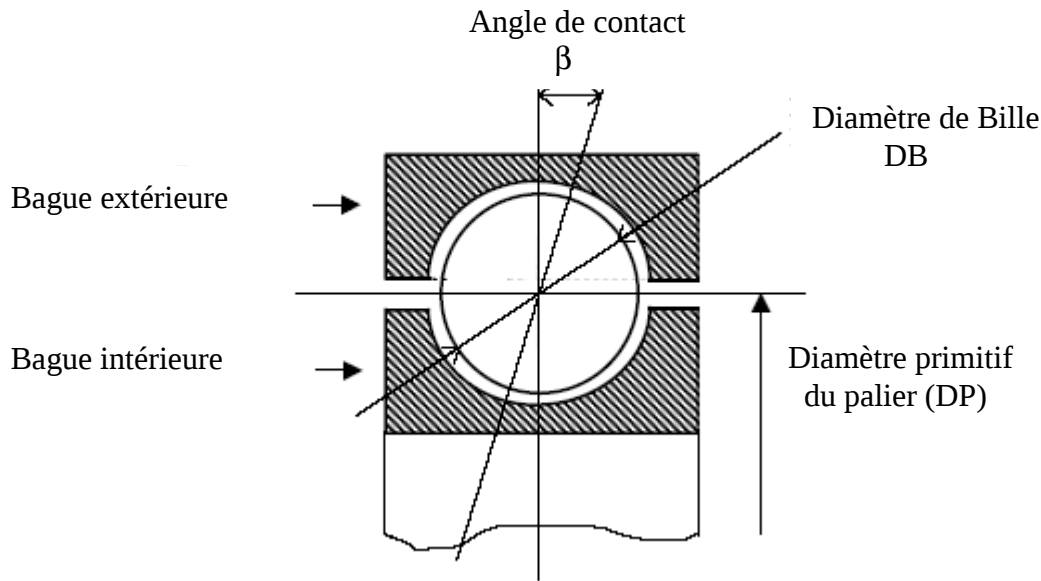


FIG.I.9 Les roulements à billes [Casimir, 03a]

Un défaut de roulement à billes se manifeste par la répartition continue du contact défectueux avec la cage du roulement extérieur ou intérieur. Les fréquences caractéristiques de ce défaut sont déduites des dimensions des paliers (DB et DP), comme le montre la figure (I.9), qui peuvent être définies comme suit [Lahcène, 05] [Onel, 05]

$$f_b = \frac{DP}{DB} f_r \left[ 1 - \left( \frac{DB}{DP} \cos \beta \right)^2 \right] \quad \text{I.11}$$

La fréquence de répétition sera pour la cage intérieure (CJ) comme pour celle extérieure (CE) décrite par :

$$f_{ext} = \frac{\eta_b}{2} f_r \left[ 1 + \frac{DB}{DP} \cos \beta \right] \quad \text{I.12}$$

$$f_{int} = \frac{\eta_b}{2} f_r \left[ 1 - \frac{DB}{DP} \cos \beta \right] \quad \text{I.13}$$

$f_r$  fréquence de rotation,

$\eta b$  nombre de billes,

#### **I.6.2.2.5.4 Défaut statorique**

Le stator est soumis à des contraintes électriques et mécaniques. Il présente essentiellement comme défaut la mise en court-circuit d'une ou plusieurs spires de son bobinage. Il existe plusieurs techniques pour détecter ces défauts [Bachir, 02]. A partir des études théoriques, il a été montré que le courant statorique possède un spectre enrichi par la création d'un court-circuit au stator, ce dernier fait augmenter les courants dans les autres phases malgré le fait que ces phases soient saines. Un court circuit de spires affecte bien l'ensemble des trois phases de la machine. Les fréquences à détecter sont données par la relation suivante :

$$f_{cc} = f_s (k \pm n(1 - g / p)) \quad \text{I.14}$$

Nous présentons dans les tableaux I.1, I.2 une synthèse des différents défauts au stator et au rotor de la machine asynchrone.

**I.7 Conclusion**

Ce chapitre, a été consacré à la représentation des différents défauts pouvant se produire sur la machine asynchrone. Dans un premier temps, après avoir rappelé succinctement les éléments de constitution de la machine asynchrone, nous nous sommes intéressés à répertorier les principales défaillances se produisant sur les différentes parties de la machine ainsi que les causes et les conséquences de leur apparition. Ensuite nous avons brièvement rappelé quelques techniques de diagnostic utilisées pour la détection des défauts. Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné.

# **Chapitre II**

## **Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

### **II.1 Introduction**

La machine asynchrone peut être modélisée selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés, nous pouvons citer :

- les modèles en grandeurs de phases, découlant des équations différentielles à coefficients périodiques régissant le fonctionnement de la machine, ils sont utilisés essentiellement pour l'étude des régimes permanents.
- les modèles issus de la transformation de Park, utilisés couramment pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des machines.
- Les modèles triphasés-triphasés.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à rotor bobiné, la méthode utilisée dans notre étude est la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (**CEMC**). Il s'agit de représenter les bobinages de la machine par des circuits électriques distribués dont les inductances propres et mutuelles sont calculées en utilisant les fonctions de bobinage issues des expressions analytiques du dimensionnement de la machine asynchrone [Casimir, 03b][Khatir,06]. Ce type de modélisation offre un bon compromis en termes de précision et de temps de calcul. De plus, elle permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, et les défauts de type rupture de barre rotorique [Didier, 01] [Razik ,03]. Nous présentons en premier lieu les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant le modèle de la machine. La simulation de modèle est alors fondée sur l'intégration numérique d'une représentation d'état continue de la machine qui nécessite l'expression analytique de l'ensemble des équations différentielles indépendantes régissant l'évolution de la machine et son alimentation, et de déterminer les valeurs numériques des paramètres du modèle [Schaeffer, 99a]. Dans notre cas, il s'agit des résistances et des inductances.

### **II.2 Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

Le moteur asynchrone est constitué de trois bobinages répartis au stator alimentés en triphasé par un système de tension, et de trois enroulements en court circuit au rotor. Le modèle de la machine est caractérisé par des paramètres électriques et mécaniques.

On modélise la machine asynchrone dans le repère a, b, c en émettant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

- L'entrefer est constant et les inductances propres sont des constantes et que les inductances mutuelles entre deux enroulements au stator et au rotor sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- L'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

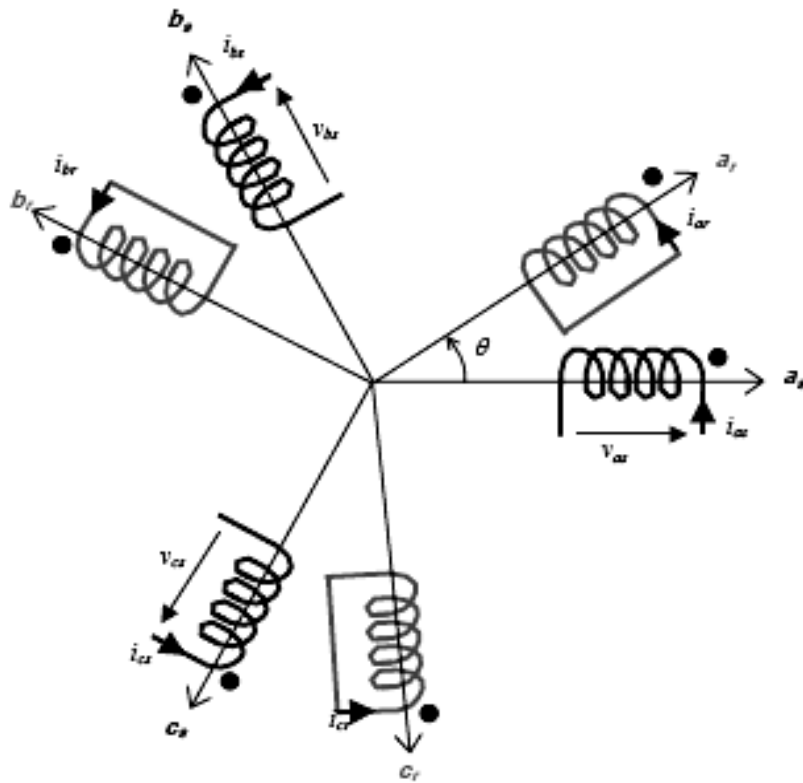


FIG.II.1 Représentation de la machine asynchrone triphasée

La figure (II.1) montre la représentation spatiale d'une machine asynchrone comprenant un enroulement triphasé au stator ( $a_s, b_s, c_s$ ) comme au rotor ( $a_r, b_r, c_r$ ). Le système d'alimentation en tension est sinusoïdal.

### II.3 Présentation du modèle

#### II.3.1 Equations électriques de la machine

Les équations au stator et au rotor sont données sous les formes matricielles condensées suivantes

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dt} \quad \text{II.1}$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad \text{II.2}$$

## **Chapitre II Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

Avec

$$\begin{bmatrix} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varphi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

$$\begin{bmatrix} V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

$$\begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

$[V_s], [V_r]$  vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

$[I_s], [I_r]$  vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

$[\varphi_s], [\varphi_r]$  vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

$[R_s], [R_r]$  matrices des résistances statoriques et rotoriques,

$R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$  résistance statorique de la phase  $a_s, b_s, c_s$ ,

$R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}$  résistance rotorique de la phase  $a_r, b_r, c_r$ ,

### **II.2.2 Expression du flux**

Les flux s'expriment en fonction des courants de la manière suivante :

$$[\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad \text{II.6}$$

$$[\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad \text{II.7}$$

L'isotropie et la symétrie de la machine font que les inductances propres des phases statoriques sont égales et de même pour celles du rotor

$$\begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad \text{II.8}$$

$[L_s], [L_r]$  matrices des inductances statoriques et rotoriques,

$L_s, L_r$  inductances propres statoriques et rotoriques,

$M_s$  inductance mutuelle entre phases statoriques,

$M_r$  inductance mutuelle entre phases rotoriques,

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor. Elle est définie comme étant

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

II.9

$M_{sr}$  Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

### II.3.3 Expression du couple électromagnétique

Le calcul du couple électromagnétique est déterminé à partir de la dérivée de la coénergie magnétique par rapport à  $\theta$  donnée par l'équation

$$w_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad \text{II.10}$$

$\theta$  représente la position du rotor par rapport au stator.

$$C_{em} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad \text{II.11}$$

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta} [I] \quad \text{II.12}$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} & i_{ra} & i_{rb} & i_{rc} \end{bmatrix} \text{ Vecteur courant}$$

### II.3.4 Equation mécanique

L'équation mécanique qui régit le fonctionnement de la machine peut se mettre sous la forme suivante

$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad \text{II.13}$$

$$\Omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{II.14}$$

$C_r$  couple résistant extérieur,

$J$  moment d'inertie,

$\Omega_r$  vitesse angulaire mécanique du rotor,

$\omega$  pulsation mécanique,

$f$  coefficient de frottement,

### II.3.5 Etablissement du modèle d'état

En remplaçant les équations II.6 et II.7 dans les équations électriques de la machine (II.1) et (II.2), nous obtenons

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \} \quad \text{II.15}$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \} \quad \text{II.16}$$

$$\text{Car } \varphi = [L][I]$$

En posant  $[V] = [[V_s], [V_r]]^T$  et en sachant que le vecteur  $[V_r]$  est nul, nous obtenons l'équation électrique de la machine

$$[V] = [R][I] + \frac{d([L][I])}{dt} \quad \text{II.17}$$

$$[V] = [R][I] + [I] \frac{d([L])}{dt} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad \text{II.18}$$

$$[V] = [R][I] + [I] \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad \text{II.19}$$

$$[V] = [R][I] + [I] \Omega_r \cdot \frac{d([L])}{d\theta} + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad \text{II.20}$$

## **Chapitre II Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

En associant l'équation mécanique II.13 et celle du couple II .12, nous obtenons le modèle d'état suivant

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( [R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{I}] \\ \dot{\Omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

II.21

Une forme condensée est obtenue sous l'écriture suivante :

$$[U] = [B].[X] + [A] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} \quad \text{II.22}$$

Le vecteur  $\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix}$  peut s'écrire

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} = [A]^{-1} . ([U] - [B].[X]) \quad \text{II.23}$$

Où  $[U]$  est le vecteur de commande qui a pour expression :

$$[U] = ([V].[-C_r].[0])^T \quad \text{II.24}$$

Et le vecteur d'état  $[X]$  est donné par

$$[X] = ([I].[ \Omega_r ].[\theta])^T \quad \text{II.25}$$

La matrice  $[A]$  obtenue s'écrit sous la forme

$$[A] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & 0 & 0 \\ [M_{rs}] & [L_r] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{II.26}$$

La matrice  $[A]$  est dépendante de l'angle rotorique et il nous faudra l'actualiser pour ensuite l'inverser à chaque pas de calcul lors de la simulation. Les diverses matrices constituant la matrice  $[A]$  sont définies précédemment

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_3 & f_1 & f_2 \\ f_2 & f_3 & f_1 \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

$$f_1 = \cos(p.\theta),$$

$$f_2 = \cos\left(p.\theta + \frac{2.\pi}{3}\right),$$

$$f_3 = \cos\left(p.\theta - \frac{2.\pi}{3}\right),$$

$p$  nombre de paires de pôles,

En considérant le cas où le stator et le rotor ont le même nombre de spires en série par phase, que les bobinages sont identiques et que le moteur asynchrone est connecté en étoile au réseau électrique ; on obtient alors

$$M_s = -\frac{1}{2}.L_s = M_r = -\frac{1}{2}.L_r \quad \text{II.28}$$

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad \text{Et} \quad i_{ar} + i_{br} + i_{cr} = 0 \quad \text{II.29}$$

En introduisant l'inductance cyclique  $L_{sc} = 3/2L_{s,r}$ , la matrice inductance  $[L]$  de la machine asynchrone peut se réécrire sous la forme suivante

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{sc} & 0 & 0 & M_{sr}.f_1 & M_{sr}.f_2 & M_{sr}.f_3 \\ 0 & L_{sc} & 0 & M_{sr}.f_3 & M_{sr}.f_1 & M_{sr}.f_2 \\ 0 & 0 & L_{sc} & M_{sr}.f_2 & M_{sr}.f_3 & M_{sr}.f_1 \\ M_{sr}.f_1 & M_{sr}.f_3 & M_{sr}.f_2 & L_{rc} & 0 & 0 \\ M_{sr}.f_2 & M_{sr}.f_1 & M_{sr}.f_3 & 0 & L_{rc} & 0 \\ M_{sr}.f_3 & M_{sr}.f_2 & M_{sr}.f_1 & 0 & 0 & L_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

La matrice  $[B]$  est donnée sous la forme

$$[B] = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta}\right] & 0 & 0 \\ \left[\Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{d\theta}\right] & [R_r] & 0 & 0 \\ C_1 \dots\dots\dots & C_6 & f_v & 0 \\ 0 \dots\dots\dots & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{II.31}$$

$$[R_s] = R_s.[II], [R_r] = R_r.[II]$$

## **Chapitre II Modélisation triphasée-triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné**

Où  $[I]$  représente la matrice identité. Les deux matrices intervenant dans l'expression de  $[B]$  sont :

$$\left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] = \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{dt} \right]^T = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_3 & g_1 & g_2 \\ g_2 & g_3 & g_1 \end{bmatrix} \quad \text{II.32}$$

Avec

$$g_1 = \Omega_r \cdot p \cdot \sin(p\theta),$$

$$g_2 = \Omega_r \cdot p \cdot \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$g_3 = \Omega_r \cdot p \cdot \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

Les éléments  $C_{1,...,6}$  contenus dans la matrice B sont obtenus à partir de l'équation du couple et de l'équation mécanique

$$C_1 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{sa} \cdot h_1 + i_{sb} \cdot h_2 + i_{sc} \cdot h_3)$$

$$C_2 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{sa} \cdot h_3 + i_{sb} \cdot h_1 + i_{sc} \cdot h_2)$$

$$C_3 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{sa} \cdot h_2 + i_{sb} \cdot h_3 + i_{sc} \cdot h_1)$$

$$C_4 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{ra} \cdot h_1 + i_{rb} \cdot h_3 + i_{rc} \cdot h_2)$$

$$C_5 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{ra} \cdot h_2 + i_{rb} \cdot h_1 + i_{rc} \cdot h_3)$$

$$C_6 = 0.5 \cdot M_{sr} \cdot p \cdot (i_{ra} \cdot h_3 + i_{rb} \cdot h_2 + i_{rc} \cdot h_1)$$

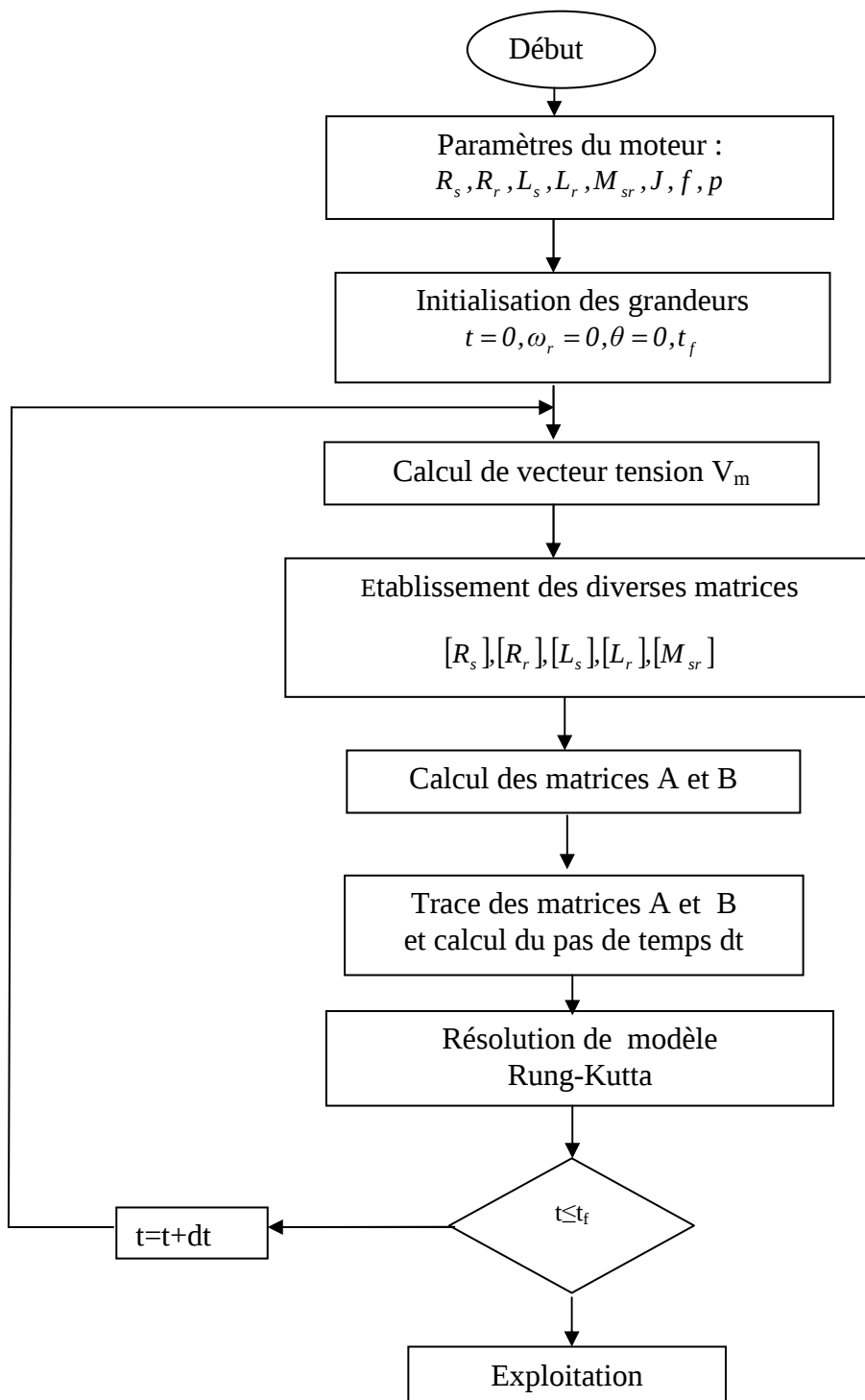
$$h_1 = \sin(p\theta),$$

$$h_2 = \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$h_3 = \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

### **II.4 Validation du modèle triphasé-triphasé de la machine**

Après avoir décrit le modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné, un programme écrit sous l'environnement **Matlab** nous a permis de mettre en évidence le comportement de la machine. Pour la résolution du système différentiel nous avons utilisé la méthode Rung-kutta selon l'organigramme illustré dans la figure (II.2). Les paramètres de la machine utilisée sont donnés dans l'annexe A



FIGII.2 Organigramme

**II.4.1 Résultats de simulation de la machine asynchrone en régime sain**

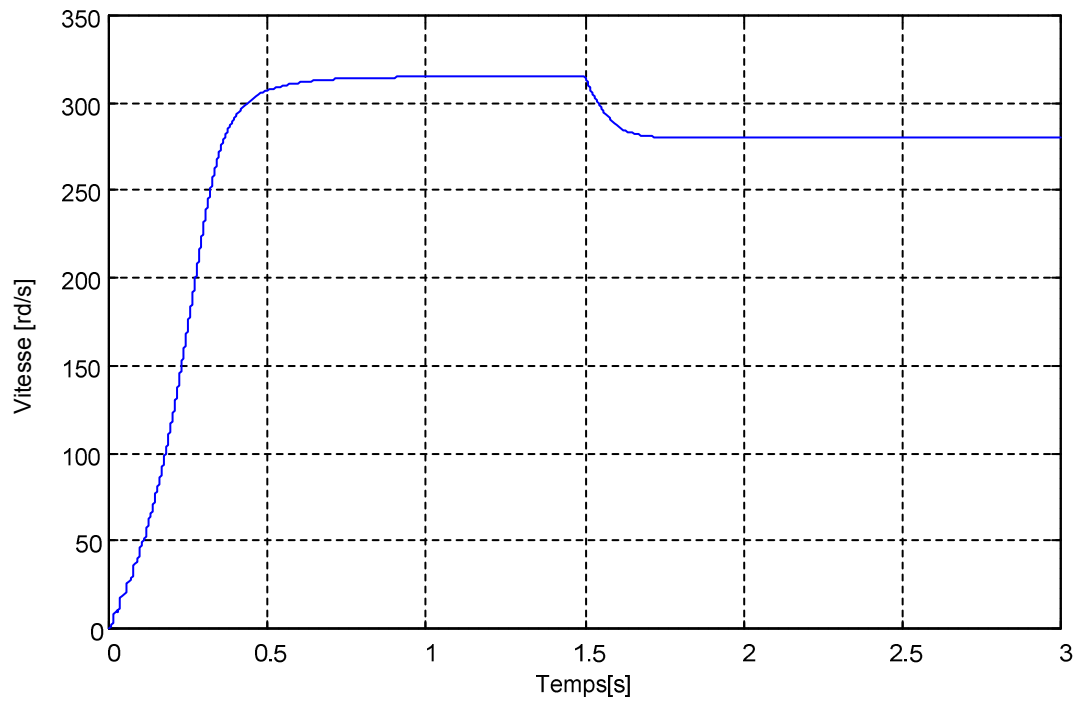


FIG.II.3 *Evolution de la vitesse de rotation*

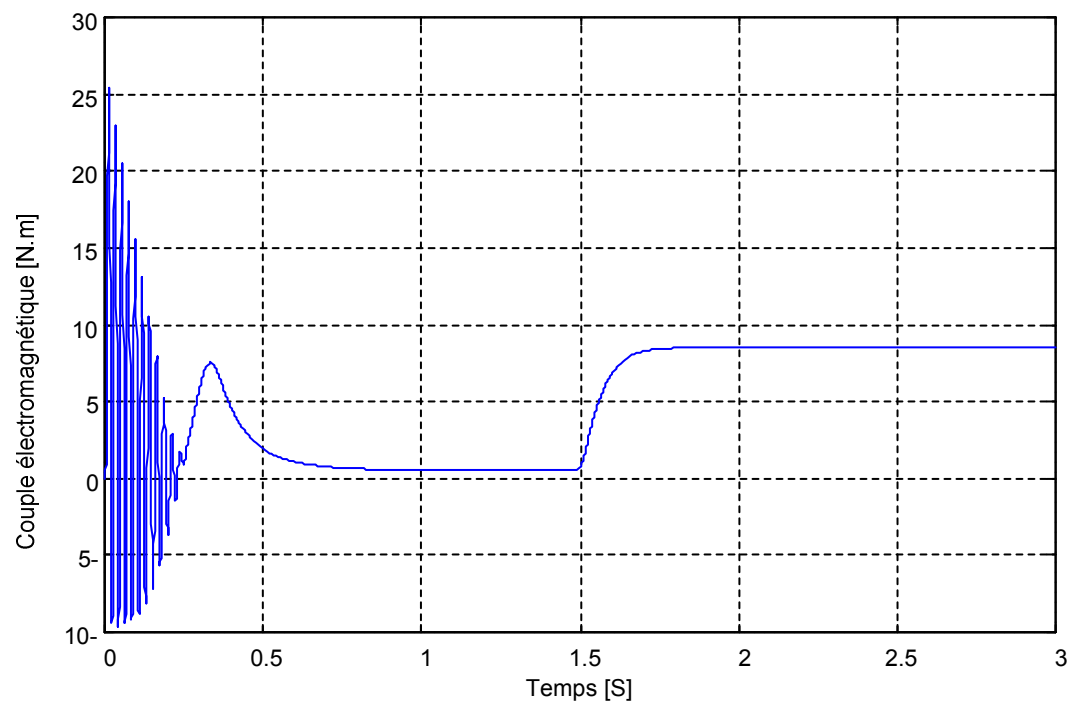


FIG II.4 *Evolution du couple électromagnétique*

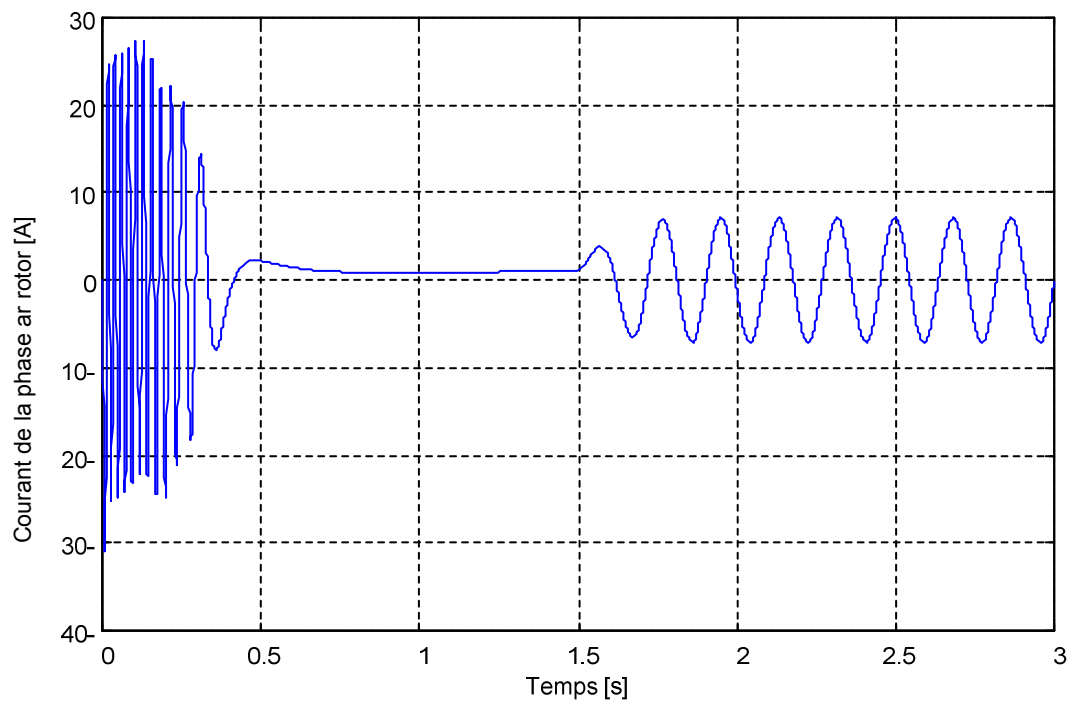


FIG.II.5 Evolution du courant dans la phase  $a_r$  du rotor

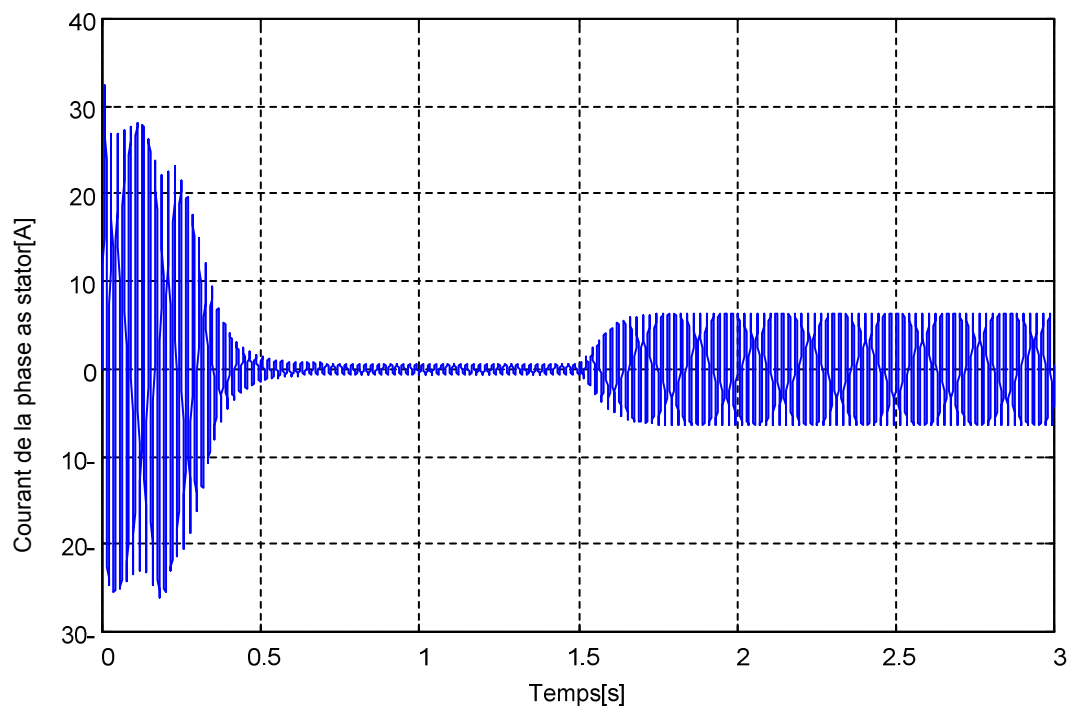


FIG.II.6 Evolution du courant dans la phase  $a_s$  du stator

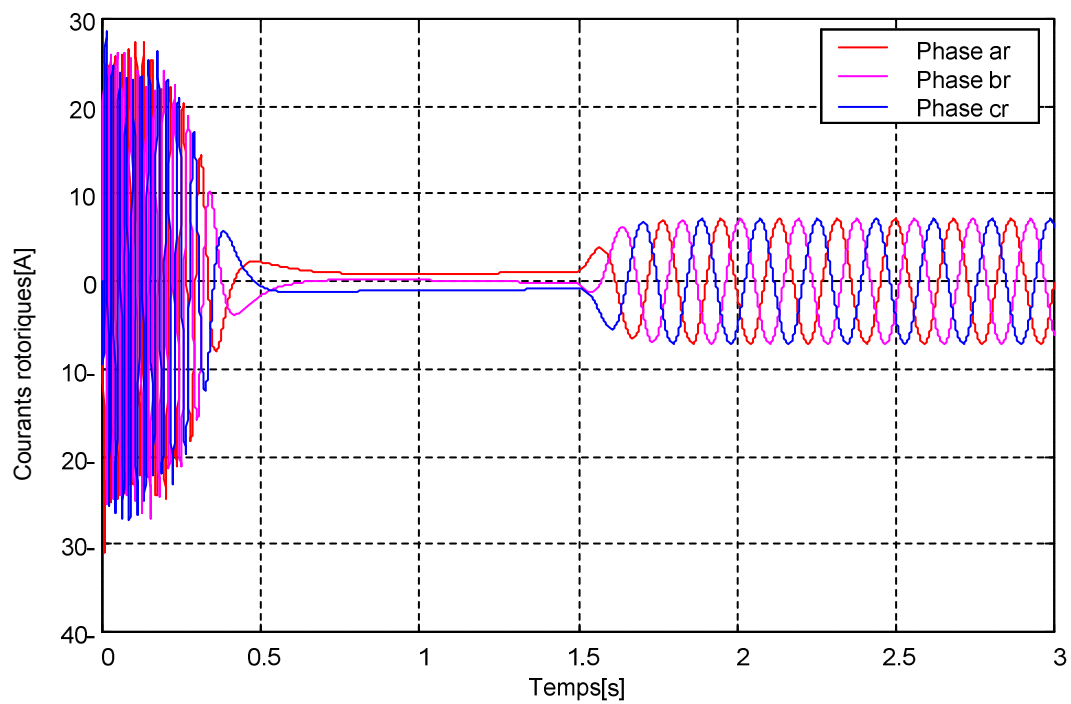


FIG II.7 *Courants dans les trois phases du rotor*

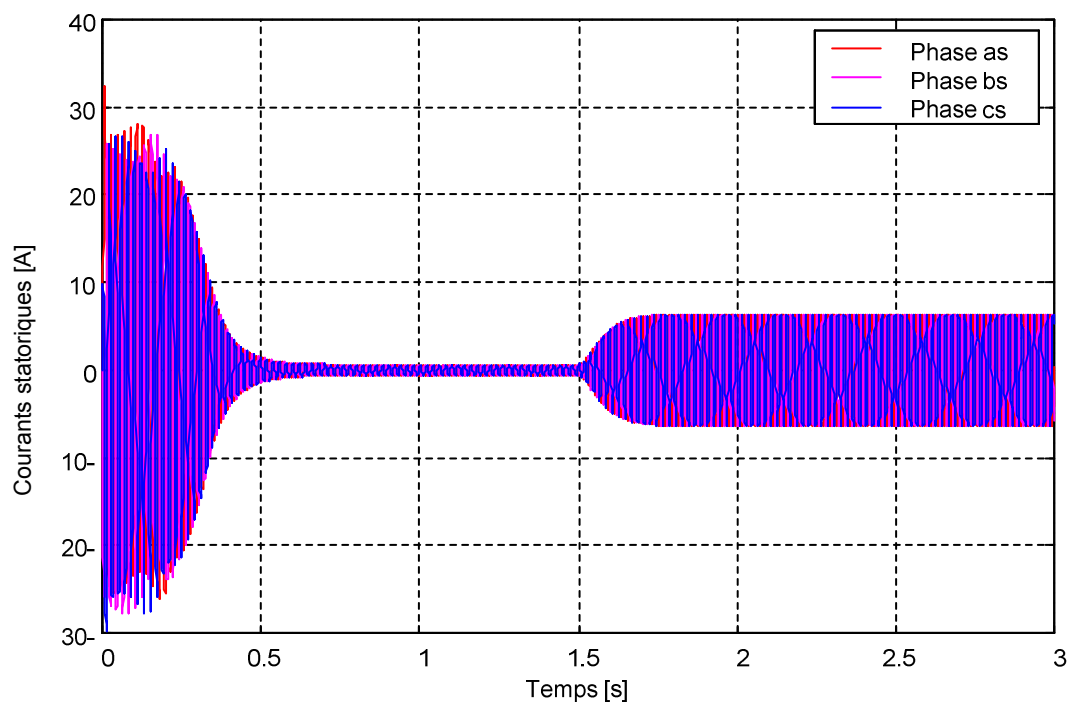


FIG.II.8 *Courants dans les trois phases du stator*

### **II.4.2 Interprétation des résultats de simulation**

La simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par des tensions sinusoïdales, nous a permis d'observer le comportement de celle-ci. Les courbes présentées sur les figures (II.3, II.4, II.5, II.6) détaillent respectivement l'évolution de la vitesse, du couple électromagnétique, et de courant.

La figure II.6 représente l'évolution de la vitesse de rotation de la machine. Nous remarquons que la montée en vitesse est linéaire au début du démarrage, qui, en régime permanent, se stabilise à 314 rad/s, puisque la machine possède une paire de pôles. A l'application du couple résistant  $C_r=10$  [N.m] à l'instant  $t=1.5$  seconde, la vitesse décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise à une certaine valeur inférieure à la vitesse de synchronisme.

Le couple électromagnétique est représenté par la figure II.4. Au démarrage, le couple est fortement pulsatoire, il atteint une valeur maximale de 25 N.m, ceci explique le bruit engendré par la partie mécanique. Après disparition du régime transitoire, le couple tend vers une valeur, cette valeur représente le couple de frottement. En charge, la machine développe un couple électromagnétique qui augmente brusquement pour atteindre la valeur  $C_{em}=8.5$  N.m.

La figure II.7 représente l'évolution des courants rotoriques. Nous remarquons qu'au démarrage, les courants oscillent autour d'une valeur de 30A, ce qui illustre le régime transitoire. En régime permanent, les courants chutent vers une valeur presque nulle, cela est dû au fait que la vitesse du rotor s'approche de celle du champ tournant statorique (vitesse de synchronisme). Lors de l'application du couple résistant, des ondulations sont apparues et oscillent autour d'une valeur efficace de 7A.

### **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en régime sain, dit modèle triphasé-triphasé. Ce modèle consiste à modéliser les trois phases statoriques ce qui permet de différencier le comportement de chaque phase. Les enroulements rotoriques sont représentés par trois phases également. Cette modélisation consiste à la résolution numérique du système d'équation différentielle, en utilisant la méthode Rung –Kutta d'ordre quatre. Un programme écrit sous logiciel **Matlab** nous a permis

d'analyser le comportement de la machine en régime sain. La particularité de ce modèle réside dans l'utilisation des paramètres réels de la machine sans passer par la transformation de Park ce qui permet de discriminer un comportement défectueux d'un comportement dû à un fonctionnement normal de la machine. Les résultats de simulation obtenus traduisent bien le comportement connu du fonctionnement de la machine. La modélisation de la machine en présence de défaut de court-circuit inter-spires fera l'objet du chapitre suivant.

# **Chapitre III**

## **Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence des défauts**

### **II.1 Introduction**

Malgré les qualités des machines asynchrones, elles peuvent parfois présenter au stator et / ou rotor différents types de défauts provoquant un vieillissement prématuré. La recherche des signatures ou indicateurs de ces défauts a pour but de caractériser le fonctionnement de la machine en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts, ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalie survenant aux différents niveaux de la machine [Casimir,03a]. Dans le cadre du diagnostic de la machine, les objectifs d'un modèle sont cependant différents, ce qui a motivé la mise au point de nouveaux modèles spécifiquement dédiés à la simulation des défauts [Sheaffer, 99a]. L'objectif de cette partie est l'élaboration d'un modèle de simulation de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence de défaut de court-circuit entre-spices sur la même phase du stator, ce défaut peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines (croisement des faisceaux) soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution de nombre de spires de la bobine.

### **III.2 Influence d'un court circuit sur les courants de ligne**

Lorsqu'un court circuit entre spires apparaît, l'application du théorème d'Ampère montre qu'il se crée en plus du champ principal, une excitation magnétique de pulsation  $\omega_s$  due au nouveau bobinage court-circuité parcouru par un courant dit de court-circuit [Tnani, 02]. C'est l'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique qui crée les ondulations du couple et qui induit au stator des forces magnétomotrices de fréquence  $2.f_s$ , d'où des courants statoriques comportant ces composantes. Ces courants circulant dans les circuits magnétiques et en présence de défaut induisent, par conséquent, des courants de fréquence  $3.f_s$  selon le même processus. Ainsi des composantes aux fréquences  $k.f_s$  (ou  $k$  est un entier positif) se retrouvent dans les courants statoriques [Bachir, 02][Scheaffer, 99a]. Pour le cas d'une machine saine à  $p$  paires de pôles, lorsque les trois bobinages statoriques sont parcourus par un système sinusoïdal de tension de pulsation  $\omega_s = 2\pi.f_s$ , il se crée alors trois excitations magnétiques stationnaires dirigées selon l'axe de chaque phase. C'est la somme de ces excitations qui crée un champ tournant dans l'entrefer proportionnel à l'amplitude des courants et dont l'expression au point M repéré par un angle  $\theta$  est donnée

$$H(\theta, t) = H_a(\theta, t) + H_b(\theta, t) + H_c(\theta, t) = \frac{3}{2} H_m \cos(\omega_s t - p\theta) \quad \text{III.1}$$

Il s'agit d'une onde sinusoïdale progressive d'amplitude constante de  $p$  période sur un tour complet, tournant à  $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$  par rapport au bobinage triphasé qui le crée. Le flux généré balaye les bobinages rotoriques, ce qui provoque la rotation de l'arbre du moteur. La vitesse augmente et atteint une vitesse  $\Omega_r$  inférieure à la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ . Les enroulements rotoriques sont alors balayés par le flux à la vitesse de glissement  $\Omega_s - \Omega_r = g\Omega_s$ . A la suite d'un court circuit, apparaissent des vibrations et des oscillations de couple synonymes à la 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 du stator traversé par un fort courant, il en résulte un champ magnétique additionnel dans la machine de fréquence  $\pm f_s$  (ou  $f_s$  est la fréquence de synchronisme). Ces composantes entraînent des harmoniques de fréquences  $k.f_s$  dans les courants absorbés.

#### **III.3 Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné avec défaut de court-circuit**

Le stator et le rotor sont toujours constitués de trois phases identiques parcourues par des courants triphasés. Pour prendre en compte l'existence de spires en court circuit au stator de la machine asynchrone, on introduit une bobine supplémentaire dite de court-circuit dont le nombre de spires  $\eta_{cc}$  est égale au nombre de spires en défaut dans la machine. Ainsi, en présence d'un déséquilibre statorique, la machine comporte, en plus des bobinages triphasés statoriques d'axes  $a_s, b_s, c_s$  et rotoriques d'axes  $a_r, b_r, c_r$ , un bobinage court-circuité  $B_{cc}$  parcouru par un courant de court-circuit à l'origine du champ stationnaire  $H_{cc}$  par rapport au stator, créé en situation de défaut. (FIG.III.1).

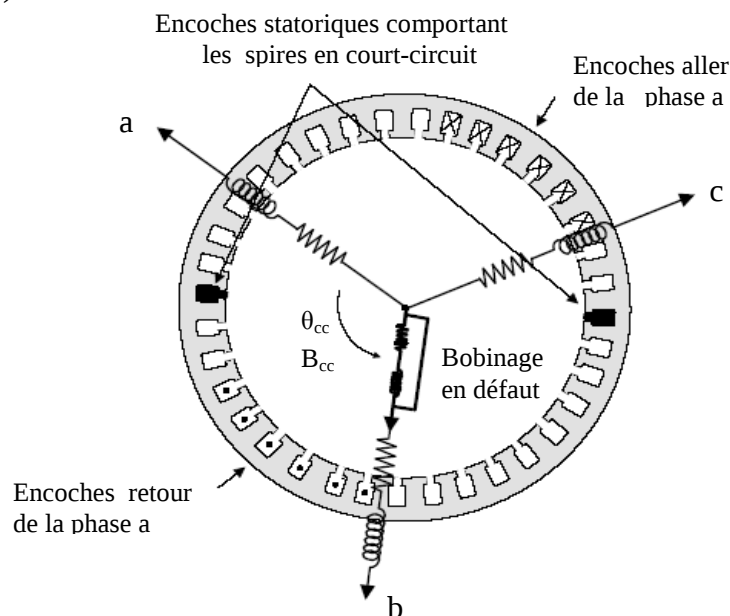


FIG.III.1 Court circuit de la phase b du stator [Bachir,02]

On constate que le défaut fait apparaître dans la machine un nouveau bobinage  $B_{cc}$ . Afin de définir ce défaut, il est nécessaire d'introduire deux paramètres :

- L'angle électrique, noté  $\theta_{cc}$ , repérant le bobinage en court-circuit par rapport à l'axe de référence de la phase  $a_s$ . Ce paramètre permet la localisation du bobinage en défaut et ne peut prendre que les trois valeurs

$$\theta_{cc} = \begin{cases} 0 & \text{phase } a \\ \frac{2\pi}{3} & \text{phase } b \\ -\frac{2\pi}{3} & \text{phase } c \end{cases} \quad \text{III.2}$$

- Le rapport de court-circuit noté  $\eta_{cc}$  égal au rapport du nombre de spires en court-circuit sur le nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut.

$$\eta_{cc} = \frac{n_{cc}}{n_s} \quad \text{III.3}$$

### III.3 .1 Modélisation dans le repère triphasé

Les équations électriques des trois phases statoriques et rotoriques servent de point de départ à l'élaboration du modèle dynamique de la machine asynchrone, en faisant l'hypothèse de la linéarité. Cette situation est donc équivalente à un fonctionnement commun produisant un champ tournant, et d'un fonctionnement différentiel à l'origine d'un champ supplémentaire orienté selon l'axe de la bobine en défaut FIG.III.2

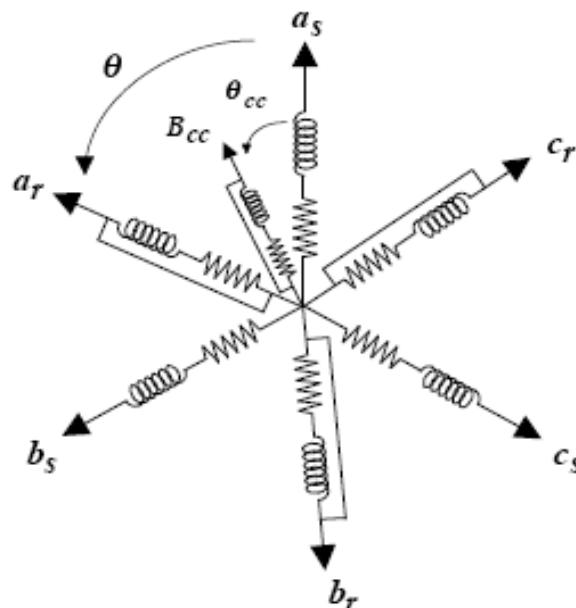


FIG.III.2 Enroulements triphasés avec spires en court-circuit

### **Chapitre III Modèle de la machine asynchrone à rotor bobiné en présence des défauts**

Les équations de tension et de flux de la machine asynchrone en défaut de court-circuit s'écrivent alors

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad \text{III.4}$$

$$0 = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad \text{III.5}$$

$$0 = R_{cc}i_{cc} + \frac{d\phi_{cc}}{dt} \quad \text{III.6}$$

$$[\varphi_s] = \{[L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r]\} + [M_{scc}]i_{cc} \quad \text{III.7}$$

$$[\varphi_r] = \{[L_r][I_r] + [M_{sr}][I_s]\} + [M_{rcc}]i_{cc} \quad \text{III.8}$$

Les matrices  $[L_s]$ ,  $[L_r]$ ,  $[M_{sr}]$  sont définies dans le chapitre II

La résistance  $R_s$  est proportionnelle au nombre de spires, la résistance  $R_{cc}$  de bobinage  $B_{cc}$  est donnée en fonction de la résistance  $R_s$  des trois phases statoriques sans défaillances [Seheaffer, 99a] :

$$R_{cc} = \eta_{cc} R_s \quad \text{III.9}$$

Le circuit magnétique emprunté par les lignes de champ coupant la bobine  $B_{cc}$  en court-circuit est identique à celui emprunté par les lignes de champ coupant la phase statorique en défaut. Les différentes inductances de la bobine  $B_{cc}$  par rapport aux phases statoriques et rotoriques de la machine sont données par les relations suivantes [Bachir,02]:

$$[M_{scc}] = \eta_{cc} L_s \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc}) & \cos\left(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III.10}$$

$$[M_{rcc}] = \eta_{cc} L_s \begin{bmatrix} \cos(\theta_{cc} - \theta) & \cos\left(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III.11}$$

$$[MM_{ccr}] = \eta_{cc} \cdot L_s \cdot \Omega_r \cdot p \begin{bmatrix} \sin(\theta_{cc} - \theta) & \sin\left(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{III.12}$$

$$[MM_{ccr}] = [MM_{rcc}]^T$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T$$

$$[M_{rcc}] = [M_{ccr}]^T$$

$M_{scc}$  (respectivement  $M_{rcc}$ ) : inductances mutuelles statoriques (respectivement rotoriques), de bobinage en court-circuit.

### III.3.2 Représentation d'état du modèle de défaut

Dans le cas où la machine présente un défaut de court-circuit entre-spires, le système donné par l'équation II.19 s'écrit comme suit

$$\begin{bmatrix} V \\ u_{cc} \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [M_{cs}] & 0 & 0 \\ [M_{rs}] & [L_r] & [M_{cr}] & 0 & 0 \\ [M_{sc}] & [M_{rc}] & L_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I} \\ 0 \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_s] & \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{dt} \right] & 0 & 0 & 0 \\ \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{dt} \right] & [R_r] & MM_{rc} & 0 & 0 \\ 0 & MM_{cr} & R_{cc} & 0 & 0 \\ C_1 \dots\dots & C_g & 0 & f_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ i_{cc} \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \quad \text{III.13}$$

Les matrices  $[R_s], [R_r], [L_s], [L_r], [M_{sr}]$  sont définies au chapitre II

Le modèle de la machine asynchrone en présence de défaut de court-circuit est maintenant connu, nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles telles que les courants, le couple ou encore la vitesse rotorique.

### III.4 Résultats de simulation

#### III.4.1 Validation du modèle de la machine asynchrone en présence de défaut de 30% de spires en court-circuit

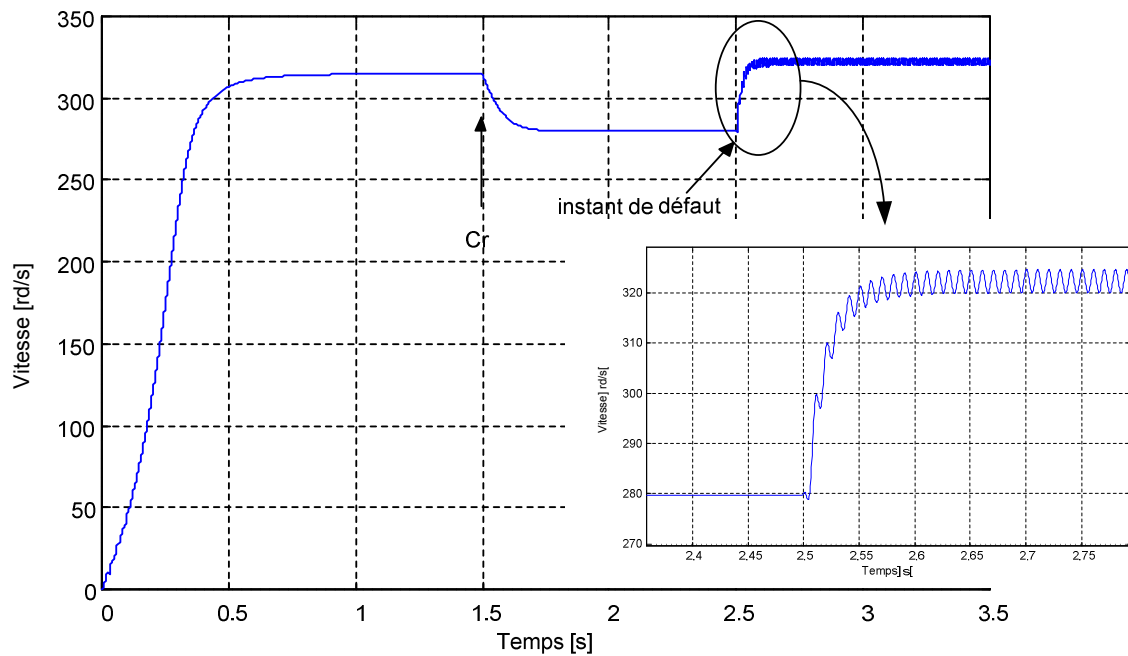


FIG III.3 Vitesse de rotation

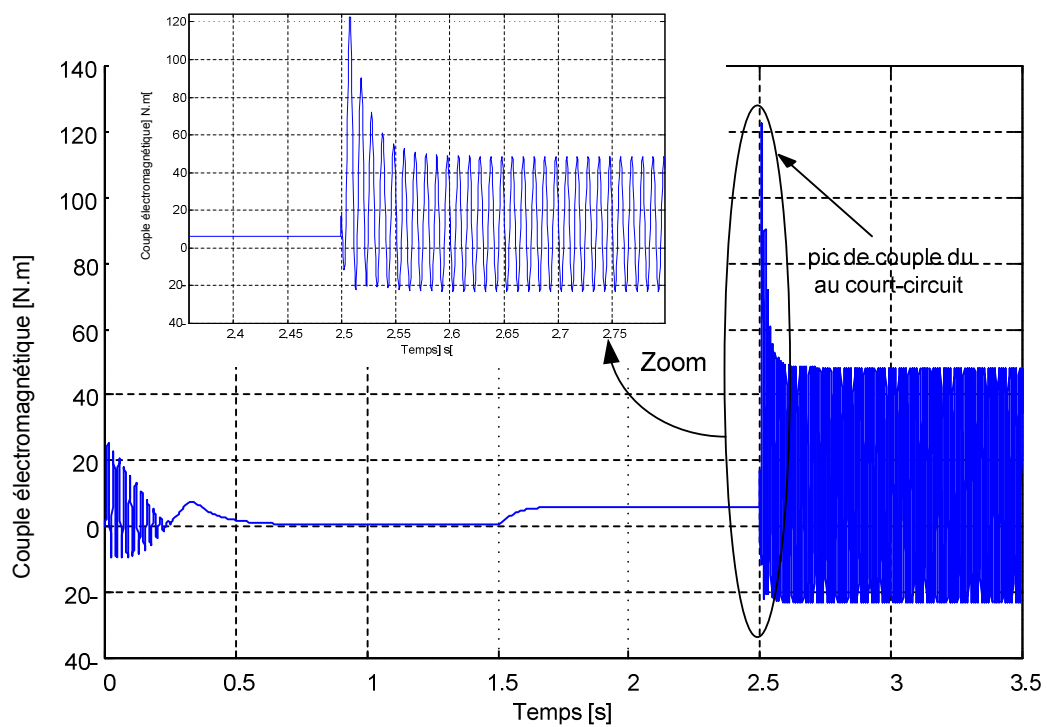


FIG III.4 couple électromagnétique

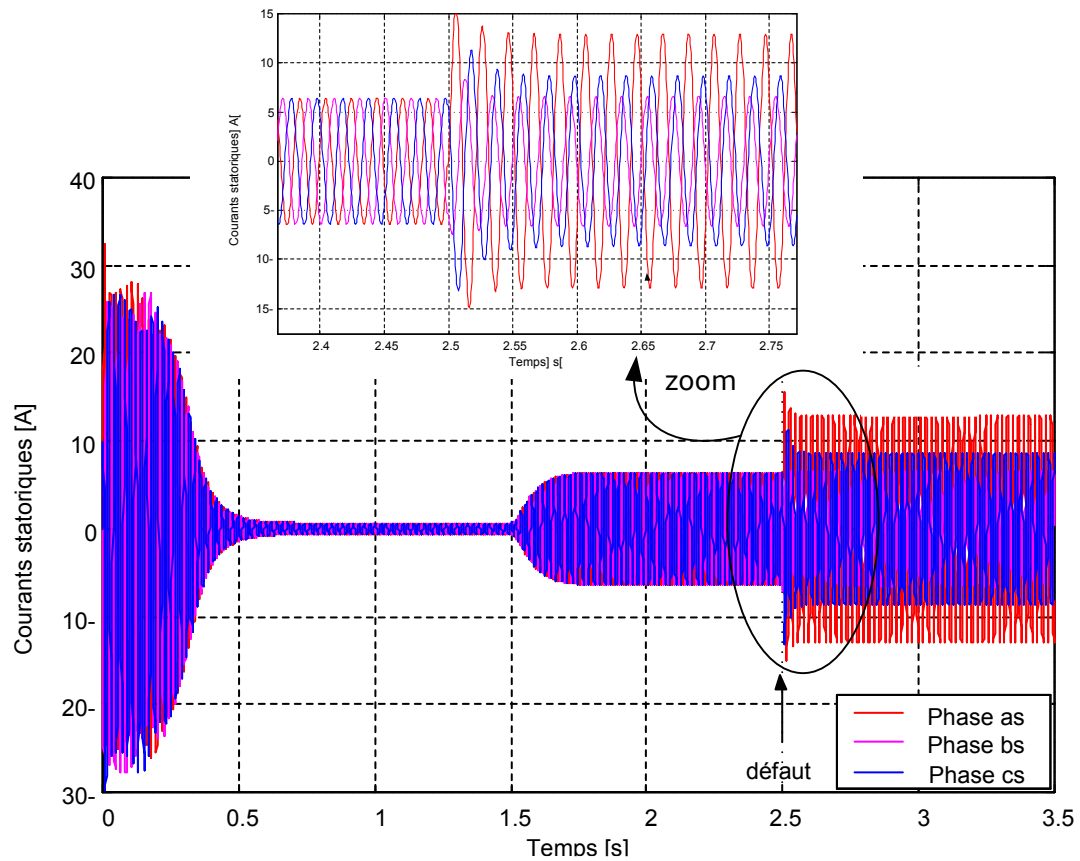


FIG .III.5 *Courant statoriques*

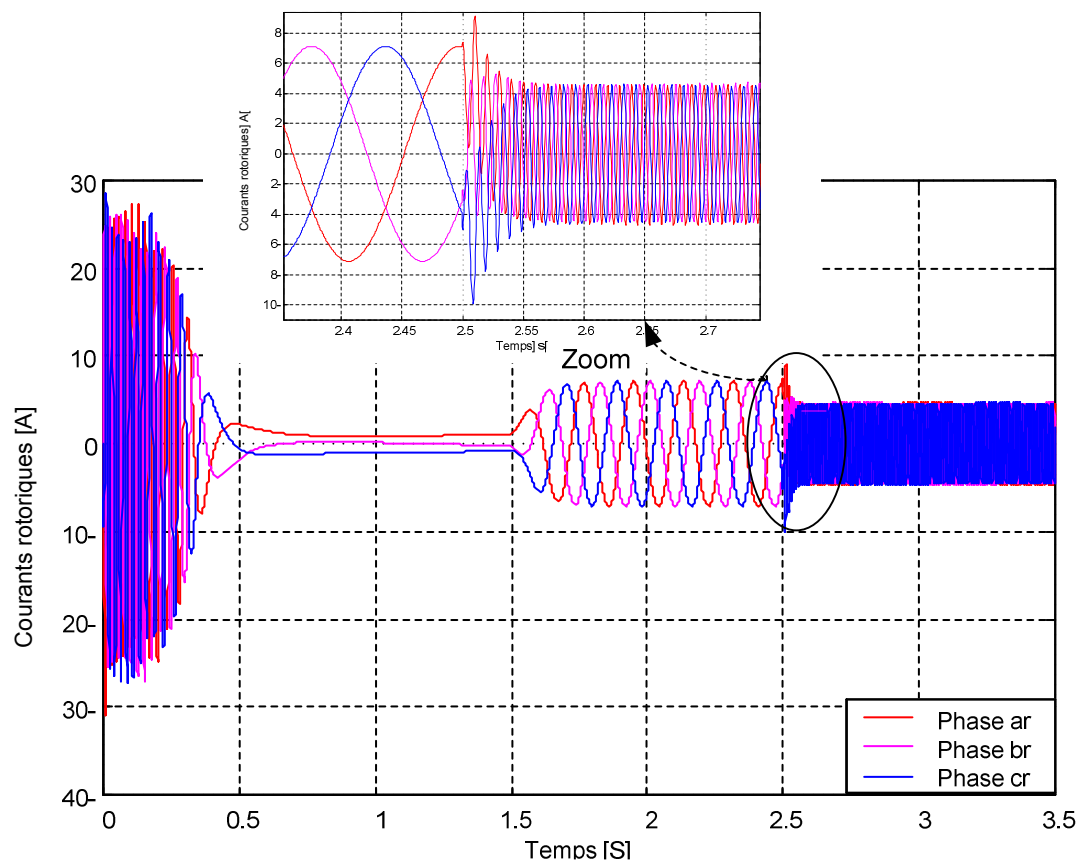


FIG .III.6 *Courants rotoriques*

**III.4.2 Validation du modèle de la machine asynchrone en présence de défaut de 35% de spires en court –circuit**

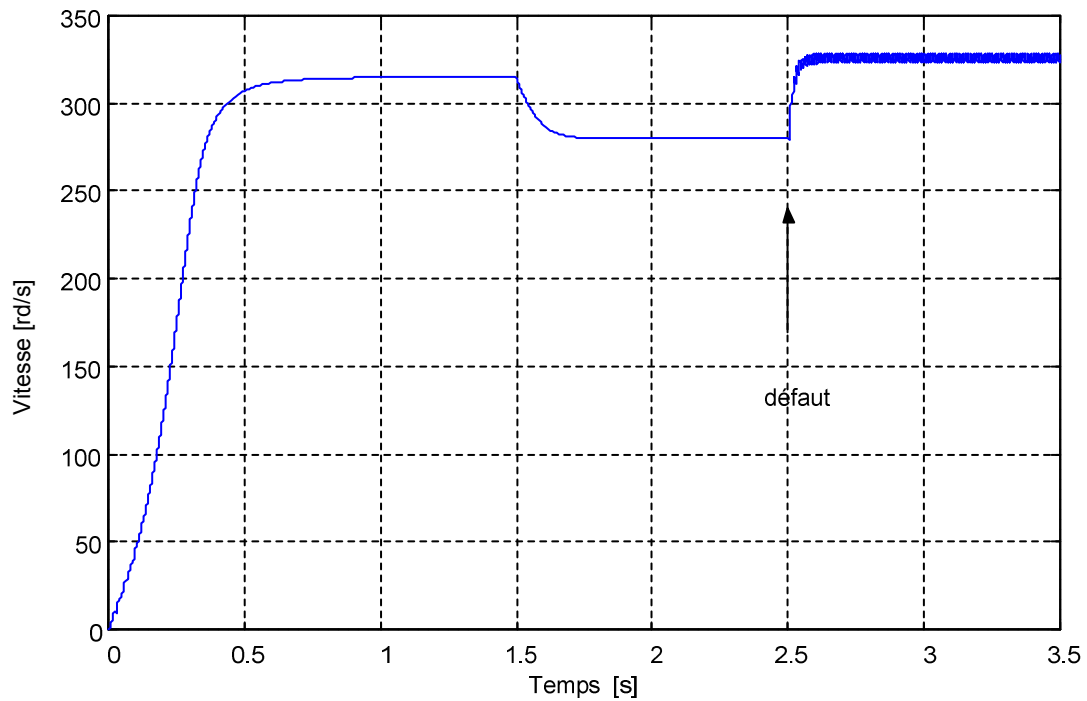


FIG .III.7 *Vitesse de rotation*

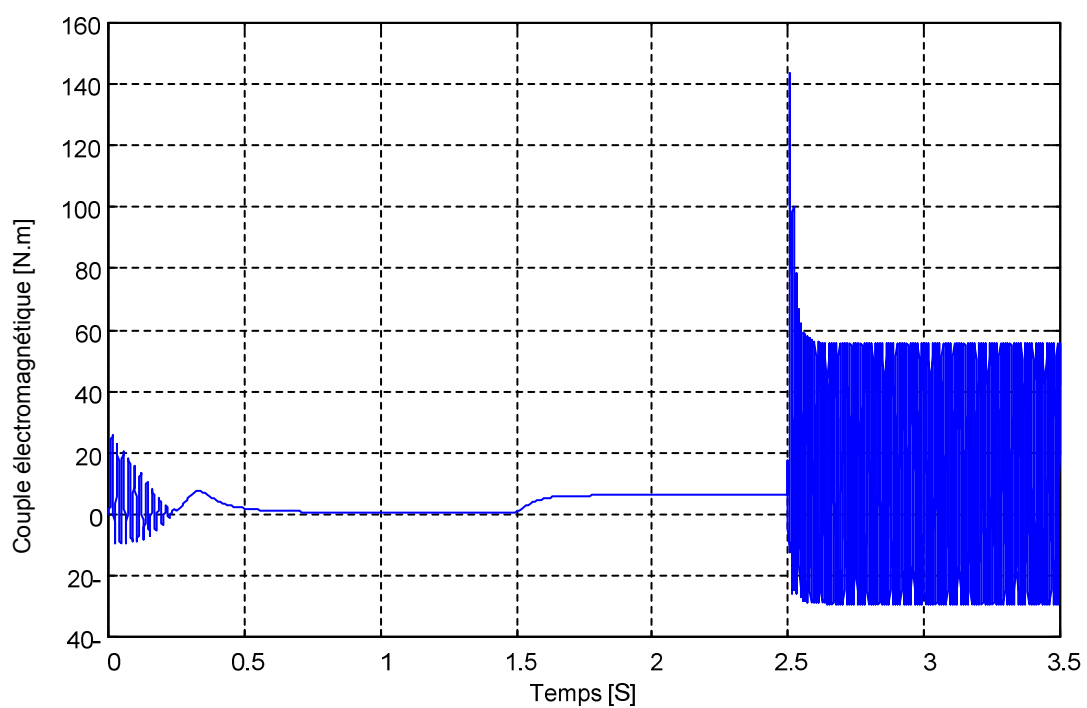


FIG .III.8 *Couple électromagnétique*

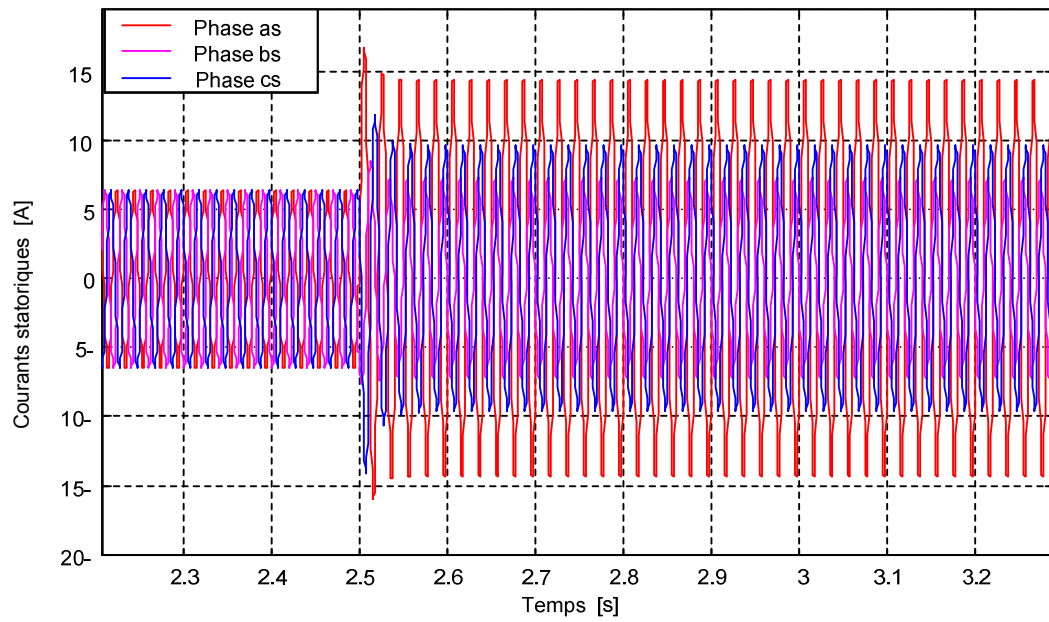


FIG .III.9 *Courants statoriques*

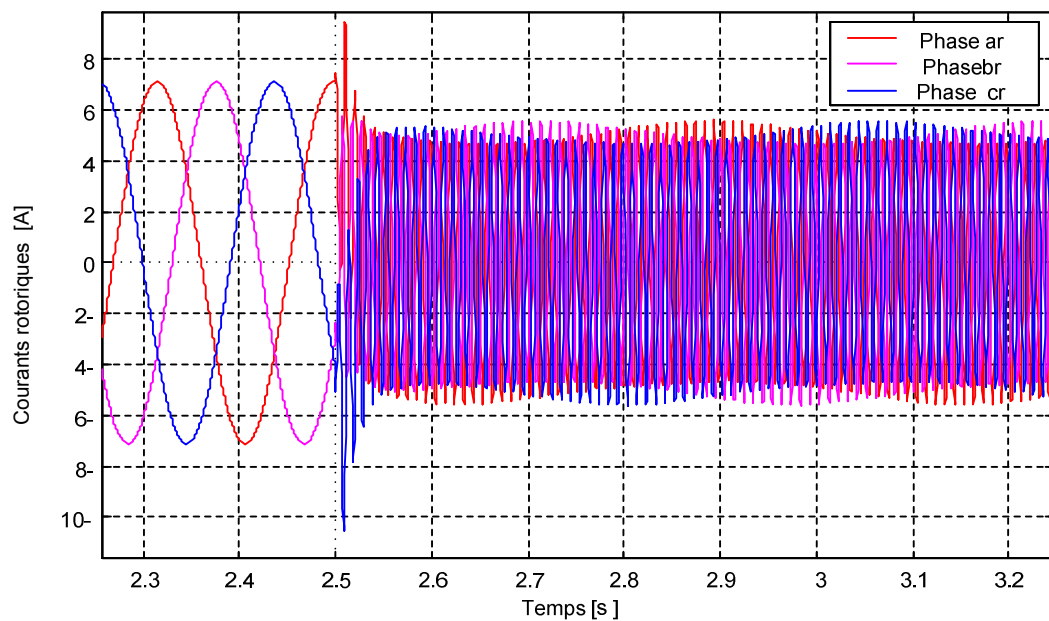


FIG .III.10 *Courants rotoriques*

**III.4.3 Validation du modèle de la machine asynchrone en présence de défaut de 40 % de spires en court-circuit**

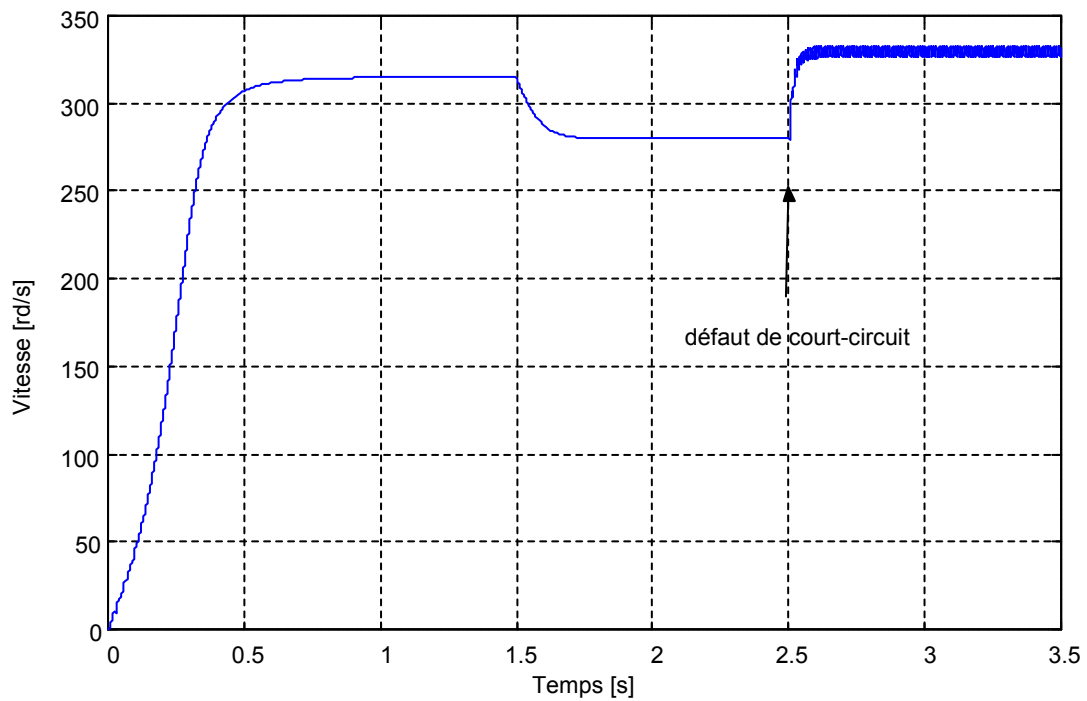


FIG .III.11 *Vitesse de rotation*

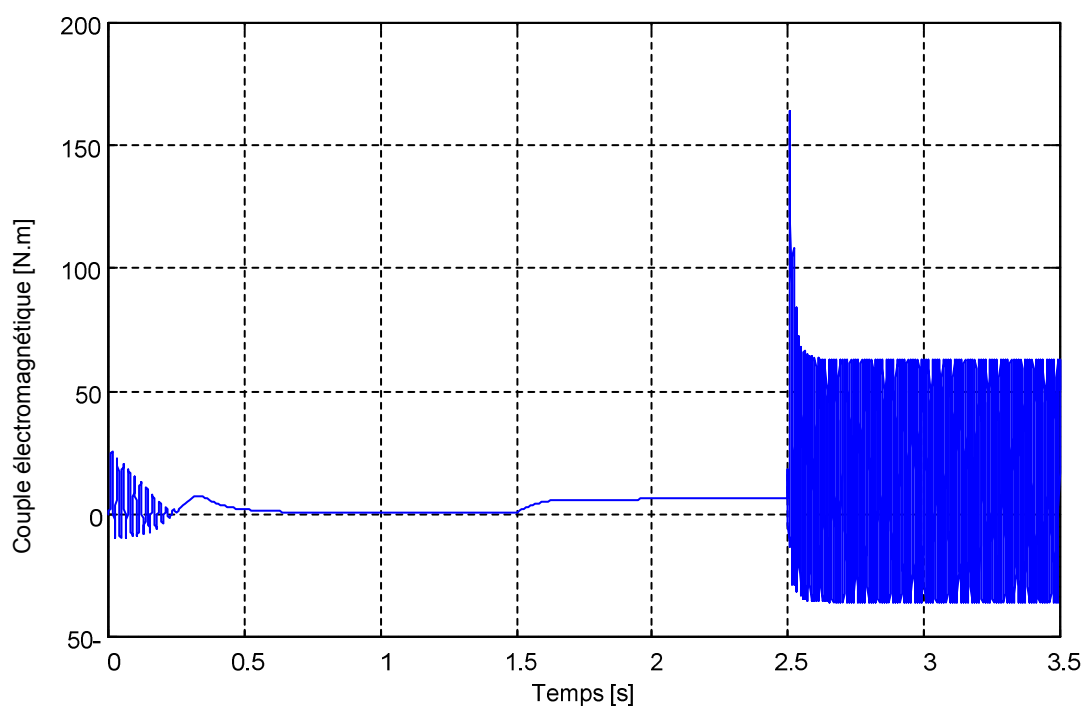


FIG .III.12 *Couple électromagnétique*

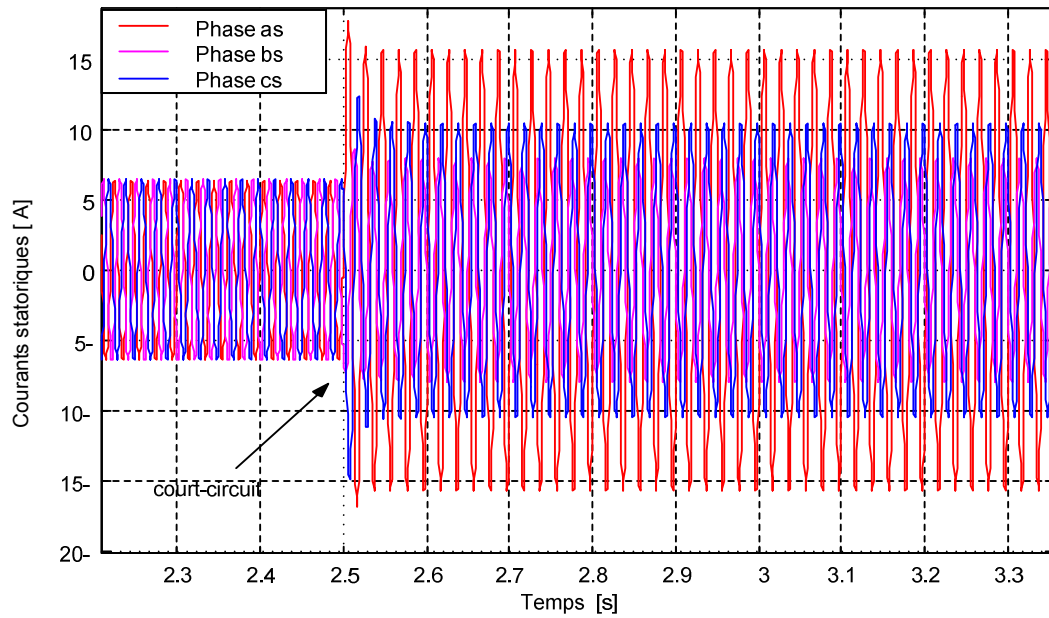


FIG .III.13 *Courants statoriques*

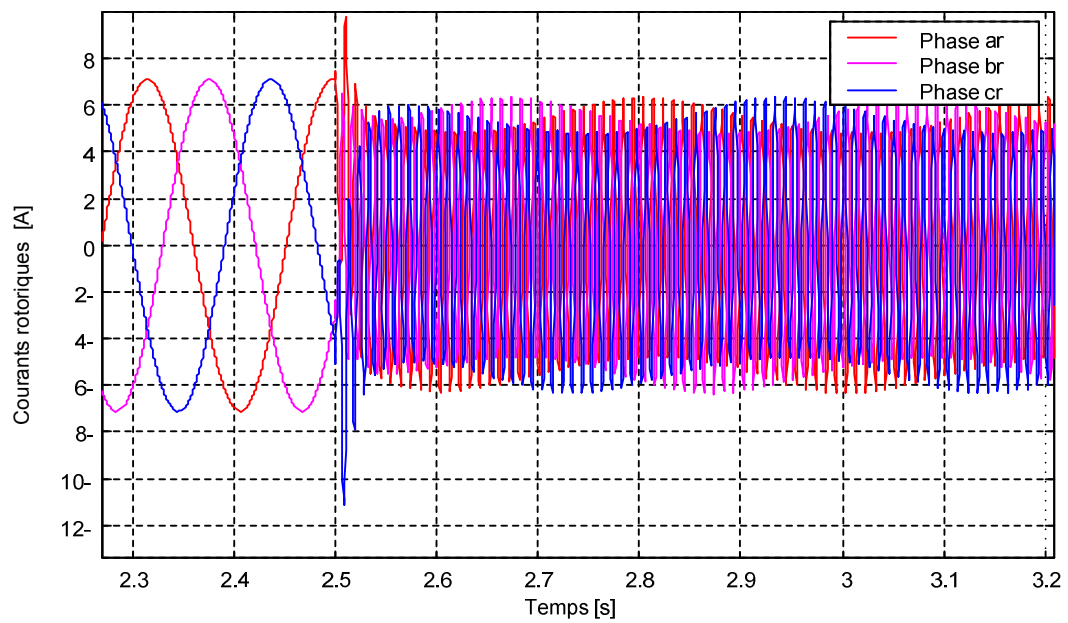


FIG .III.14 *Courants rotoriques*

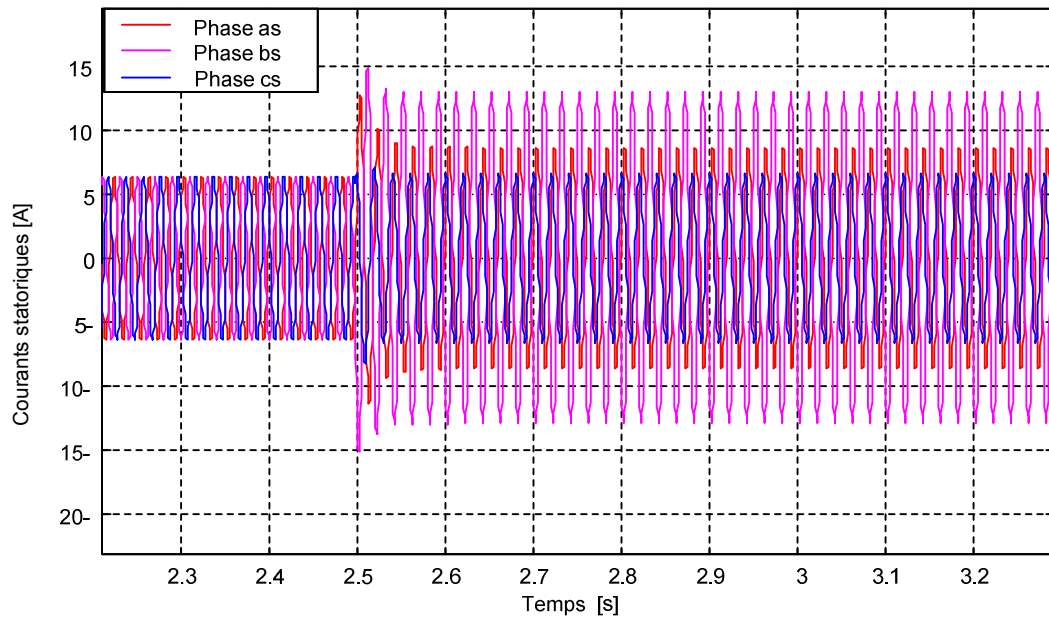


FIG .III.15 *Courants statoriques lors d'un défaut de 30% de spires en court-circuit dans la phase  $b_s$*

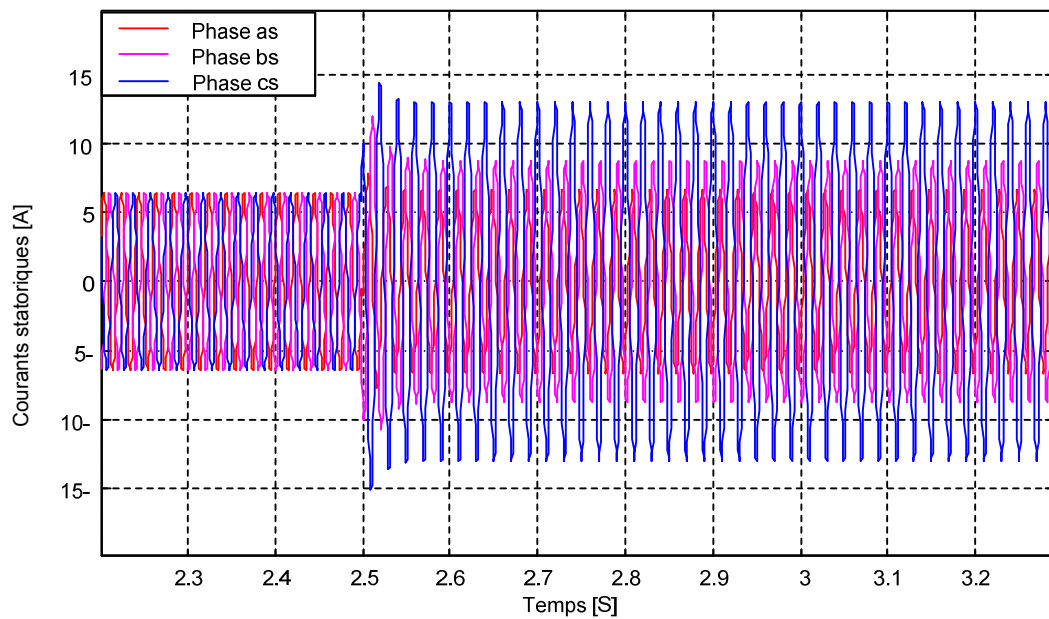


FIG .III.16 *Courants statoriques lors d'un défaut de 30% de spires en court-circuit dans la phase  $c_s$*

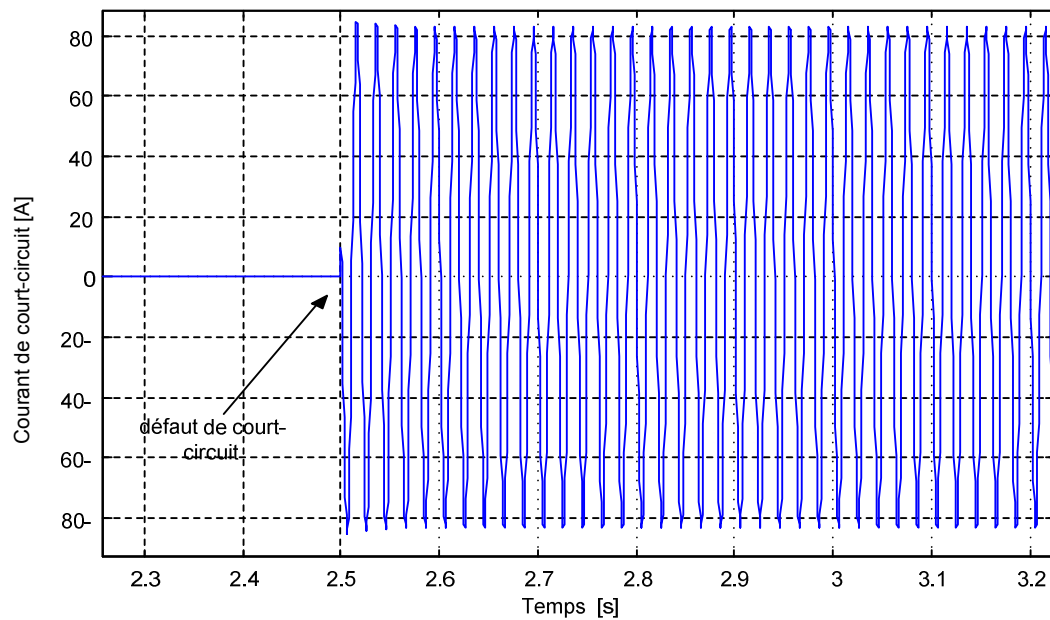


FIG .III.17 Courant de court circuit lors d'un défaut de 30% de spires en court- circuit

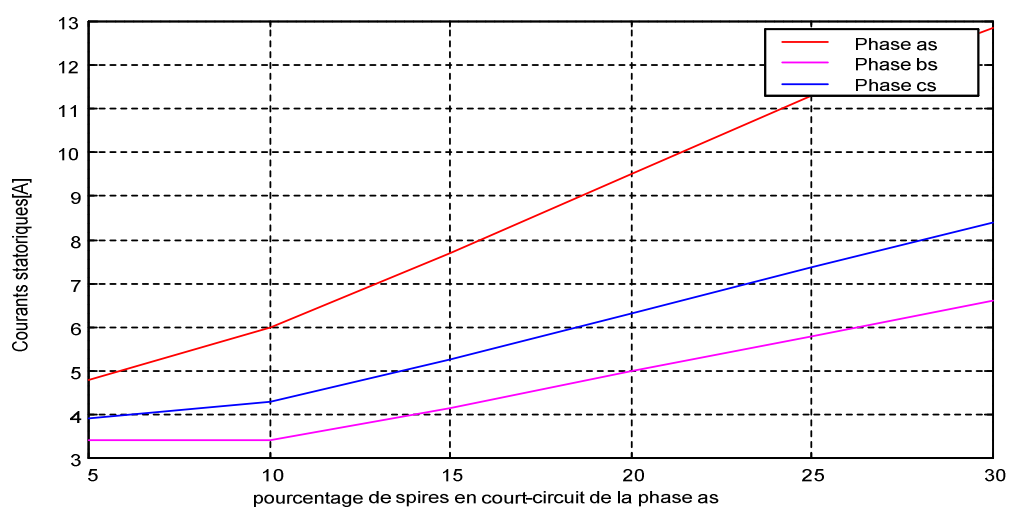


FIG III.18 Evolution des amplitudes des courants statoriques en fonction du pourcentage de court-circuit

### **III.5 Interprétation des résultats**

Nous avons introduit à l'instant 2.5 secondes un défaut de type court-circuit inter-spires de 30%, 35% et de 40% sur la phase  $a_s$  du stator de la machine.

La figure III.3 représente l'allure de la vitesse de rotation. Lors de l'application de défaut de 30% de spires en court-circuit, nous remarquons que la vitesse augmente et oscille avec des ondulations, causées par le défaut, d'amplitude 324.5 rad/sec, ces ondulations croient en augmentant le nombre de spires en court-circuit (FIG.III.7, FIG.III.11). Lors de la création du défaut de court-circuit entre spires d'une même phase, une nouvelle interaction entre la bobine court-circuitée et le rotor s'ajoute à celle qui existe au régime sain, cette interaction est à l'origine des ondulations du couple, qui s'amplifient avec l'augmentation du nombre de spires en court-circuit, comme c'est montré dans les figures (III.4, III.8 .III.12).

Les figures (III.5, III.9, III.13) montrent l'évolution du courant dans les trois phases du stator, suite à un défaut lors de 30%, 35% et 40% de court-circuit respectivement. Nous constatons que pour un défaut de 30% de court circuit dans la phase  $a_s$ , le courant croît brusquement et oscille avec des ondulations d'amplitude égale à 6.5A et 8.5A, pour les phases  $b_s, c_s$  respectivement, ce qui est dû au couplage magnétique des trois phases statoriques, et de 13A pour la phase  $a_s$  affectée. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par d'autres travaux [Bachir, 02] [Boumegoura, 01].

Les courants dans les trois phases du rotor sont présentés dans Les figures (III.6, III.10, III.14). Une déformation de la forme des courants est observée, ce qui peut être expliquée par la modification du comportement magnétique dans l'entrefer, due au champ stationnaire créée par les spires en court-circuit, qui s'ajoute au champ tournant créée par les trois phases statoriques en régime sain. .

L'évolution des courants de phases statoriques en fonction de nombre de spires en court-circuit est représentée sur la figure (III.18). Lorsqu'on amplifie le pourcentage de spires en court-circuit les amplitudes des courants augmentent d'avantage avec ce pourcentage. Il est nécessaire de noter qu'il existe une valeur critique correspondant au nombre de spires en court-circuit, qu'il suffit de dépasser pour que les bobinages de la machine fusionnent.

### **III.6 Conclusion**

Le but assigné dans ce chapitre est l'élaboration d'un modèle dédié à la simulation de défaut de court-circuit entre-spores sur une phase statorique. Ce modèle est basé sur le principe des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés (**CEMC**). Le défaut de court-circuit a été pris en compte en ajoutant une bobine supplémentaire. En effet, ce modèle nous a permis d'analyser l'influence de ce défaut sur les grandeurs de la machine telle que le courant, la vitesse et le couple. Nous constatons la montée en courant sur les trois phases statoriques provoquant des oscillations de couple, donc des mouvements vibratoires perceptibles sur la vitesse de rotation. Le même processus sera utilisé pour la modélisation de la machine asynchrone à cage, ce qui est l'objectif du chapitre suivant.

# **Chapitre IV**

## **Modélisation triphasée-polyphasée de la machine asynchrone à cage**

**IV.1 Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime sain, notre étude consiste à utiliser la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés ou la méthode des mailles (la même procédure que celle utilisée pour le cas de machine à rotor bobiné) [Khezzar, 04][Liang, 02]. Les facilités apportées par cette approche nous ont semblées être les plus adéquates pour analyser l'influence d'une rupture de barre et de segments d'anneaux sur le fonctionnement de la machine. Dans ce modèle, le rotor est représenté comme étant constitué d'autant de phases que de barreaux, en effet différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques caractérisant ce modèle seront présentées. Nous montrons que ce modèle est composé essentiellement de résistances et d'inductances.

**IV.2 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain**

Dans cette partie, nous allons présenter le modèle réel de la machine asynchrone à cage en utilisant la méthode des Circuits Electriques Magnétiquement Couplés. Dans cette approche de modélisation, les inductances propres et mutuelles des différents bobinages de la machine prennent une place importante car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Ces inductances sont calculées par le biais de l'induction d'entrefer, ce dernier étant l'endroit par excellence de la conversion d'énergie électromagnétique [Casimir, 03b] [Devanneaux,03][Menacer, 04]. Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses dans le but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine, qui sont les mêmes que celles citées aux chapitre II. De plus les barres rotoriques sont isolées les uns des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-barres et leurs effets au sein de la cage rotorique. Les pertes fer de la machine, les effets capacitifs et les effets thermiques ont été négligés dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

**IV.2.1.Structure du stator**

Le stator de la machine étudiée est un stator triphasé de  $m$  encoches statoriques, une phase statorique est composée de plusieurs bobines logées dans les encoches du stator. Ces bobines statoriques sont placées de telle sorte à obtenir une distribution de la force magnétomotrice la plus sinusoïdale possible le long de l'entrefer.

La FIG IV.1 donne une représentation de la modélisation choisie pour les trois phases du stator de la machine asynchrone.

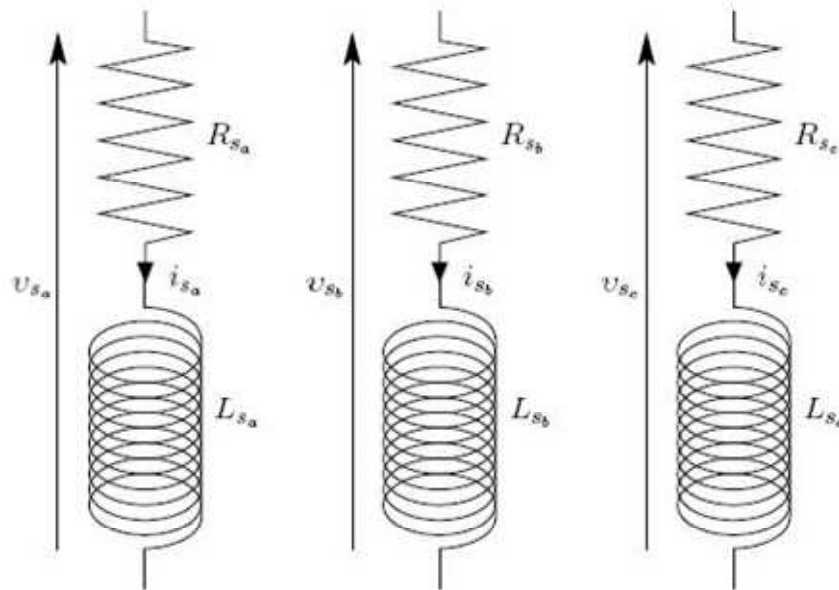


FIG.IV.1. *Circuits électriques adoptés pour la modélisation des trois phases statoriques*

#### IV.2.2 Structure du rotor

La cage rotorique de la machine se compose de  $N_r$  encoches rotoriques qui peuvent être soit ouvertes soit fermées sur l'entrefer. La cage rotorique peut se composer en  $(N_r + 1)$  circuits électriques rotoriques indépendants. En effet, si nous considérons deux barres rotoriques adjacentes ainsi que les segments d'anneaux de court-circuit les reliant, nous obtenons une boucle rotorique fermée qui peut être étudiée sous forme de circuit électrique. Un des anneaux de court-circuit crée par conséquent une boucle supplémentaire, ce qui porte le nombre de boucles totales à  $(N_r + 1)$ . Nous associons à chacune de ces boucles un courant, ce qui nous amène à calculer  $(N_r + 1)$  courants rotoriques [Didier, 04] [Menacer, 04]. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit.

La FIG IV.2 nous donne la forme des circuits électriques adoptée pour la modélisation de la cage d'écureuil rotorique.

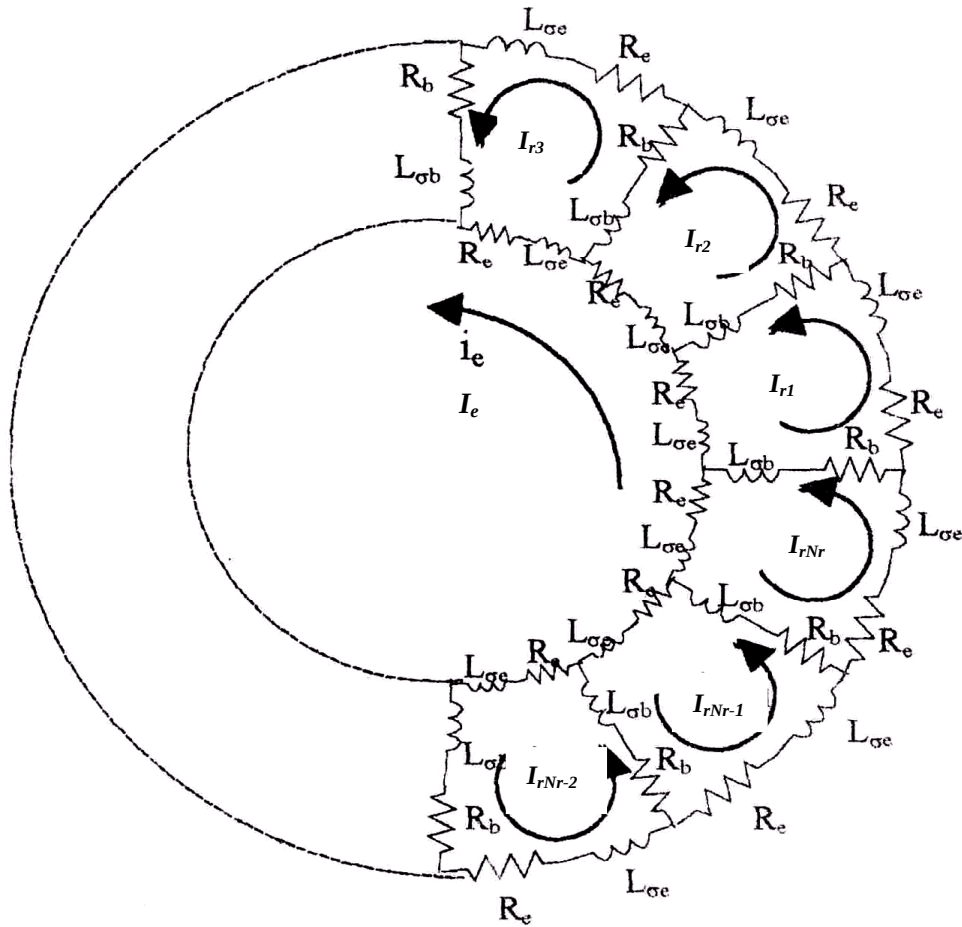


FIG.IV.2. Circuits électriques adoptés pour la modélisation du rotor [Casimir, 03b]

### IV.3 Mise en équations

#### IV.3.1 Equations différentielles associées au stator

Les équations natives des circuits électriques statoriques peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad \text{IV.1}$$

Les vecteurs  $[V_s]$ ,  $[I_s]$ ,  $[L_s]$ ,  $[R_s]$  sont définis aux chapitre II

Les trois phases statoriques sont non seulement magnétiquement couplées entre elles mais également avec les circuits électriques rotoriques Par conséquent, les courants de boucles rotoriques interviennent dans les équations des trois flux statoriques.

$$[\varphi_s] = [L_s][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad \text{IV.2}$$

Le vecteur  $[I_r]$  regroupe les  $(N_r + 1)$  courants de boucles rotoriques. :

$$[I_r] = [I_{r1} \ I_{r2} \ I_{r3} \ \dots I_{rk} \ \dots I_{rNr} \ I_e]$$

La matrice des inductances mutuelles  $[M_{sr}]$  entre les trois phases statoriques et les  $(N_r + 1)$  boucles rotoriques se met sous la forme suivante

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + a) & \dots & \cos(\theta + (N_r + 1)a) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + a - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1)a - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + a + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots & \cos\left(\theta + (N_r + 1)a + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{IV.3}$$

### IV.3.2 Equations différentielles associées au rotor

Les équations natives des circuits électriques rotoriques peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante

$$0 = [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dt} \quad \text{IV.4}$$

$$[\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad \text{IV.5}$$

$$[V_r] = [V_{r1} \ V_{r2} \ V_{r3} \ \dots V_{rk} \ \dots V_{rNr} \ V_{rcc}]^T \quad \text{IV.6}$$

$$[\phi_r] = [\phi_{r1} \ \phi_{r2} \ \phi_{r3} \ \dots \ \phi_{rk} \ \dots \ \phi_{rNr} \ \phi_{rcc}]^T \quad \text{IV.7}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad \text{IV.8}$$

Le rotor à cage est représenté par la figure (IV.3)

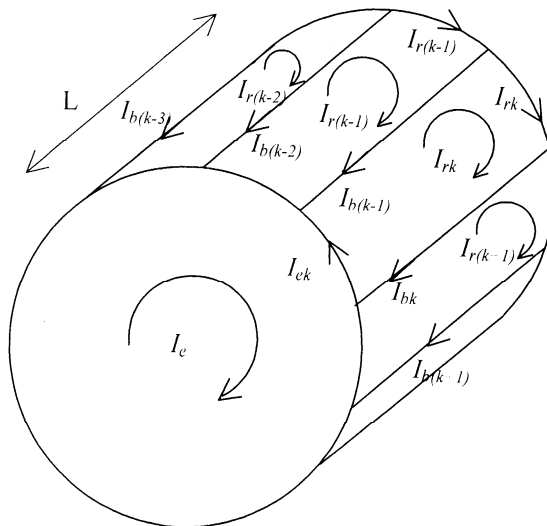


FIG.IV.3 Le rotor à cage

Si nous prenons les circuits électriques rotoriques présentés par la figure IV.3, nous pouvons écrire les équations relatives aux mailles  $k-1, k, k+1$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} \cdot I_{r(k-1)} - R_{b(k-2)} \cdot I_{b(k-2)} + \frac{R_e}{N_r} (I_{r(k-1)} - I_e) + R_{b(k-1)} \cdot I_{b(k-1)} + \frac{d\varphi_{r(k-1)}}{dt} \quad \text{IV.9}$$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} I_{rk} - R_{b(k-1)} I_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} (I_{rk} - I_e) + R_{bk} I_{bk} + \frac{d\varphi_{rk}}{dt} \quad \text{IV.10}$$

$$0 = \frac{R_e}{N_r} \cdot I_{r(k+1)} - R_{bk} \cdot I_{bk} + \frac{R_e}{N_r} (I_{r(k+1)} - I_e) + R_{b(k+1)} \cdot I_{b(k+1)} + \frac{d\varphi_{r(k+1)}}{dt} \quad \text{IV.11}$$

L'équation de la maille d'anneau s'écrit

$$0 = N_r R_e I_e - \sum_{k=1}^{N_r} R_e I_{rk} + \frac{d\varphi_e}{dt} \quad \text{IV.12}$$

D'où L'équation IV.4 devient

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & R_b & 0 & 0 & \dots & \cdot & -R_b & -R_e \\ R_b & 2(R_b + R_e) & R_b & 0 & \dots & \cdot & 0 & R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ R_b & 0 & \cdot & \dots & \cdot & R_b & 2(R_b + R_e) & R_e \\ R_e & R_e & \cdot & \dots & \cdot & -R_e & N_r R_e & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{Nr} \\ I_e \end{bmatrix} + \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad \text{IV.13}$$

$R_b$  résistance d'une barre rotorique,

$R_e$  résistance de l'anneau de court-circuit,

Le flux rotorique total est

$$[\varphi_r] = [\varphi_{rkr}] + [M_{sr}][I_s] \quad \text{IV.14}$$

Le flux du aux courants rotoriques est exprimé par la relation matricielle suivante

$$[\varphi_{rkr}] = [\varphi_{r1r} \quad \varphi_{r2r} \quad \dots \quad \varphi_{rkr} \quad \dots \quad \varphi_{rNr} \quad \varphi_{rcc}] = [L_r][I_r] \quad \text{IV.15}$$

Le flux dans la  $k^{eme}$  maille du rotor dû aux courants rotoriques est exprimé par la relation

$$\varphi_{rkr} = L_{r_l} I_{r_l} + ..... + L_{k_{Nr}} I_{r_{Nr}} + 2(L_e + L_b)I_{r_k} + L_b(I_{r_{(k-1)}} + I_{r_{(k+1)}}) \quad IV.16$$

La matrice  $[L_r]$  se compose des inductances propres, de magnétisation, de fuites et mutuelles de chaque boucle rotorique.

$$[\varphi_r] = \begin{bmatrix} L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & M_{rr} & L_{\sigma b} & M_{rr} & \dots & \dots & M_{rr} & L_{\sigma b} & -L_{\sigma e} \\ M_{rr} & L_{\sigma b} & L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & M_{rr} & L_b & \dots & \dots & M_{rr} & -L_{\sigma e} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} & L_{\sigma b} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & L_{rp} + 2(L_b + L_{\sigma e}) & L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} \\ -L_{\sigma e} & -L_{\sigma e} & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & -L_{\sigma e} & N_r L_{\sigma e} & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r1} \\ I_{r2} \\ I_{r3} \\ \vdots \\ I_{rN_r} \\ I_e \end{bmatrix} + [M_{sr}][I_s]$$

IV.17

$L_{rp}$  inductance principale d'une maille rotorique,

$L_b$  inductance d'une barre rotorique,

$L_{\sigma e}$  inductance totale de l'anneau de court-circuit,

$M_{rr}$  inductance mutuelle entre deux mailles rotorique,

### IV.3.3 Equation d'état

Le modèle d'état donné par l'équation II.19, s'écrit comme suit : (la même procédure que le cas de la machine à rotor bobiné)

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [S_o] & [S_o] \\ [M_{rs}] & [L_r] & [S_o] & [S_o] \\ [S_o]^T & [S_o]^T & J_t & 0 \\ [S_o]^T & [S_o]^T & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [R_s] & \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] & [S_o]^T & [S_o]^T \\ \left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{rs}}{d\theta} \right] & [R_r] & [S_o]^T & [S_o]^T \\ C_{stator} & C_{rotor} & f_v & 0 \\ [S_o] & [S_o] & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \\ \Omega_r \\ \theta \end{bmatrix} \quad IV.18$$

Avec

$$[S_o] = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \text{ Vecteur nul de dimension } (N_r + 1) \quad \text{IV.19}$$

$$\left[ \Omega_r \cdot \frac{dM_{sr}}{d\theta} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1N_r+1} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2N_r+1} \\ g_{31} & g_{32} & \dots & g_{3N_r+1} \end{bmatrix} \quad \text{IV.20}$$

$$= -M_{sr} \begin{bmatrix} \Omega_r \cdot p \sin(\theta) & \Omega_r \cdot p \sin(p\theta + a) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin(p\theta + (N_r + 1)a) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + (N_r + 1)a\right) \\ \Omega_r \cdot p \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \Omega_r \cdot p \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} - (N_r + 1)a\right) \end{bmatrix} \quad \text{IV.21}$$

Les constantes  $C_{stator}$ ,  $C_{rotor}$  sont définies comme suit

$$C_{stator} = 0.5 \cdot p \cdot [I_r] [H]^T \quad \text{IV.22}$$

$$C_{rotor} = 0.5 \cdot p \cdot [I_s] [H] \quad \text{IV.23}$$

$$[H] = M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(p\theta + a) & \dots & \sin(p\theta + (N_r + 1)a) \\ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3} + (N_r + 1)a\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} + a\right) & \dots & \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3} - (N_r + 1)a\right) \end{bmatrix} \quad \text{IV.24}$$

#### IV.4 Calcul des inductances et des mutuelles [Baghli,99][Khatir, 07]

##### IV.4.1 Inductances statoriques

Nous avons dans le stator de la machine trois bobines identiques, l'angle mécanique entre elles est  $\frac{2\pi}{3}$ , l'intensité de champ magnétique H produite par une bobine statorique dans le fer est très faible par rapport à sa valeur dans l'entrefer.

La décomposition en série de Fourier de l'expression de l'induction dans l'entrefer fournit la fondamentale:

$$B_{sm}(\theta) = \frac{2}{\pi} \mu_0 \cdot \frac{N_s}{e \cdot p} I_{sm} \cos\left(p\theta - m \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{IV.26}$$

$$m=1, 2, 3 \ (a,b,c)$$

L'expression d'induction maximale dans l'entrefer est donnée par :

$$B_{max} = \frac{\mu_0 \cdot N_s I_{sm}}{pe} \quad \text{IV.25}$$

L'expression du flux principal d'un enroulement statorique est

$$\varphi_{psm} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \cdot \frac{N_s^2}{e \cdot p^2} \cdot R \cdot L \cdot I_{sm} \quad \text{IV.27}$$

D'après l'équation du flux, l'expression de l'inductance principale d'un enroulement statorique est donnée :

$$L_{sp} = \frac{\varphi_{sp}}{I_{sm}} = \frac{4\mu_0 N_s^2}{ep^2\pi} R \cdot L \quad \text{IV.28}$$

Les termes  $R, L, e, L_s$  représentent le rayon moyen au milieu de l'entrefer, la longueur active du circuit magnétique, l'épaisseur de l'entrefer et le nombre d'encoches statoriques.

Les hypothèses du système à trois axes et de répartition sinusoïdale de la force magnétomotrice permettent de passer directement aux expressions des inductances mutuelles entre bobinages statoriques  $M_s$  et l'inductance cyclique  $L_{sc}$

$$M_{s(ab)} = M_{s(ac)} = M_{s(bc)} = L_{sp} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{IV.29}$$

$$L_{sc} = \frac{4\mu_0 N_s^2}{p^2 e \pi} \cdot R \cdot L + L_{sf} \quad \text{IV.30}$$

$L_{sf}$  est l'inductance de fuite statorique.

#### IV.4.2 Inductances rotoriques

La figure (IV.4) montre l'allure de l'induction magnétique, en fonction de  $\theta$ , produite par une maille rotorique dans l'entrefer.

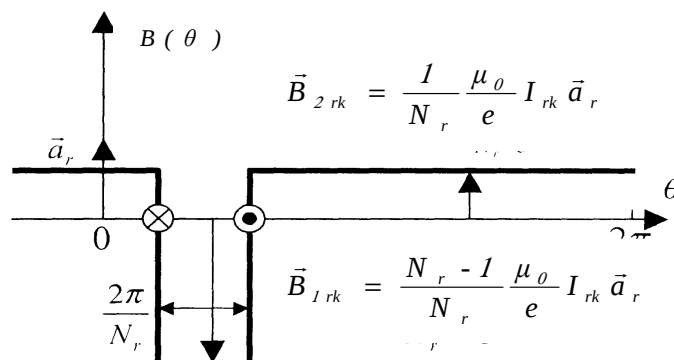


FIG.IV.4 Induction produite par une maille

A partir de cette répartition, on calcule l'induction principale ainsi que la mutuelle entre deux mailles rotoriques

$$B_{prk} = I_{rk} \left( \frac{N_r - 1}{N_r} \right) \frac{\mu_0}{e} \quad \text{IV.31}$$

$$B_{mrk} = I_{rk} \left( \frac{1}{N_r} \right) \frac{\mu_0}{e} \quad \text{IV.32}$$

L'inductance principale d'une maille rotorique:

$$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad \text{IV.33}$$

L'inductance mutuelle entre deux mailles k et j:

$$M_{rr} = -\frac{1}{N_r^2} \cdot \frac{\mu_0}{e} \cdot 2\pi \cdot L \cdot R \quad \text{IV.34}$$

#### IV.4.3 Inductances stator-rotor

L'inductance produite par la bobine statorique de la phase m induit dans la maille k le flux

$$\varphi_{smrk} = \int_{S_{rk}} \vec{B} \cdot d\vec{S}_{sk} = - \int_{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} B_{sm}(\theta') \cdot L \cdot R \cdot d\theta' \quad \text{IV.35}$$

$$\varphi_{smrk} = -\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_0}{e \cdot p} \cdot N_s \cdot I_{sm} \cdot L \cdot R \cdot \frac{1}{p} \left[ \sin \left( p\theta' - m \frac{2\pi}{3} \right) \right]_{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} - \frac{\pi}{N_r}}^{\frac{\theta}{p} + k \frac{2\pi}{N_r} + \frac{\pi}{N_r}} \quad \text{IV.36}$$

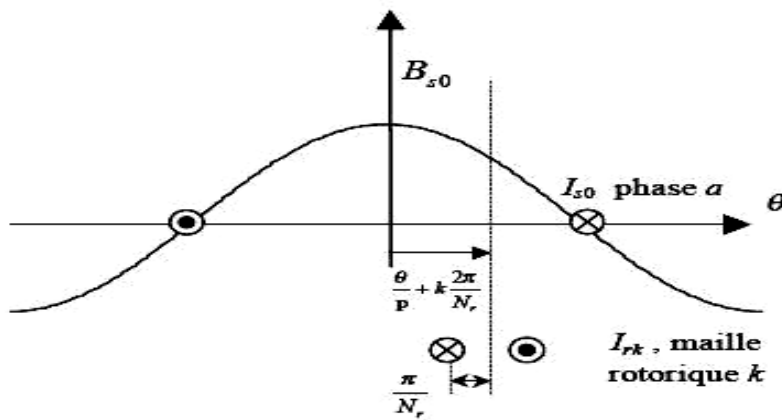


FIG.IV.5 position de la maille rotorique k par rapport à une phase statorique

La mutuelle stator- rotor entre la phase  $m$  et la maille rotorique  $k$

$$M_{smrk} = -M_{sr} \cdot \cos\left(\theta - m\frac{2\pi}{3} + k.a\right) \quad \text{IV.37}$$

$$M_{sr} = \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{e.p^2} \cdot N_s \cdot L \cdot R \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad \text{IV.38}$$

$a = p \cdot \frac{2\pi}{N_r}$  est l'angle électrique entre deux mailles rotoriques.

## IV.5 Résultats de simulation

## IV.5.1 Validation de modèle de la machine asynchrone à cage en régime sain

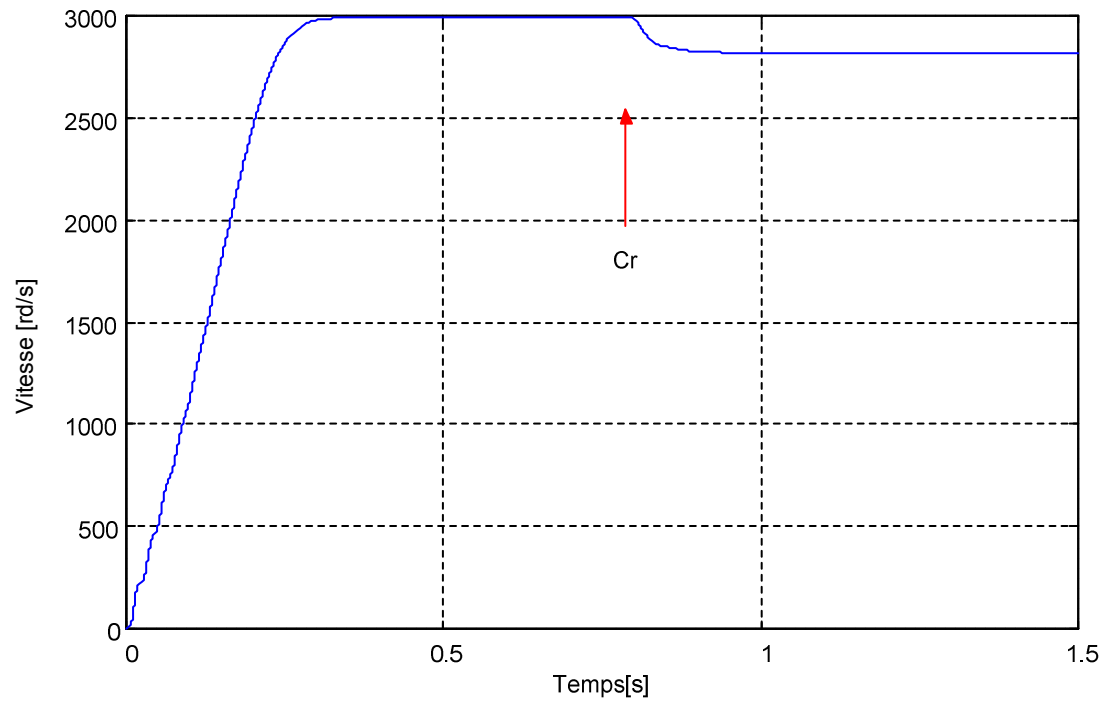


FIG.IV.6 Evolution de la vitesse de rotation

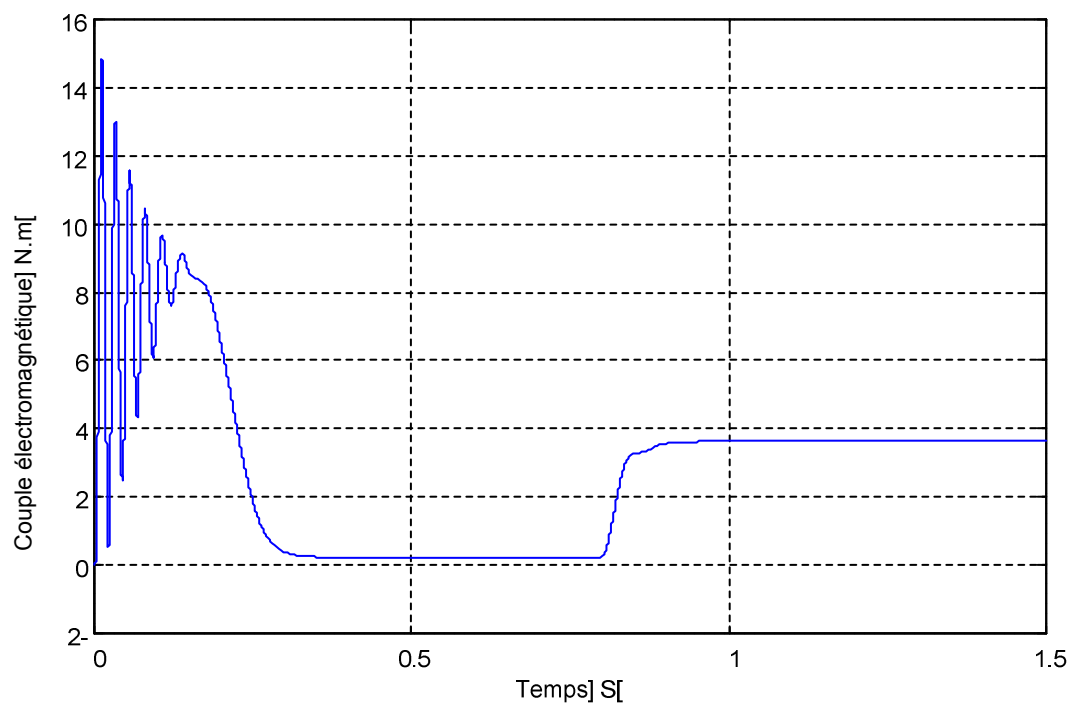


FIG.IV.7 Evolution du couple électromagnétique

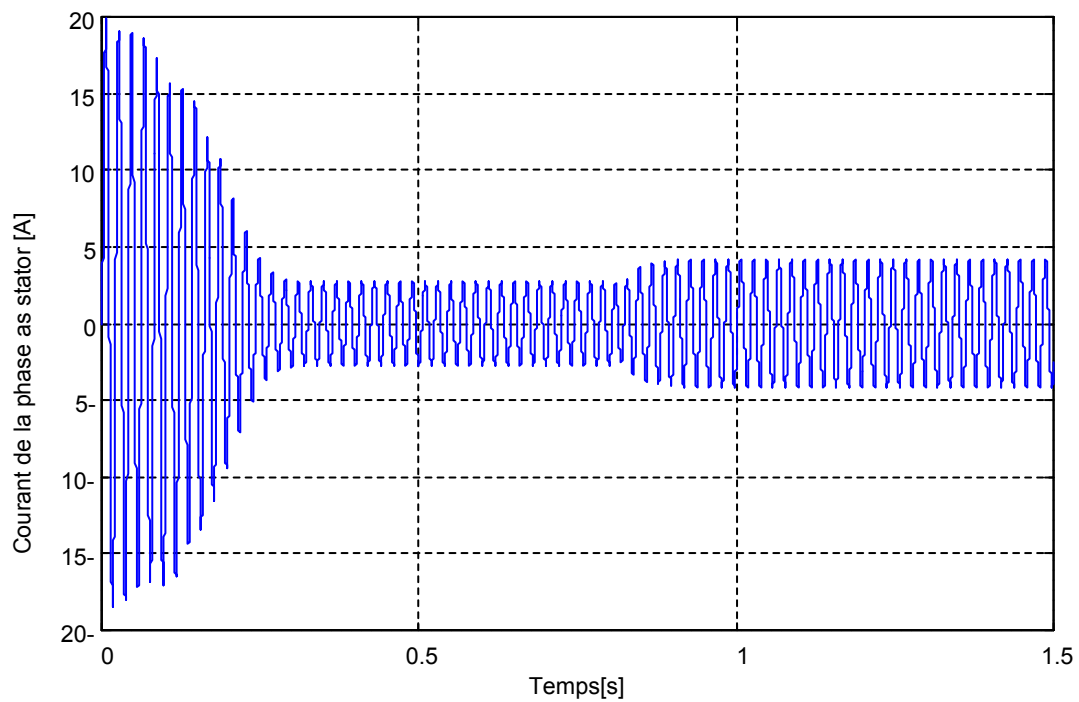


FIG.IV.8 Evolution de courant statorique

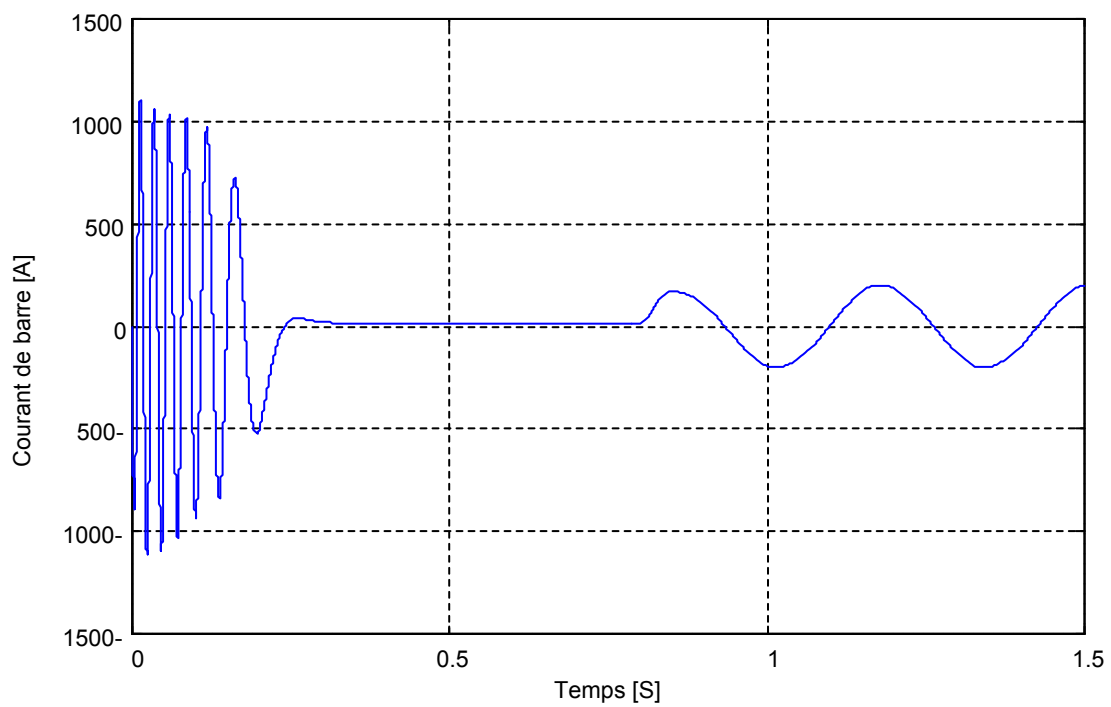


FIG.IV.9 Evolution de courant d'une barre

**IV.6 Conclusion**

Dans cette partie, nous avons abordé la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en régime sain, la méthode utilisée consiste à traiter la machine à cage en termes de circuit. Le rotor est considéré comme un ensemble de mailles interconnectées entre elles, chacune formée par deux barres adjacentes et les portions d'anneaux qui les relie. Nous avons donc décrit la méthodologie qui nous a permis d'aboutir à la formulation des différentes équations régissant le fonctionnement de la machine, ainsi que le calcul des inductances propres et mutuelles des différents bobinages. Le modèle utilisé permet de visualiser des grandeurs inaccessibles dans d'autres types de modèles ou dans une machine réelle, tel que la répartition des courants dans la cage d'écureuil.

# **Chapitre V**

## **Modélisation de la machine asynchrone à cage en présence des défauts**

## V.1 Introduction

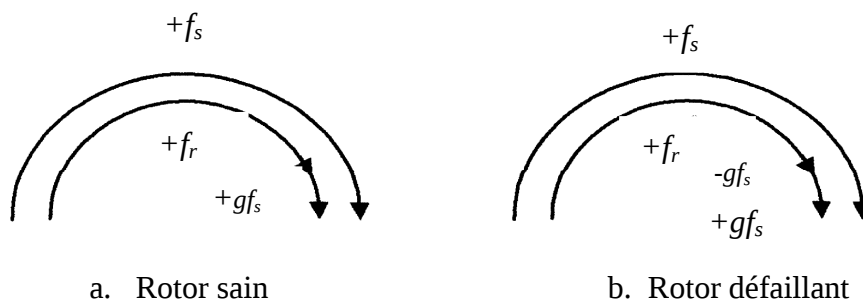
Ce chapitre consiste à étudier les différents phénomènes qui apparaissent au niveau des grandeurs temporelles lorsque la cage rotorique présente un défaut de type rupture d'une ou plusieurs barres et rupture de portions d'anneaux de court-circuit. Pour ce faire, il convient de développer un modèle qui tient compte de ces défauts. Les résultats de simulation en présence de ces défauts seront présentés.

## V.2 Origines des raies dues aux défauts rotoriques

Les pannes rotoriques sont souvent à l'origine de nuisances dues aux ondulations du couple électromagnétique provoquant des oscillations de la vitesse de rotation. L'information rupture de barre se trouve donc véhiculée par le flux magnétique, et par conséquent dans le courant absorbé au réseau électrique [Bellini, 00]. Il est donc nécessaire de connaître les fréquences résultant d'une rupture de barres afin de pouvoir les détecter à travers une analyse générale des courants. Suite à une rupture de barre, il se crée en plus du champ rotorique direct un champ inverse qui tourne à la vitesse  $-g \cdot f_s$ . Cela est dû au fait que les courants rotoriques sont maintenant directs et inverses suite au déséquilibre des résistances. C'est l'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique qui crée les ondulations du couple et qui induit au stator des forces électromotrices de fréquences  $f_s, (1+2g)f_s, (1-2g)f_s$  d'où des courants statoriques comportant ces composantes [Bachir, 02] [Didier, 01]. Les champs créés par ces courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses. Donc par le même processus que celui décrit précédemment, on retrouvera des composantes dans le courant statorique de fréquence  $(1 \pm 2kg)f_s$  avec  $k$  entier positif. Le schéma de la figure V.1 décrit le phénomène dû à l'apparition du défaut rotorique sachant que la fréquence d'apparition de défaut est donnée

$$f_{\text{défaut}} = f_r - g \cdot f_s = (1 - g) \cdot f_r - g \cdot f_s = (1 - 2g) f_s$$

V.1



### V.3 Modèle de la machine asynchrone à cage en présence de défaut de cassure de barres

La rupture d'une ou plusieurs barres de la cage d'écureuil de la machine asynchrone est le défaut étudié dans cette partie. La simulation de ce type de défaut peut se faire en utilisant deux méthodes différentes. Une première méthode consiste à reconstituer totalement le circuit électrique rotorique. Dans cette approche, la barre rotorique défaillante est enlevée du circuit électrique, donc recalculer les matrices résistances  $[R_r]$  et inductances  $[L_r]$ . En effet, la suppression d'une barre de la cage nous donne une matrice  $[R_r]$  et  $[L_r]$  de rang inférieure à celle développée pour la machine saine. La modification de l'ordre des matrices rotoriques oblige à recalculer les lois électriques et magnétiques de la boucle  $k$ . La seconde approche consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée, pour que le courant qui la traverse soit le plus proche de zéro en régime permanent. Dans cette méthode la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée, car nous considérons, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique. Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des grandeurs de la machine. [Khezzar,05][Houdouin,02][Didier,04][Baghli,99]. Dans notre étude, nous avons utilisé la deuxième méthode pour la prise en compte de défaut de cassure de barres ainsi que les segments d'anneaux de court circuit, la structure du rotor est donc la même que celle utilisée en régime sain.

#### V.3.1 Représentation d'état du modèle de défaut

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain (équation IV.18), avec la matrice résistances rotoriques est définie comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & R_b & 0 & 0 \dots & \dots & -R_b & -R_e \\ R_b & 2(R_b + R_e) & R_b & 0 \dots & \dots & 0 & R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & -\alpha R_{bk} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & (\alpha \cdot 2R_b + R_e) & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \alpha R_{bk} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_b & 0 & \vdots & \dots & R_b & 2(R_b + R_e) & R_e \\ R_e & R_e & \vdots & \dots & \vdots & -R_e & N_r R_e \end{bmatrix} \quad \text{V.2}$$

$\alpha$  est le coefficient d'augmentation de la barre incriminée.

#### V.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en présence de défaut de rupture de portions d'anneaux

Les défauts qui peuvent apparaître au niveau des portions d'anneaux de court-circuit ont souvent les mêmes origines que celles présentées pour la cassure d'une barre de la cage rotorique. La méthodologie adoptée pour la prise en compte de ce type de défaut dans le modèle est aussi identique à l'approche utilisée pour la simulation d'une rupture d'une barre rotorique. La simulation d'une rupture d'une portion d'anneau de court-circuit s'effectue en augmentant la valeur de sa résistance de telle sorte que le courant qui le traverse soit le plus proche possible de zéro au régime permanent.

##### V.4.1 Représentation d'état du model de défaut

Le modèle d'état à étudier dans ce cas est aussi le même que celui utilisé pour le cas de la machine en régime sain, avec la matrice résistances rotoriques est définie comme suit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & R_b & 0 & 0 \dots & . & -R_b & -R_e \\ R_b & 2(R_b + R_e) & R_b & 0 \dots & . & 0 & R_e \\ . & . & . & \dots & . & . & . \\ . & . & . & \dots & . & . & . \\ . & . & 2(R_b + \beta R_e) & \dots & . & . & \beta R_e \\ . & . & . & \dots & . & . & . \\ . & . & . & \dots & . & . & . \\ R_b & 0 & . & \dots & R_b & 2(R_b + R_e) & R_e \\ R_e & R_e & \beta R_e & \dots & . & -R_e & ((N_r - 1)R_e + \beta_r R_e) \end{bmatrix} \quad V.3$$

$\beta$  est le coefficient d'augmentation de l'anneau incriminé.

Après avoir décrit les dispositions adoptées pour la modélisation d'une barre rotorique cassée et / ou d'une portion d'anneau cassée, nous allons maintenant étudier l'évolution temporelle des grandeurs de la machine lorsque la cage d'écureuil présente ces défauts.

**V.5 Interprétation des résultats de simulation**

Afin d'analyser l'effet de la rupture de barre sur l'évolution temporelle des grandeurs de la machine, nous avons choisi de rendre la barre  $b_{10}$  de la cage rotorique défailante à l'instant  $t=3$  seconde, en imposant une résistance de barre 200 fois supérieure à celle donnée en fonctionnement sain, cette valeur a été choisie de telle sorte à ce que le courant qui traverse la barre défailante soit le plus proche de zéro. Nous présentons dans ce qui suit l'évolution des courants, du couple, et de la vitesse, lorsque nous passons d'un fonctionnement sain à un fonctionnement défailant, en procédant à un échelon de couple résistant de 3.5 N.m à l'instant  $t=1.5$  secondes.

La figure (V.2) montre l'évolution de la vitesse rotorique, nous visualisons l'apparition d'une légère ondulation lorsque la rupture de la barre rotorique  $r_{b10}$  apparaît. Cette ondulation augmente avec le nombre de barres cassées (FIG V.3, FIG.V.4). Cette variation de vitesse est très faible car elle dépend essentiellement de l'inertie  $J$  de l'ensemble machine-charge. Plus l'inertie est grande, moins la variation de vitesse est importante.

L'analyse du couple électromagnétique FIGV.5, montre une modification importante de son allure lorsque le défaut rotorique apparaît. Nous apercevons qu'une légère modulation vient perturber l'évolution du couple lorsque la première barre est cassée. Nous remarquons aussi que cette modulation prend plus d'importance avec l'apparition de défaut de deux et quatre barres cassées FIGV.6, FIGV.7, FIG V.8.

La figure V.9 représente l'évolution du courant absorbé par une phase statorique. Comme les deux grandeurs précédentes, le défaut rotorique induit une très légère modulation d'amplitude qui augmente avec le nombre de barres cassées (FIG V.10, FIGV.11).

La modification du circuit représentant le rotor implique un changement direct des courants qui circulent dans ce circuit, ce qui rend leur observation intéressante. En observant les courants de barres issus de la simulation, on voit clairement que les amplitudes des courants des barres adjacentes aux barres cassées augmentent considérablement et atteignent le double FIG V.12, FIGV.13, voir plus, du courant absorbé dans les autres barres. (Le courant qui circule dans la barre défailante se partage dans les barres rotoriques adjacentes). Les figures (V.16), (V.17), (V.18), (V.19) représentent l'évolution de la vitesse, du couple, et des courants lors de l'apparition de défaut de cassure de portions d'anneaux, les résultats obtenus montrent que la rupture de portions d'anneaux de court-circuit et la cassure de barres ont presque les mêmes effets sur les grandeurs de la machine

## V.6 Validation du modèle de la machine avec défaut de cassures de barres

## V.6.1 Evolution de la vitesse de rotation

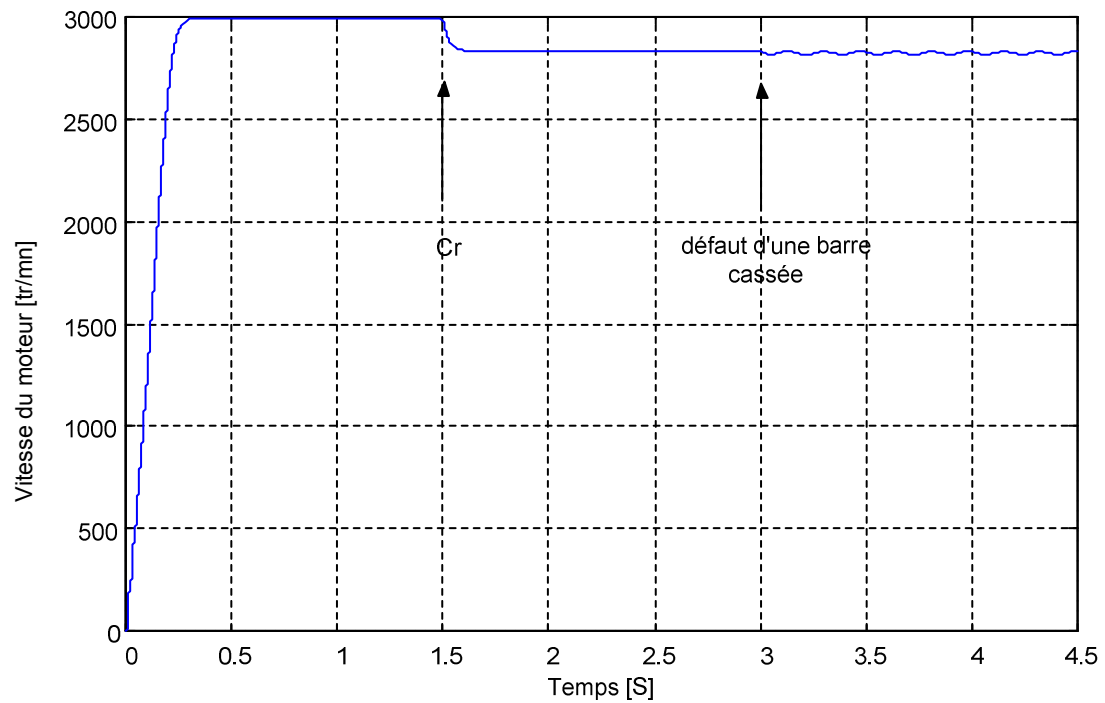


FIG.V.2 Rupture d'une barre

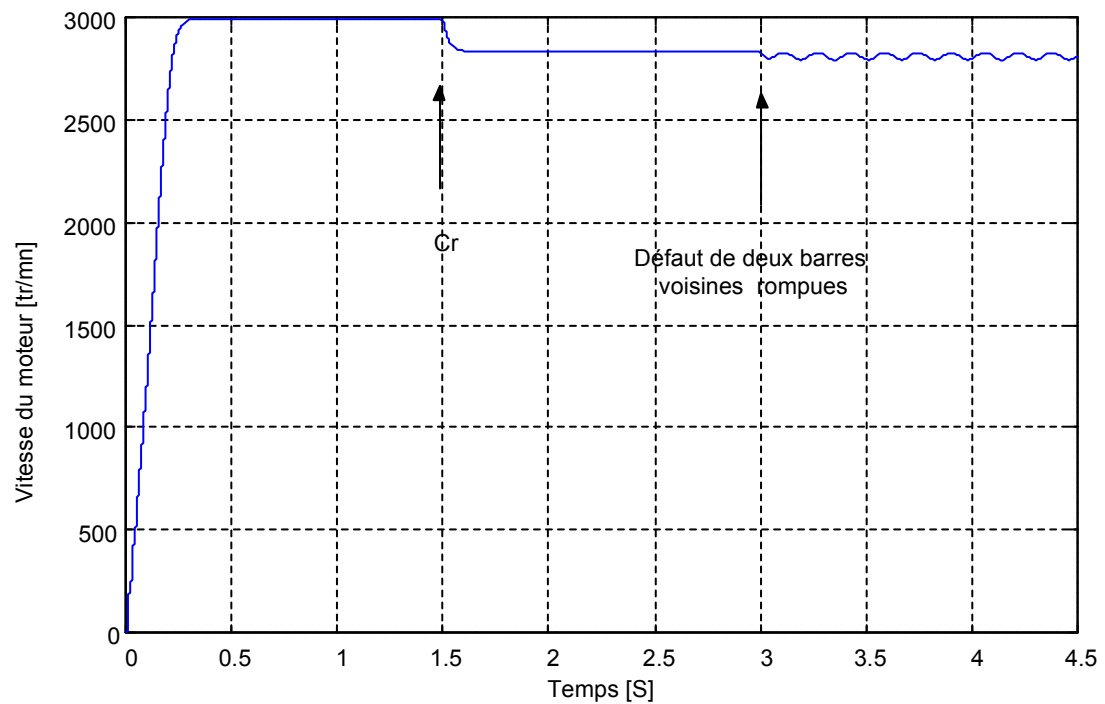


FIG.V.3 Rupture de deux barres adjacentes

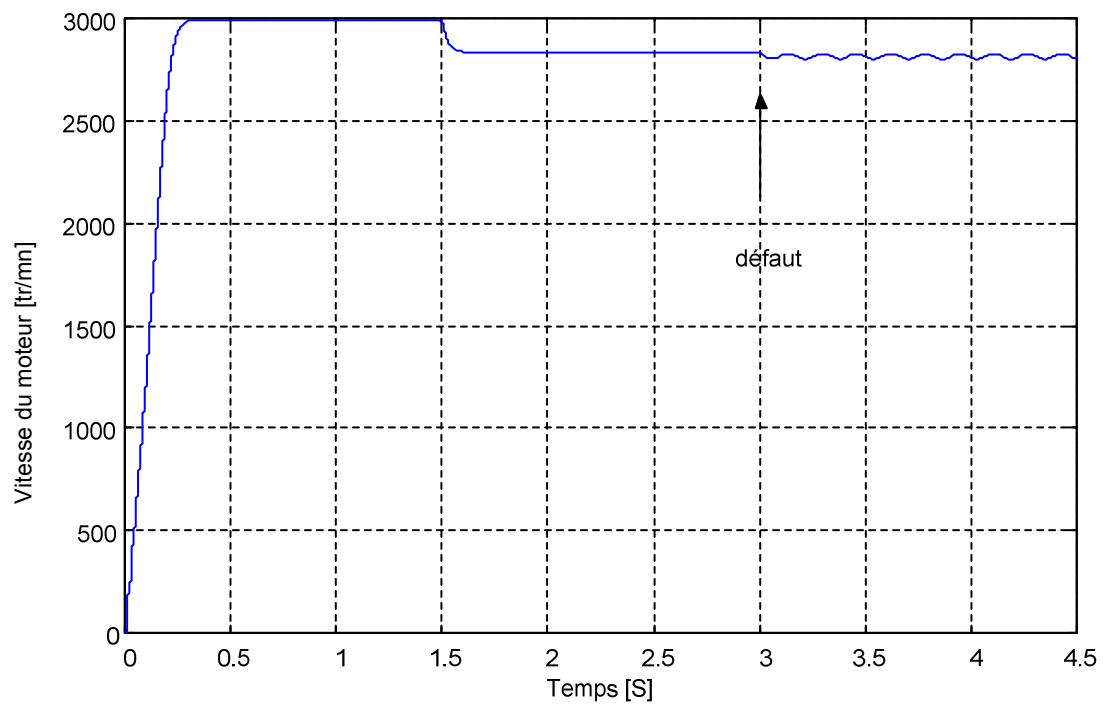


FIG.V.4 Rupture de deux barres non adjacentes

### V.6.2 Evolution du couple électromagnétique

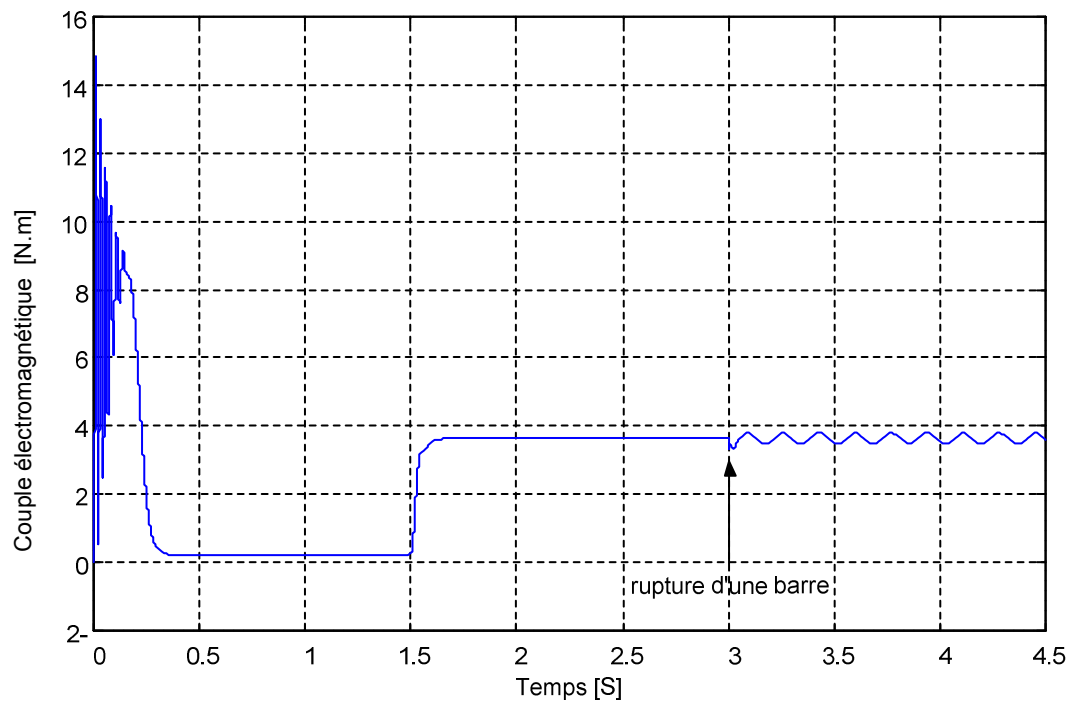


FIG.V.5 Rupture d'une barre

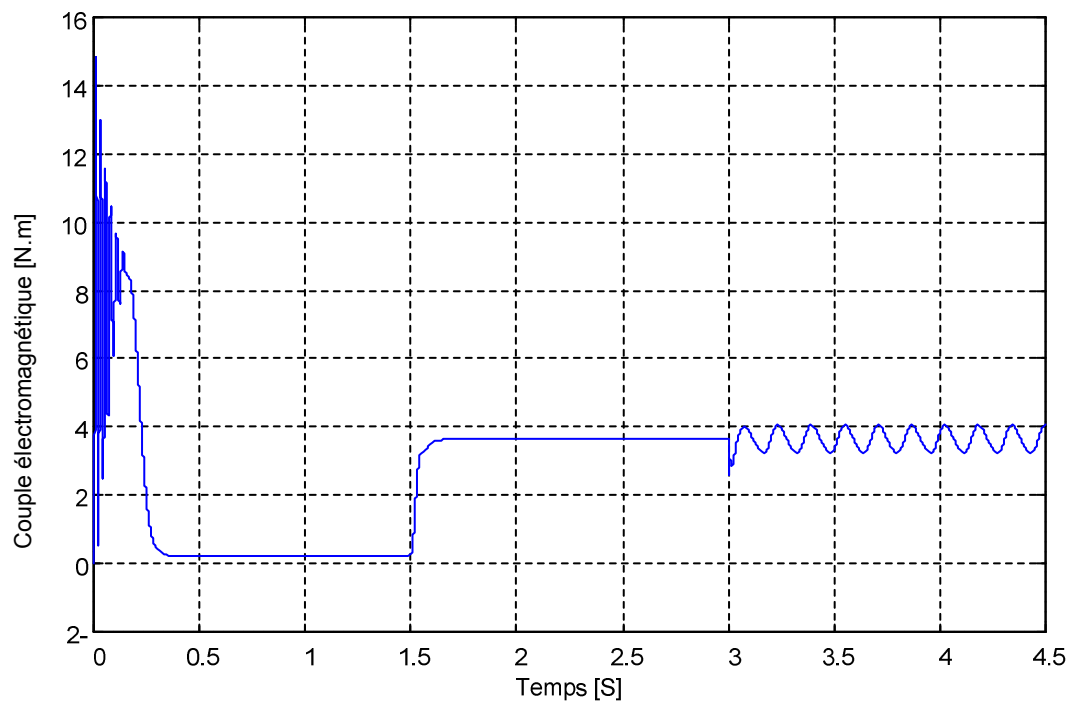


FIG.V.6 Rupture de deux barres adjacentes

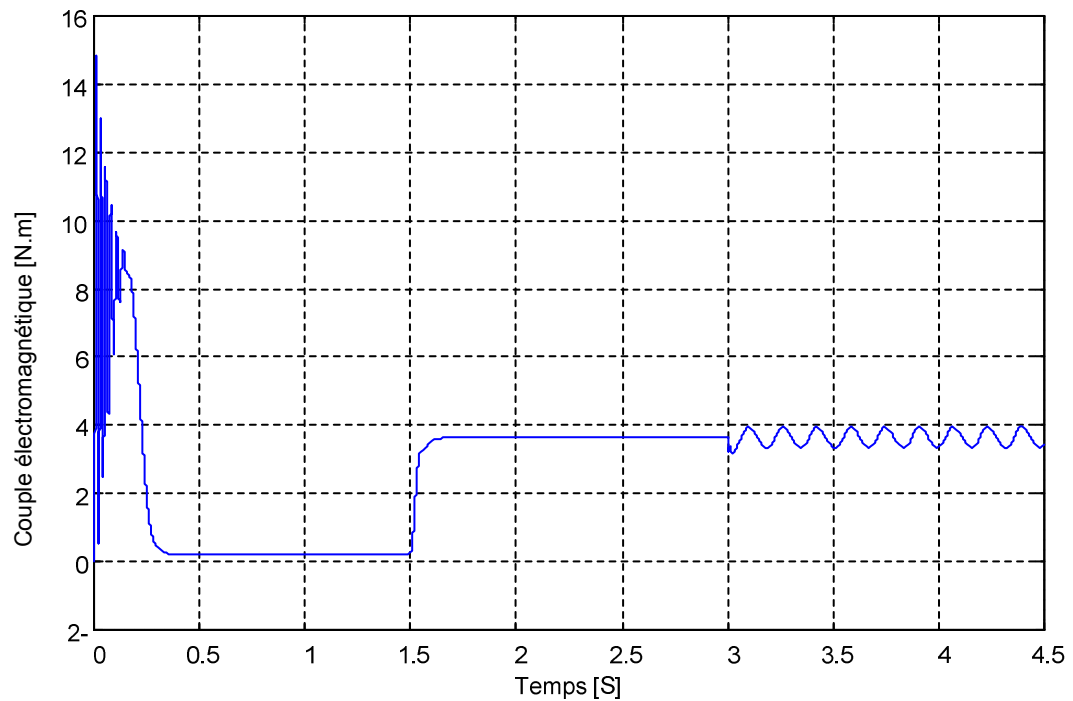


FIG.V.7 Rupture de deux barres non adjacentes

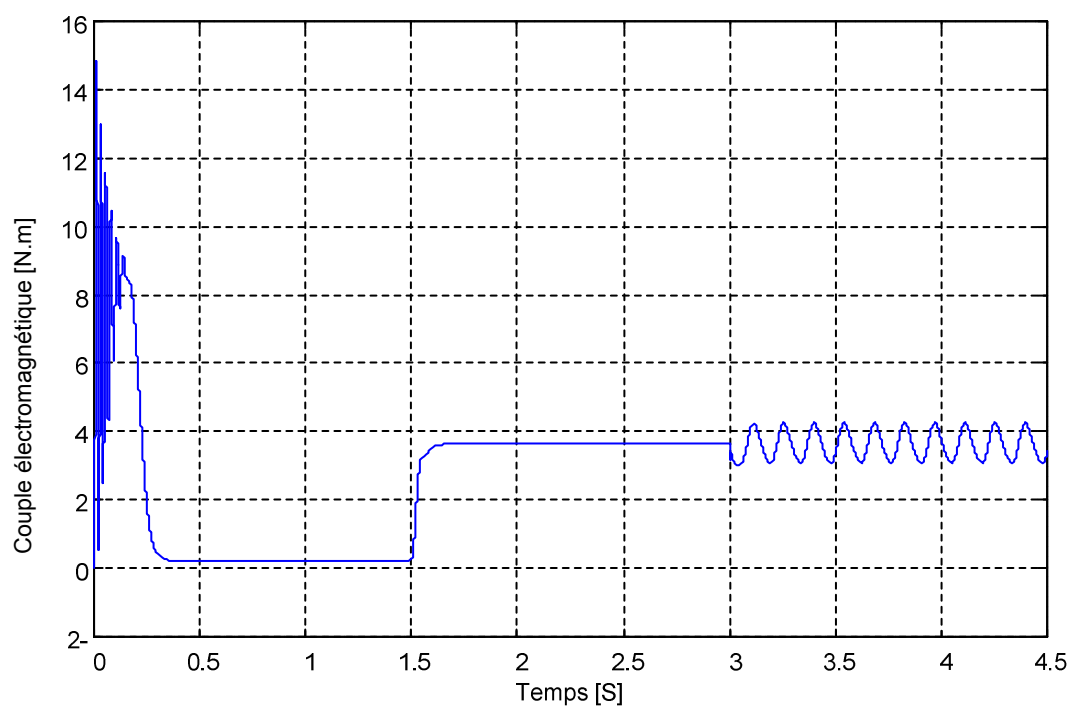


FIG.V.8 Rupture de quatre barres

### V.6.3 Evolution des courants statoriques

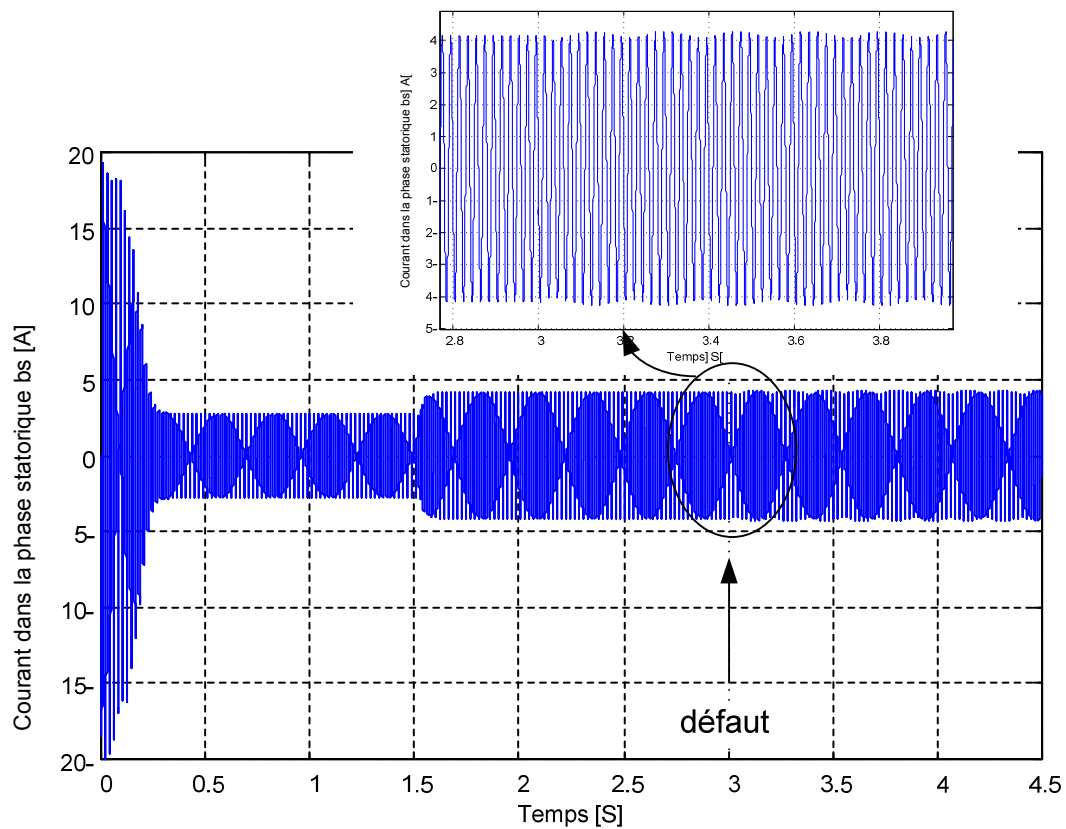


FIG.V.9 Rupture d'une barre

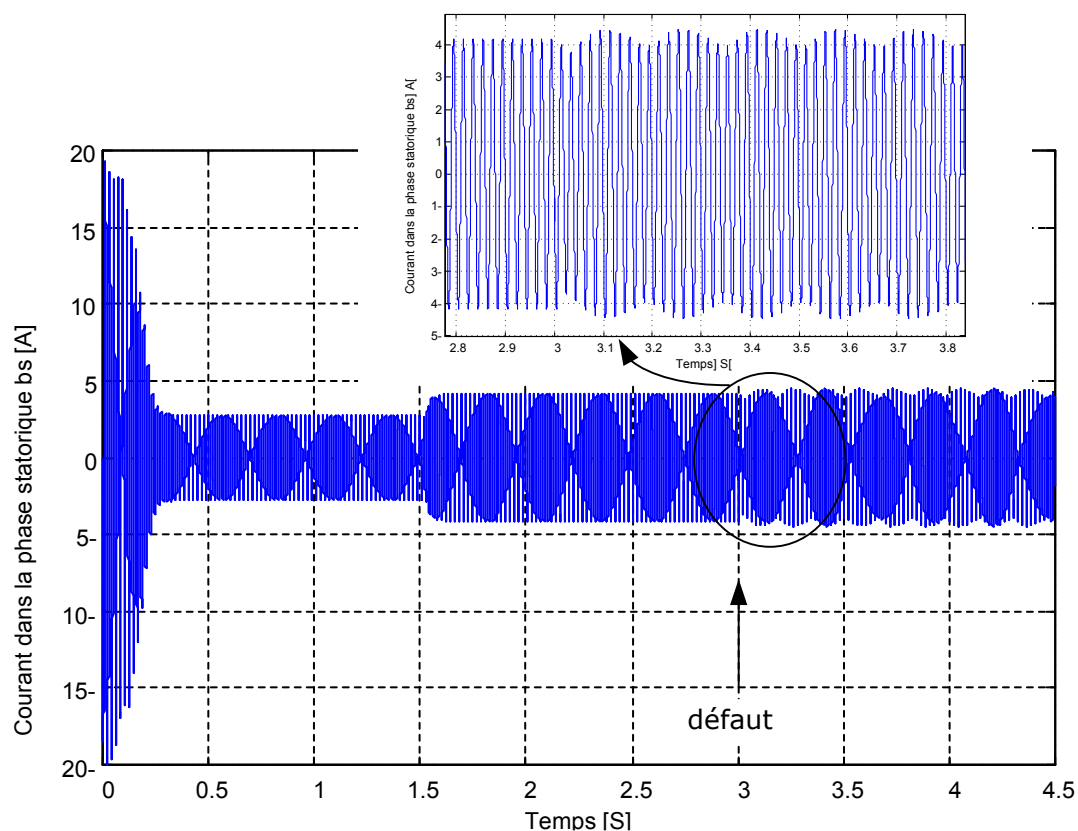


FIG.V.10 Rupture de deux barres non adjacentes

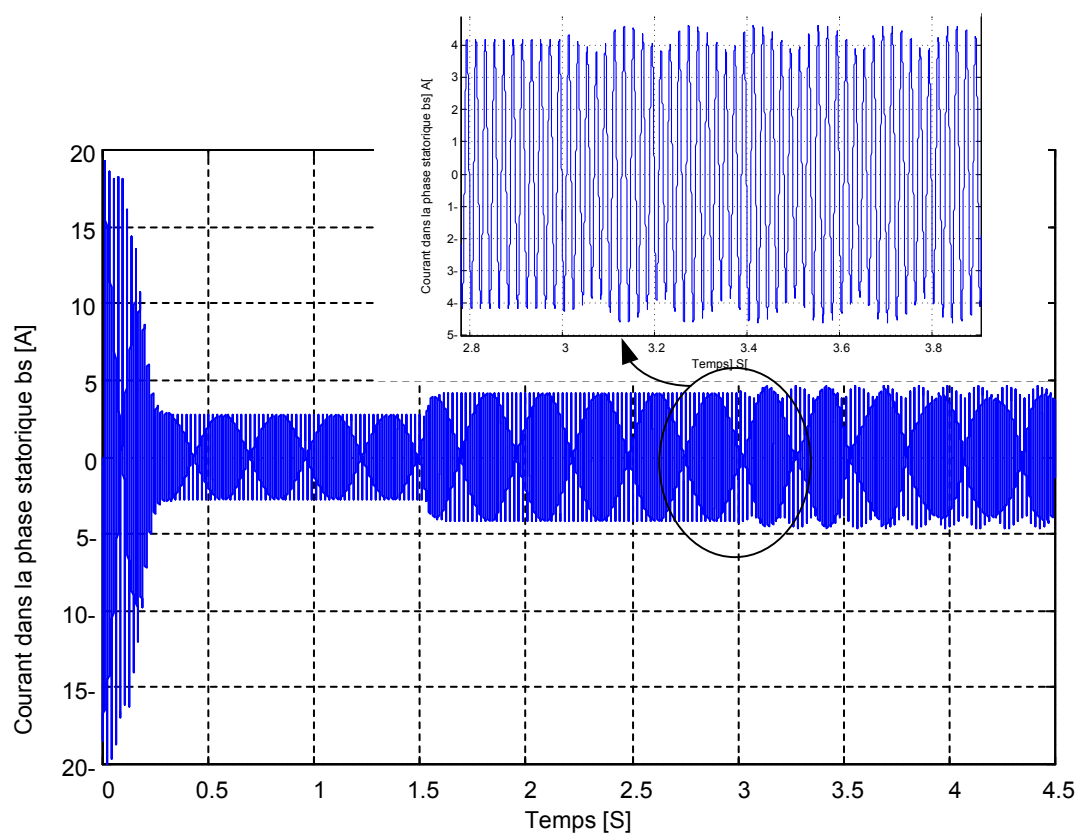


FIG.V.11 Rupture de quatre barres

#### V.6.4 Evolution des courants des barres

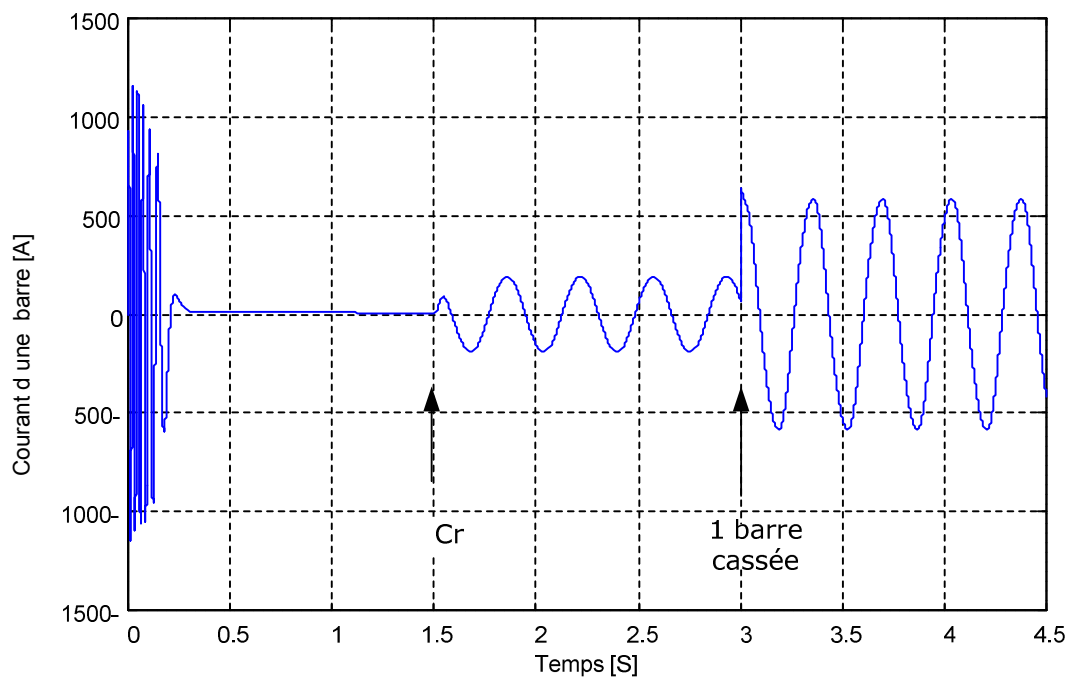


FIG.V.12 Courant dans la première barre adjacente avec la barre cassée

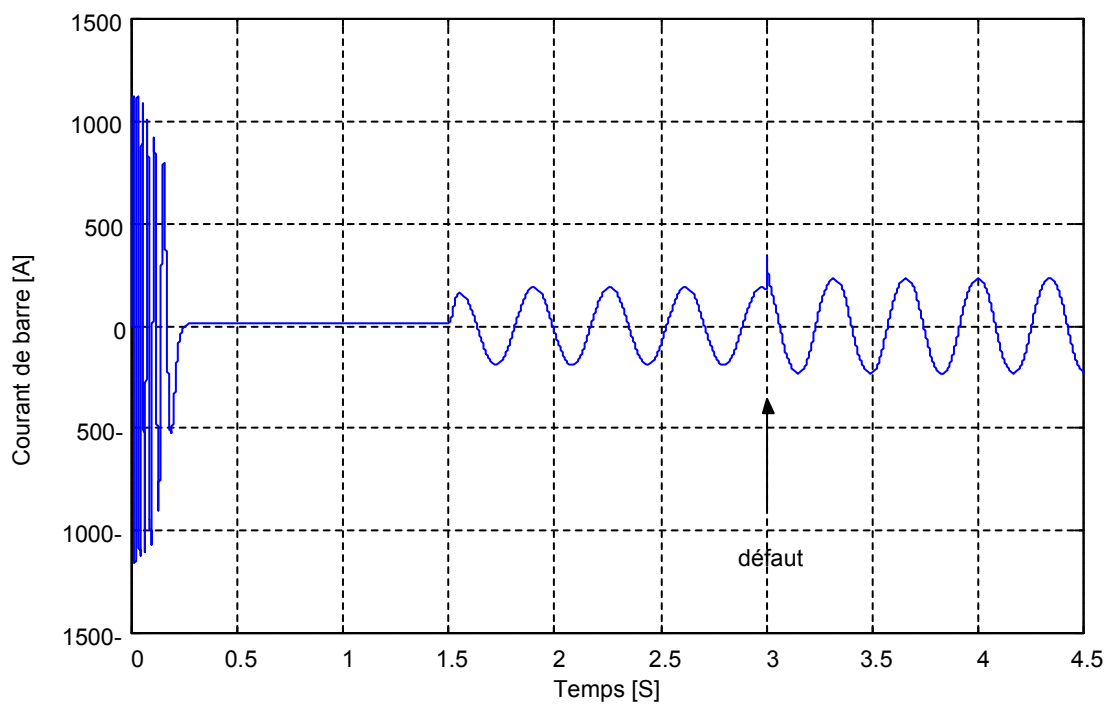


FIG.V.13 Courant dans la deuxième barre adjacente avec la barre cassée

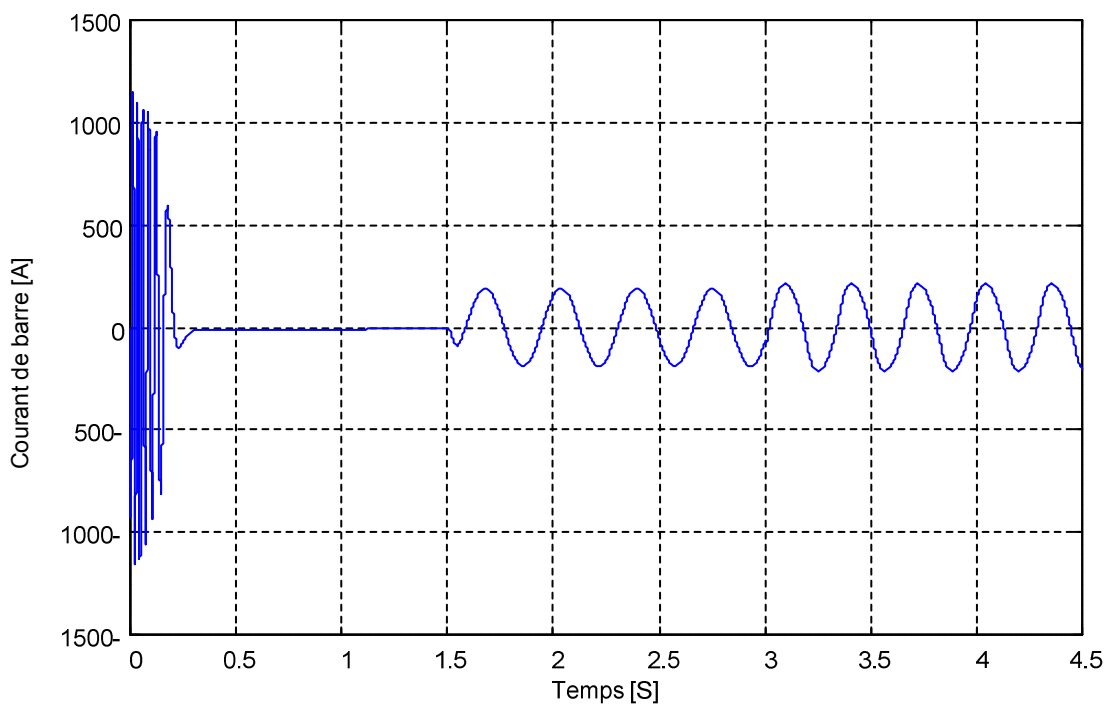


FIG.V.14 *Courant dans une barre non adjacente avec deux barres voisines cassées*

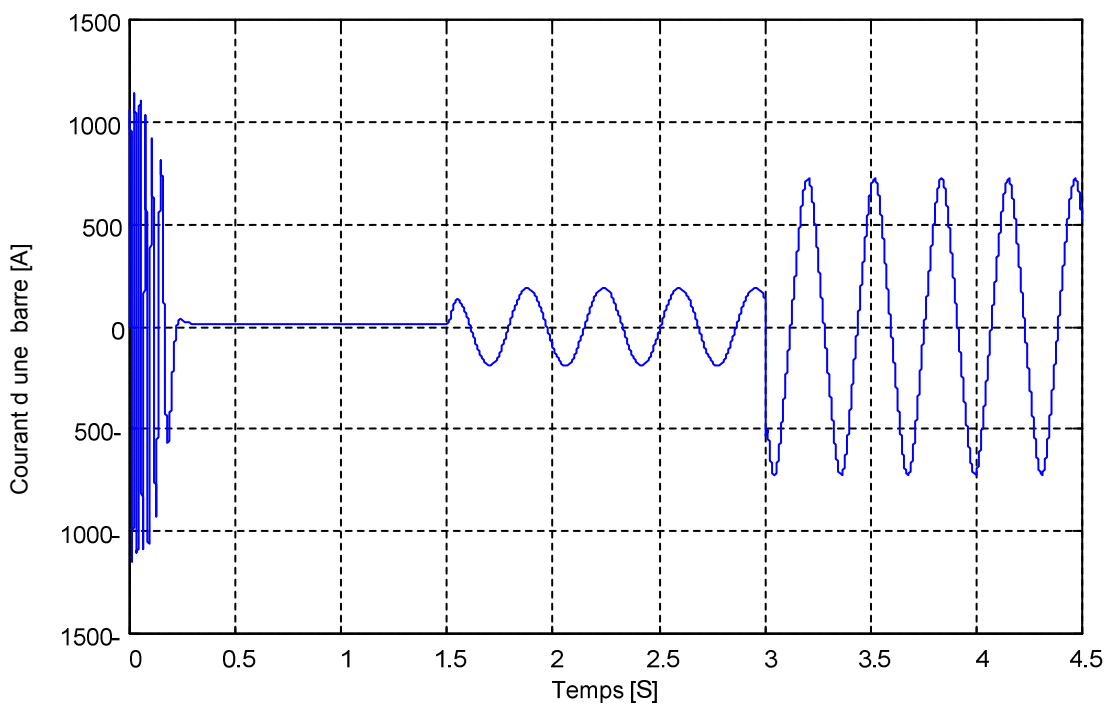


FIG.V.15 *Courant dans une barre adjacente avec deux barres voisines cassées*

### V.7 Validation de modèle de la machine avec défaut de cassure de portions d'anneaux

- Cassure d'une portion d'anneau

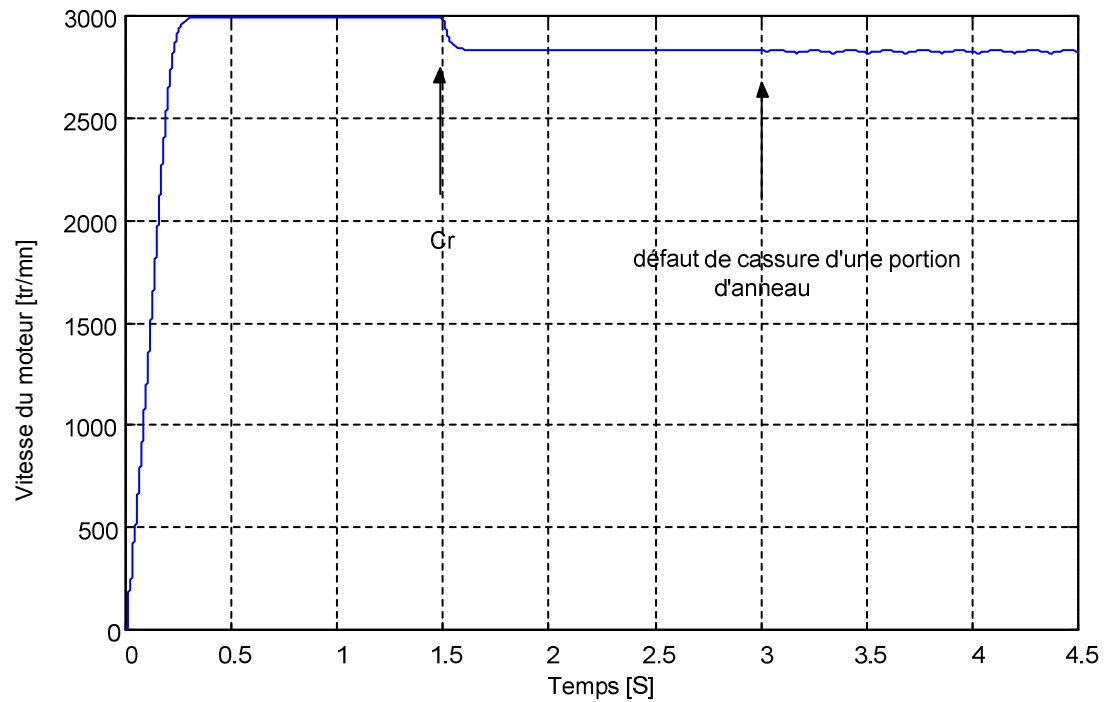


FIG.V.16 Evolution de la vitesse de rotation

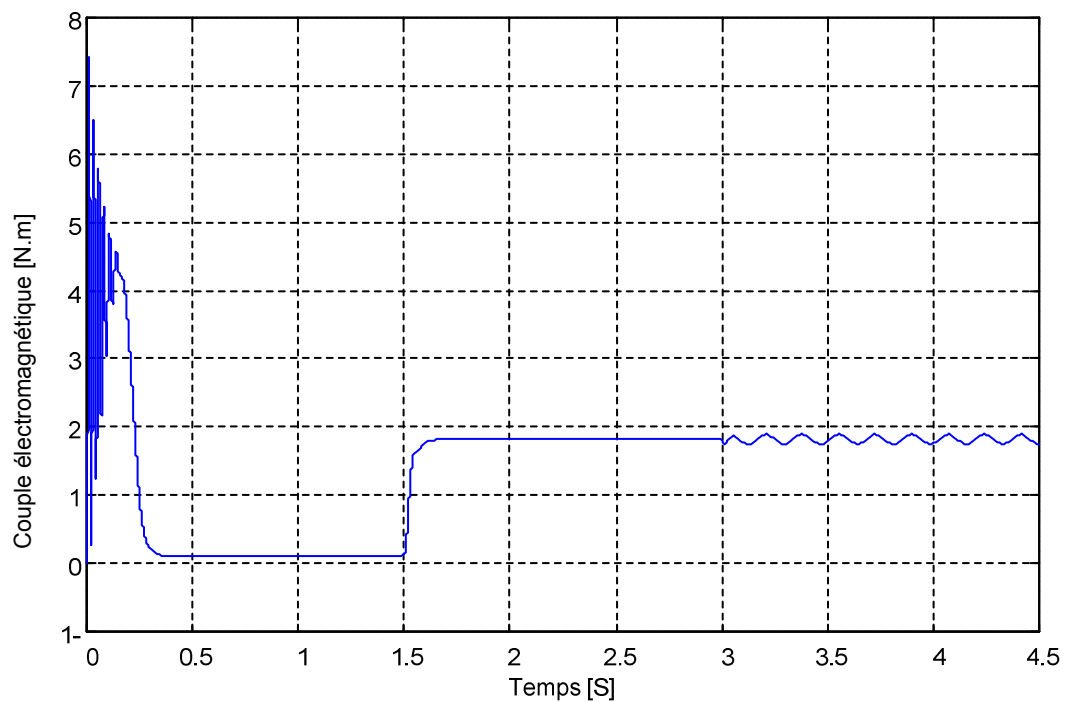


FIG.17 Evolution du couple électromagnétique

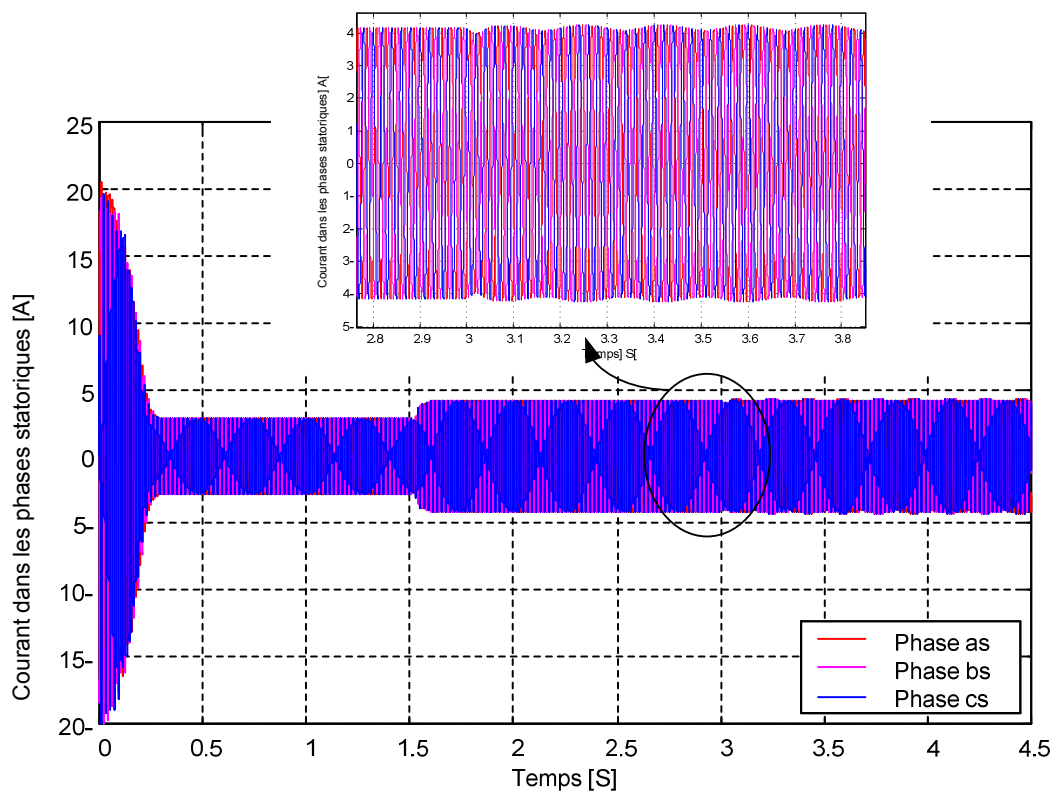


FIG.18 Evolution des courants statoriques

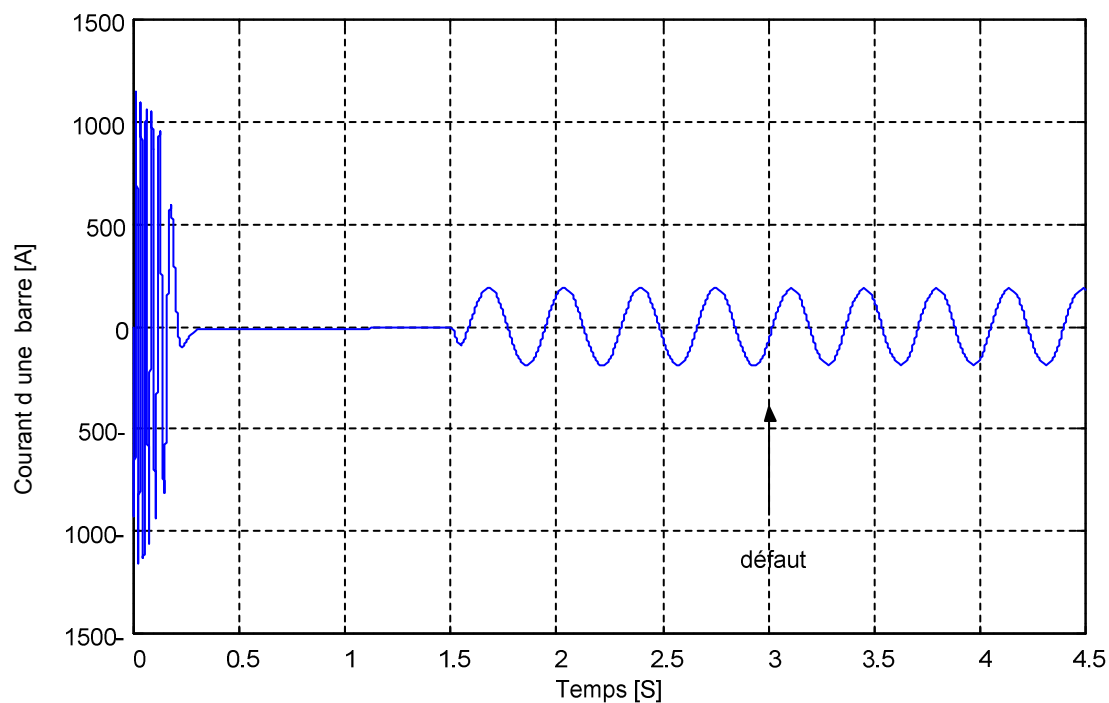


FIG.19 Courant dans une barre non liée à la portion d'anneau cassée

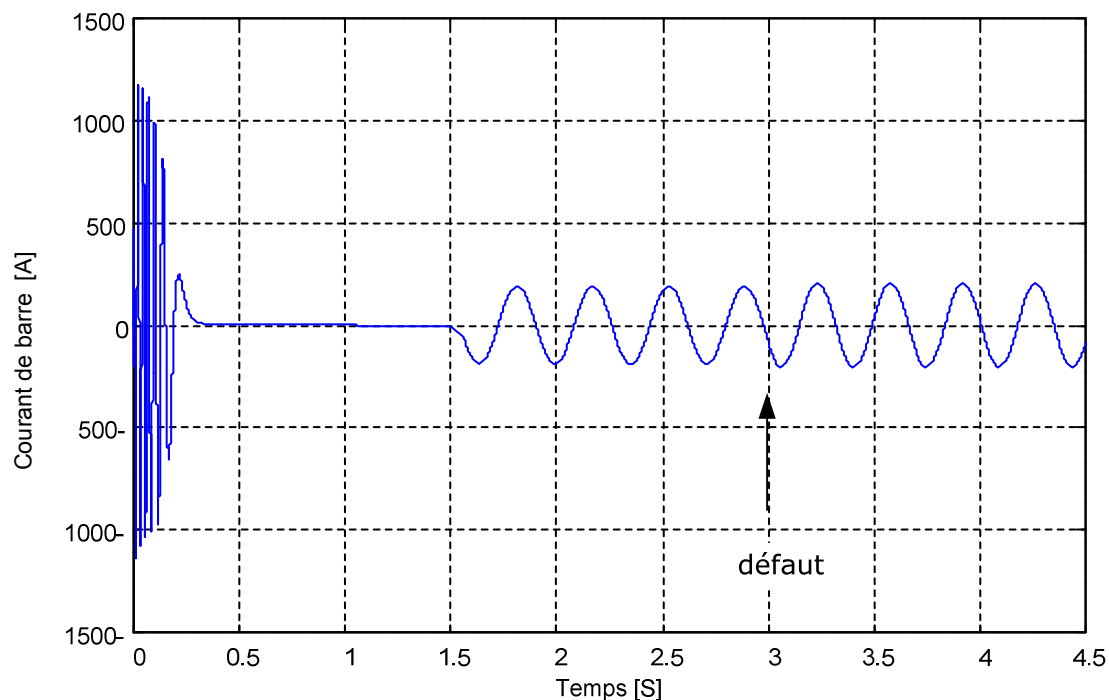


FIG.20 Courant dans une barre lié à la portion d'anneau cassée

- Cassure de deux portions d'anneaux

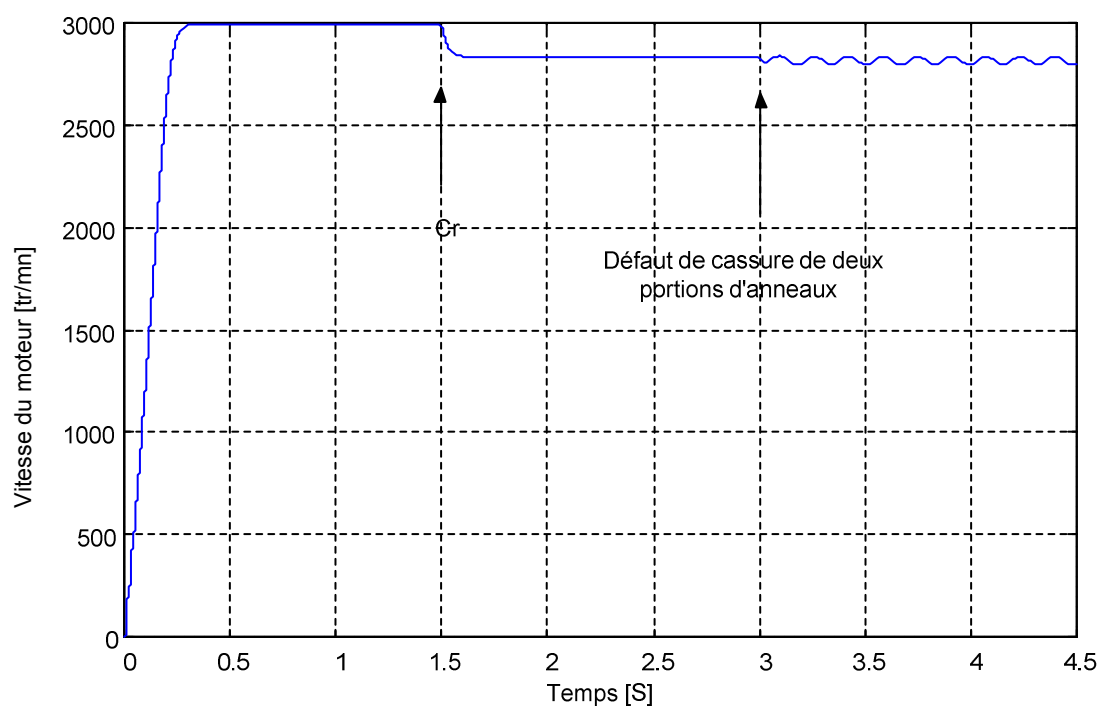


FIG.21 Evolution de la vitesse de rotation

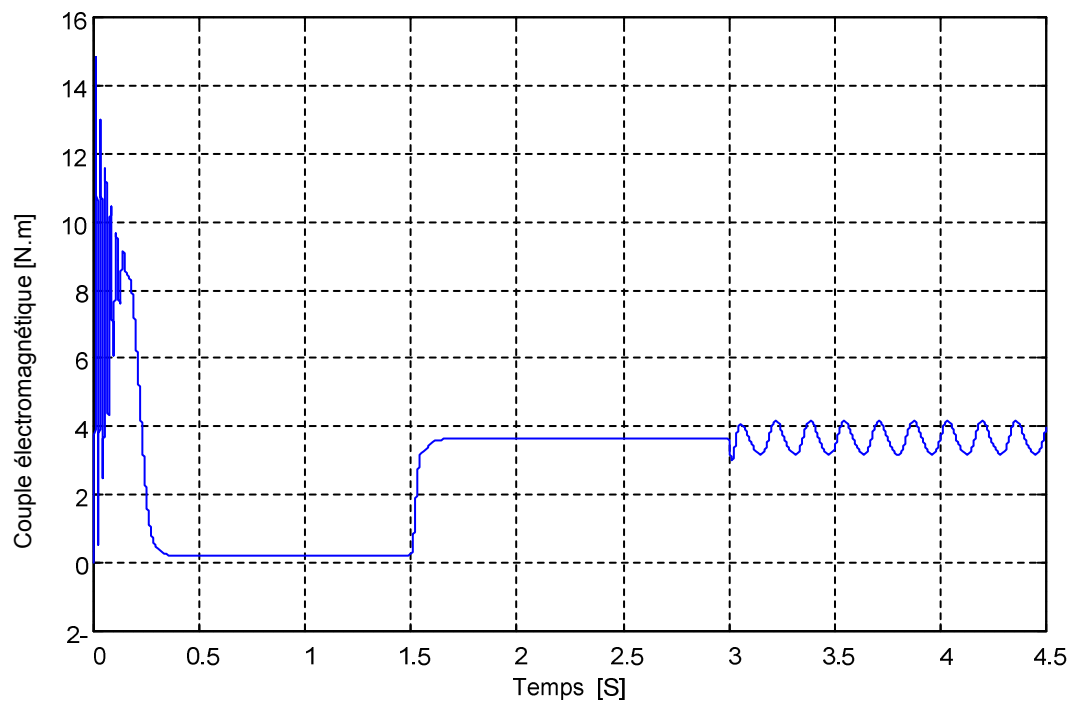


FIG.22 Evolution du couple électromagnétique

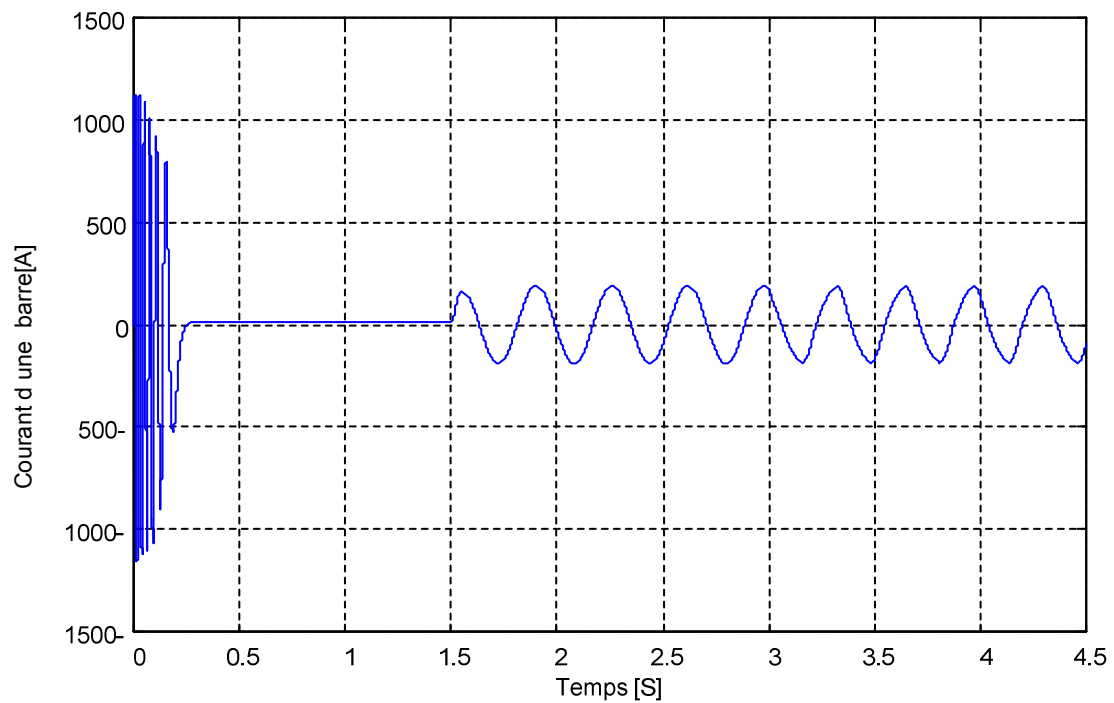


FIG.23 Evolution du courant de barre

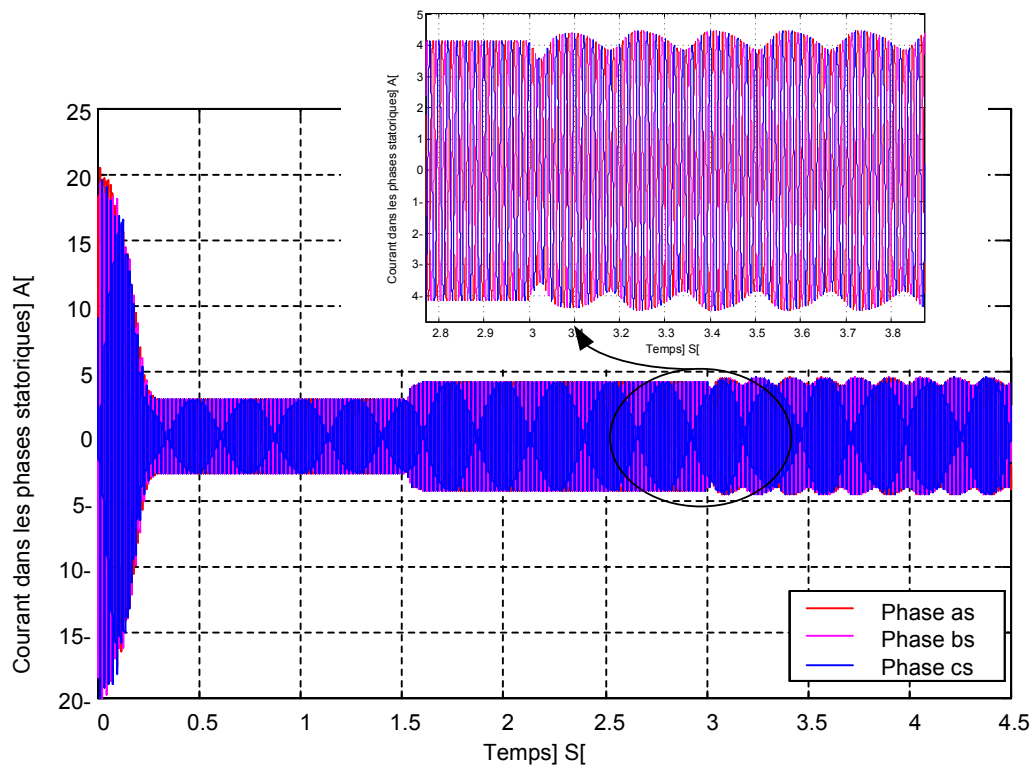


FIG.24 Evolution des courants statoriques

### V.8 Conclusion

L'étude effectuée dans cette partie, nous a permis de mettre en évidence un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de défaut. Le modèle utilisé permet de simuler pratiquement tout les défauts envisageables dans les circuits rotoriques. Dans un premier temps, nous avons étudié la rupture de barres rotoriques, et ses influences sur le comportement de la machine. Nous avons ensuite décrit brièvement le modèle d'un rotor à cage avec une rupture de portions d'anneaux de court-circuit. Les conséquences de ces défauts s'obtiennent en augmentant la résistance de la barre incriminée (ou la résistance de la portion d'anneau considérée). Les résultats de simulation montrent que la rupture de barre ou de portion d'anneau au rotor cause des oscillations dans les courants statoriques qui induisent des ondulations dans le couple électromagnétique, qui elles même provoquent des oscillations de la vitesse de rotation de la machine, engendrant ainsi des vibrations mécaniques. Les courants dans les barres du rotor sont les premiers à être affectés par le défaut. Les courants dans les barres adjacentes aux barres cassées atteignent des valeurs très importantes et peuvent dépasser le double du courant des autres barres, ce qui cause un échauffement excessif et engendre la cassure de ces barres. Ces résultats sont en très bonne conformité avec ceux trouvés par d'autres travaux [Baghli, 99] [Didier, 04][Menacer, 04].

Dans les applications industrielles, les machines électriques, nécessitent une détection rapide de leurs défaillances à cause de leurs utilisations fréquentes dans la plupart des domaines industriels. La maintenance de ces machines justifie l'accent mis sur la recherche dans le diagnostic de défauts des entraînements électriques, notamment en vitesse variable.

Le travail présenté dans ce mémoire a traité donc du diagnostic des défauts statoriques et rotoriques pouvant survenir au sein des machines asynchrones. Ce domaine très vaste, ouvre de larges perspectives pour ces différents types de machine. L'étude des défauts a un double objectif :

- ✓ comprendre leur genèse de manière à prévoir leur gravité et leur développement.
- ✓ Analyser leur impact sur le comportement de la machine et en déduire les signatures permettant, a posteriori, de remonter jusqu'à la cause de la défaillance. Il est donc important de développer des outils de diagnostic pour détecter de manière précoce ces défauts.

L'objectif est avant tout de posséder un modèle de la machine asynchrone qui met en évidence l'influence des défauts sur les grandeurs mesurables de la machine, principalement les courants, afin d'étudier les phénomènes mis en jeu. Deux approches sont possibles, la première s'appuie sur la distribution des champs et des courants en tout point de la machine, et permet de simuler son fonctionnement en régime de défaut, cette méthode coûteuse en temps de calcul, et nécessite la connaissance des paramètres géométriques et des caractéristiques des matériaux relatifs au moteur asynchrone. La seconde approche dite méthode des Circuits Electriques Magnétiquement couplés (**CEMC**), consiste à modéliser le rotor de la machine par des mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement, c'est à cette dernière que nous nous sommes intéressée afin de disposer d'un modèle mathématique où les paramètres mesurables apparaissent explicitement et ne nécessitent pas d'outils de calcul complexes. Les défauts étudiés sont le court-circuit, et la rupture de barres et d'anneaux de circuit-circuit.

Pour aborder cette étude, nous avons établi un état de l'art sur la constitution de la machine asynchrone en mettant l'accent sur les possibilités d'apparition des défauts tant au stator qu'au rotor ainsi que les divers outils utilisés pour la détection et le diagnostic des défauts et les différents types de maintenance. Nous nous sommes intéressés ensuite à la présentation d'un modèle réel de la machine asynchrone triphasée à rotor bobiné, en développant les différentes équations régissant le fonctionnement de la machine, une représentation d'état est alors obtenue

dont la résolution permet de retrouver l'évolution de toutes les grandeurs de la machine. Un programme écrit sous **MATLAB** nous a permis de valider ce modèle.

Deux modèles de défaut simple à mettre en œuvre ont été donc définis. Le premier permet d'expliquer un court-circuit inter-spores sur la même phase statorique pour la machine asynchrone à rotor bobiné. Le second tient compte du déséquilibre de la matrice résistances rotoriques en situation de défaut de type rupture de barres pour la machine à cage. Cette modélisation découle de la notion «différentiel », traduit par la création d'un champ magnétique supplémentaire dans la machine en présence de défaut.

Nous avons pu établir que lors de la rupture de barre ou de portion d'anneau au rotor, les barres adjacentes sont les plus sollicitées. Des oscillations apparaissant sur le couple électromagnétique et sur les courants absorbés. Les courts-circuits au bobinage statorique augmentent les amplitudes des courants dans les trois phases statoriques et dans le circuit électrique du rotor.

Les résultats de simulation des deux modèles sont convaincants parce qu'ils concordent avec ceux publiés dans plusieurs travaux

En conclusion, ce travail pourrait donner lieu à des études complémentaires tels que

- Approfondir l'étude des défauts dans la machine, en particulier les défauts mécaniques et magnétiques
- L'étude de l'association machine asynchrone- convertisseur et la prise en compte des harmoniques.
- Les méthodes de diagnostic doivent être améliorées, c'est-à-dire que des essais complémentaires sur des moteurs de différentes puissances doivent être effectuées pour les rendre plus fiables et plus sûres.

# **Annexes**

**A.1 Paramètres de la machine asynchrone à rotor bobiné****A.1.1 Caractéristiques nominales**

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Puissance nominale        | $P_n = 3 \text{ Kw}$   |
| Tensions nominales        | 220V/380V              |
| Fréquence                 | 50Hz                   |
| Nombre de paires de pôles | $p = 1$                |
| Couple nominale           | $C_n = 10 \text{ N.m}$ |

**A.1.2 paramètres de la machine**

| Désignation                                     | Symbole  | Valeur    | Unité                 |
|-------------------------------------------------|----------|-----------|-----------------------|
| Résistance de l'enroulement statorique          | $R_s$    | 2.86      | $[\Omega]$            |
| Résistance de l'enroulement rotorique           | $R_r$    | 2.756     | $[\Omega]$            |
| Inductance propre de l'enroulement statorique   | $L_s$    | 0.397     | $[\text{H}]$          |
| Inductance propre de l'enroulement rotorique    | $L_r$    | 0.397     | $[\text{H}]$          |
| Inductance de fuite au stator                   | $L_{sf}$ | 0.009594  | $[\text{H}]$          |
| Inductance de fuite au rotor                    | $L_{rf}$ | 0.009594  | $[\text{H}]$          |
| Inductance cyclique de l'enroulement statorique | $L_{sc}$ | 0.6099    | $[\text{H}]$          |
| Inductance cyclique de l'enroulement rotorique  | $L_{rc}$ | 0.6099    | $[\text{H}]$          |
| Inductance mutuelle entre le stator et le rotor | $M_{sr}$ | 0.3953    | $[\text{H}]$          |
| Moment d'inertie                                | $J$      | 0.023976  | $[\text{Kg.m}^2]$     |
| Coefficient de frottement visqueux              | $f$      | 0.0014439 | $[\text{N.m.s / rd}]$ |

**A.2 paramètres de la machine asynchrone à cage d'écureuil**

La machine asynchrone à cage utilisée, est une machine de 1.1Kw, de deux paires de pôles. Le stator de cette machine se compose de 160 encoches alors que la cage se compose de 16 barres. La longueur active du rotor est de 65 m, l'épaisseur d'entrefer est de 0.00025m, et le rayon de la machine au milieu de l'entrefer 0.03575m

**A.2.1 Caractéristiques nominales**

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Puissance nominale     | $P_n = 1.1 \text{ Kw}$          |
| Tension nominale       | 220V/380V                       |
| Courant nominal        | $I_n = 4.5/2.6$                 |
| Vitesse nominale       | $\Omega_n = 2850 \text{ tr/mn}$ |
| Nombre paires de pôles | $p = 1$                         |

## A.2.2 paramètres de la machine

| Désignation                                    | Symbole  | Valeur        | Unité                |
|------------------------------------------------|----------|---------------|----------------------|
| Résistance d'une barre rotorique saine         | $R_b$    | $150.10^{-6}$ | [ $\Omega$ ]         |
| Résistance totale de l'anneau de court circuit | $R_e$    | $72.10^{-6}$  | [ $\Omega$ ]         |
| Inductance principale statorique               | $L_s$    | 0.018         | [H]                  |
| Inductance d'une barre rotorique               | $L_b$    | $10^{-7}$     | [H]                  |
| Inductance totale de l'anneau de court-circuit | $L_e$    | $10^{-7}$     | [H]                  |
| Inductance de fuite statorique                 | $L_{fs}$ | 0.0018        | [H]                  |
| Moment d'inertie                               | $J$      | 0.006093      | [Kg.m <sup>2</sup> ] |
| Coefficient de frottement visqueux             | $f$      | 0.000725      | [N.m.s / rd]         |

### B.1 Développement analytique de la méthode numérique Rung-Kutta d'ordre quatre

Après avoir décrit le modèle de la machine asynchrone à cage et à rotor bobiné, nous abordons l'aspect lié à la simulation de celles-ci.

Les tensions appliquées aux bobinages statoriques sont données :

$$V_1 = V_m \cdot \sin(\omega_s t)$$

$$V_2 = V_m \cdot \sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_3 = V_m \cdot \sin\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$V_m = 310V$  Pour le cas de la machine asynchrone à rotor bobiné et  $280V$ , pour la machine asynchrone à cage.

Etant donné que les équations obtenues sont non linéaires et qu'une méthode numérique doit être mise en œuvre pour parvenir à la résolution, nous avons choisi la méthode de Rung-Kutta d'ordre quatre. Cette dernière est méthode d'analyse numérique d'approximation de solutions d'équations différentielles, elle est basée sur l'évolution des coefficients intermédiaires.

Considérons une équation différentielle  $\frac{dX}{dt} = F(X(t), t)$

$$K_1 = F(X(t), t)$$

$$K_2 = F\left(X(t) + K_1 \cdot \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$K_3 = F\left(X(t) + K_2 \cdot \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right)$$

$$K_4 = F(X(t) + K_3 \cdot \Delta t, t + \Delta t)$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \frac{K_1 + 2(K_2 + K_3) + K_4}{6} \cdot \Delta t$$

L'idée est que la valeur suivante  $X(t + \Delta t)$  est approchée par la somme de la valeur actuelle  $X(t)$  et du produit de la taille de l'intervalle  $\Delta t$  par la pente estimée. La pente est obtenue par une moyenne pondérée de pentes :

- $k_1$  est la pente au début de l'intervalle ;
- $k_2$  est la pente au milieu de l'intervalle, en utilisant la pente  $k_1$  pour calculer la valeur de  $X$  au point  $t_n + \Delta t / 2$

- $k_3$  est de nouveau la pente au milieu de l'intervalle, mais obtenue cette fois en utilisant la pente  $k_2$  pour calculer  $X$ .
- $k_4$  est la pente à la fin de l'intervalle, avec la valeur de  $X$  calculée en utilisant  $k_3$ .

Le pas de simulation  $\Delta t$  dépend de  $([A]^{-1} \cdot [B])$  il faut évaluer  $\Delta t_{max}$  le maximum, utilisable.

En prenant

$$([A]^{-1} \cdot [B]) = \begin{bmatrix} \lambda_1 & x & \cdots & y \\ h & \lambda_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & z \\ k & \cdots & n & \lambda_i \end{bmatrix}$$

La trace de cette matrice est donnée par :  $\sum \lambda_i$

Soit :  $\sum \lambda_i = \frac{1}{T_i}$ , le pas de simulation sera alors :  $\Delta t \leq \frac{1}{|\sum \lambda_i|}$

# **Bibliographie**

- [Adriano, 06] M. Adriano, B.S. da Silva « Induction motor, fault diagnostic and monitoring method. » *Marquette University, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Electrical and Computer Engineering Milwaukee, Wisconsin May 2006*
- [Arqués, 96] Phillippe. Arqués « Diagnostic prédictif de l'état des Machines.» *Edition Masson, Paris 1996*
- [Bachir, 02] Smail Bachir, « modélisation et diagnostic de la machine asynchrone par identification paramétrique à vitesse constante. » *Thèse de doctorat, Ecole Supérieur d'ingénieur de Poitiers, 2002*
- [Baghli, 99] Lotfi Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génériques. » *Thèse de doctorat, université de Nancy 1, Janvier 1999.*
- [Benbouzid, 00] H.Benbouzid, «A review of induction motors signature analysis as a medium for fault detection. » *IEEE Transaction On Power Electronics, Vol.7, N°5, October,00.*
- [Bigret, 95] R.Bigret, et J.L. Férion , «Diagnostic- maintenance – disponibilité des machines tournantes .» *Edition Masson . Paris. Décembre 1995*
- [Billini, 00] A.Bellini, F.Filippetti, G. Franceschini, C.Tassoni, and G.B.Kliman a « Correct quantification of induction machines broken bars trough input electric signals .» *ICEM'00, Espoo, Finland, pp.781-78528-30 aout 2000*
- [Billini, 01] A.Bellini, F.Filippetti, G. Franceschini, C.Tassoni, and G.B.Kliman «Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis. » *IEEE transactions Industry Applications, vol 37, PP.1248-1225, Septembre 2001.*

- [Bouchard, 97] R.Bouchard, G. Olivier «Conception des moteurs asynchrones triphasés. » *Edition Corrigée* ,1997.
- [Bouharkat, 06] Malek Bouharkat, «Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique. » *Thèse de doctorat, Université de Batna*, 2006.
- [Boucherma, 06] M.Boucherma, M.Y.Kaika, A.Khezzar «Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effects. »*Journal of Electrical Enginnering*, Vol, 57, NO,4,2006, 193-199
- [Boulenger, 03] A.Boulenger, C. Pauchaud « Analyse vibratoire en maintenance préventive.»*Edition Dunod, Paris*, 2003.
- [Boumegoura, 01] Tarek Boumegoura, « Recherches de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèses d'observateurs en vue de diagnostic. »*Thèse de doctorat, l'école centrale de Lyon*, 2001.
- [Bui Viet Phuong,0.7] Bui Viet Phuong, « Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide. » *Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble*, 2007
- [Casimir, 03a] Roland Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissances des formes. » *thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon*, 2003.
- [Casimir, 03b] R.Casimir, E.Bouteleux, H.Yahoui, G.Clerc (CEGELY),H.Henao, C.Delmotte, G-A.Capolino(CREA), G.Rostaing, J-P.Rognon (LEG),E.Foulon, L.Loron (GE44), G.Didier, H.Razik (GREEN), G.Houdouin, G.Barakat, B. Dakyo (GREAH), S.Bachir, S.Tnani, G.Champenois,J-C. Trigeassou (LAI), V.Devanneaux, B.Dagues, J.Faucher (LEEI) « comparaison de plusieurs méthodes de modélisation et de

- diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts.» *EF' 2003 Electrotechnique du futur 9 et 10 Décembre 2003 Supélec.*
- [Caron, 95] J.P.Caron, J.P. Hautier « Modélisation et commande de la machine asynchrone. » *Edition, Technip, 1995*
- [Devanneaux , 01] V.Devanneaux, H.Kabbaj, B.Dagues et J.Faucher, « An accurate model of squirrel cage induction machines under statci, dynamic or mixed eccentricity.» *Proc. IEEE SDEMPED 2001 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines , Power Electronics and Drives, pp.121-126, 1-3 septembre 2001, Grado, Italie*
- [Devanneaux , 03] V.Devanneaux , B.Dagues, J.Faucher, and G.Barakat, «An accurate model of squirrel cage induction machines under stator faults.» *Elsevier Mathematics and Computers in Simulation N°.63,PP.377-391,2003.*
- [Didier ,04] Gaetan Didier, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence des défaillances.» *Thèse de doctorat, université de Henry poincaré , Nancy-I, 2004*
- [Didier ,01] G Didier,et H.razik, « Sur la détection d'un défaut au rotor des moteurs asynchrones. » *Publié dans la revue 3EI, N°.27 Décembre2001.*
- [Eltabach ,02] M.Eltabach, A. Charara, I. Zein « Kalman filtering and torque spectral analysis for broken bar detection in induction motors. » *15<sup>th</sup> Triennnial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.*
- [Faiz, 06] J.Faiz, B.M.Ebrahimi and M.B.B Sharifian « Time steeping finite element analysis of broken bars faults in a three-phase squirrel- cage induction motor. » *progress In Electromagnetic Research, PIER 68,53-70, 2007.*
- [Faiz,07] J.Faiz, B.M.Ebrahimi « Mixed fault diagnosis in three- phase squirre- cage induction motor using analysis of air- gap magnetic field.» *progress In Electromagnetics Research, PIER 64,239-255, 2006.*

- [Genon,00]            A. Genon, W.Legros « Machines électriques. » *Edition Hermès*            2000
- [Henao,99]            H.Henao, G-A. Capolino, M.Garcia-Melero et M.F. Cabanas, « A new model of the induction motor rotor cage for diagnostics. » *IEEE SDEMPED 1999-Symposium on Diagnostics for Electric Machines, power Electronics and Drives, PP 383-388, Septembre 1999 Gijon, Espagne.*
- [Henao,05]            H.Henao « Détection des défauts de coulage dans les rotors à cage d'écureuil à l'arrêt. » *Journal sur l'enseignement des Sciences et Technologies de L'information et Des Systèmes, Vol 4, hors série 4,6, 2005.*
- [Houdouin, 02]        G.houdouin, G. Barakat, B.Dakyo, E.Destobbeleer and C.Nichita « A coupled magnetic circuit based global method for the simulation of cage induction machines under rotor and stator faults. » *Electrimacs 2002, August 18-21*
- [Isermann , 97]        R.Isermann, P. Balle, « Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical rocess. » *Control Enginnering Practice, Vol.05, NO.05, PP.709-719, 1997*
- [Jayaswal, 08]        P.jawaswal, a.k. wadhwani and K.B. Mulchandani « Machine fault signature analysis. » *Hindawi Publishing corporation International Journal of rotating Machinery volume 2008, Article ID, 583982.*
- [Khatir, 07]            A.F.Khatir, K.E.Hemsas, « Diagnostic des machines asynchrones utilisation du modèle multi enroulements.» *4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007 ; 03-04 November 2007*
- [Khezzar,04]            A. khezzar, M.E.K.Oumaamar, A.Lebaroud and M.Boucherma, « novel stydy of induction motors with broken bar faults. » *Electrical Laboratory of Constantine "LEC", Department of Electrical Engineering, Mentouri University, 25000, Constantine, Algeria,2004.*

- [Khezzar,05] A. khezzar, M.Boucherma, M.E.K.Oumaamar and A.Lebaroud « Rotor cage faults in three phase induction motors by parametric and modified park model. » *Electrical Laboratory of Constantine ‘‘LEC’’, Department of Electrical Engineering, Mentouri University, 25000,Constantine, Algeria*
- [Lahcène, 05] N.Lahcène « diagnostic de défaut au rotor d’une machine asynchrone à cage d’écureuil. » *Mémoire de magister. Ecole Polytechnique d’Alger 2005*
- [Liang, 02] B.Liang, B.S.Payne and A.D.Iwnicki, « Simulation and faults detection of three-phase induction motors. » *Elsevier Mathematics and Computers in Simulation N°.61, PP.1-15, 2002.*
- [Mansouri,05] K.Mansouri, M.Benouareth, N.Doghmane and M.fauzi Karkat. «New approach of parametric spectral analysis used in the diagnosis of induction motors. » *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference On SIGNAL .SPEECH and IMAGE PROCESSING, corfu, Greece, August 17-19, 2005(PP118-122).*
- [Menacer, 04] A.Menacer, M. Nait said, H.Benakcha and S.Drid, « Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bars using Fourier fast transform .» *Journal Of Electrical Enginnering, Vol, 55 N°, 5-6, 2004, 122-130.*
- [Mutrel, 99] L. Mutrel, « Le moteur asynchrone – Régime statique et dynamique-» *Edition Ellipses ,1999.*
- [Nandi, 05] S.Nandi, H.Toliyat and Li. Xiaodong. «Condition Monitoring and fault diagnosis of electrical motors- A Review .» *IEEE Transactions On Energy Conversion, vol, 20,N°,4,Décembre 2005.*
- [Neelam, 07] M.Neelam, D.Ratna «Motor Current Signature Analysis and its applications in induction motor fault diagnosis. » *International Journal of Systeme Application , Engeneering & Developement Volume 2, Issue 1, 2007*

- [Ondel ,06] Olivier Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone. » *Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2006.*
- [Ondl ,05] I.Y.Onel, K.B.Dalci,and I.Senol «Detection of outer raceaxay bearing defects in small induction motors using stator current analysis. » *Sadhana Vol30. Part 6, December2005, PP.713-722.*
- [Razik,03] H.Razik, G.Didier «Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone. » *Chercheur de GREEN. Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy.GREEN.-UHP.- UMR- 7037. Université Henri Poincaré- nancy 1-B.P.239 Janvier 2003.*
- [Schaeffer, 99a] Schaeffer. Emmanuelle « Diagnostic des machines asynchrones, modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts. » *Thèse de doctorat, université de Nantes, Décembre 1999.*
- [Schaeffer , 99b] E.Scheaffer, E.Le Carpentier,E. Zaim, L.Loron « Diagnostic des entraînements électriques : détection de courts-circuits statoriques dans la machine asynchrone par identification paramétriques » *Dix-septième GRETSI, Dannes, 13-17 septembre 1999*
- [Szabo,04] L.Szabo, J.B.Dobai, K.A.Biro, D.fodor, F. Toth « study on squirrel cage fault of induction machines by means of advanced fem based simulations.
- » *Internationa Conference on Automation , Qualité and testing, Robotics, May 13-15, 2004, Cluj-Napoca, Romania*
- [Szabo, 04] L.Szabo, J.B.Dobai, K.A.Biro, « Rotor faults detection in squirrel-cage induction motors by current signature analysis. »*2004 IEEE-TTTC-*
- International Conference on Automation, quality and Testing, Robotics, may 13-15, 2004, Cluj-Napoca, Romania.*

- [Theys, 99] C.Theys, M. Vieira « Localisation de defaults dans les machines asynchrones par des méthodes MCMC » *Dix-septième Colloque GRETSI, Vannes, 13-17 Septembre, 1999*
- [Thorsen, 95] O.V.Thorsen, M.Dalva, « A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminal, and oil refineries. » *IEEE Trans, on Industry Applications, Vol.31, no.5, pp.1186-1196 septembre 1995*
- [Thomson, 03] W.T; Thomson, R.J.Gilmore « Motor current signature analysis to detect faults in induction motors drives- fundamentals data interpretation, and industrial case histories.» *Proceeding of the Thirty- Second Turbomachinery Symposium-2003*
- [Tnani,02] S.Tnani, S. Bachir and G.Champenois, « squirrel cage rotor modeling for broken bars detection. » *Diagnosis by parameter estimation, Proc. ICEM' 2002, Brugges , Belgium , 25-28 August, 2002*
- [Toliyat, 05] H.A.Toliyat, Xiadong.Liv « Condition motoring and fault diagnosis of electrical motors. » *IEEE Trans, on Energy Conversion, Vol 20, no.4, Décembre 2005*
- [Zwingelstein, 95] Gilles. Zwingelstein, « Diagnostic des défaillances –théorie et pratique pour les systèmes industriel. » *Edition Hermès, Paris 1995*