



République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Akli mohand Oulhadj – Bouira

Faculté des sciences et sciences appliquées

Département de Génie électrique



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme Master 2 :

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Thème

**Modélisation et simulation les défauts rotoriques d'un
moteur asynchrone à cage d'écureuil**

Présenté par :

BELACEL Mohammed

BOUDINA Seid

Soutenu le : 30 /09/2018.

Devant le jury composé de :

Mr. BOUHADA (PR)

Mr. BEHLOUL (EX)

Mr. BENSAID (EX)

Encadrée par :

Mme: YASSA.N

Année Universitaire: 2017/2018

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à Mme YASSA.N Pour avoir d'abord proposée ce thème, pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de jurer ce travail.

Enfin, nos remerciements à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

*Avant tout, Nous tient à remercies le bon dieu, et l'unique qui m'offre le courage
et la volonté nécessaire pour affronter les différentes quoi de la vie.*

Je dédie ce modeste travail

A ma famille.

A tous mes amis.

BELACEL Mohammed.

Dédicace

*Avant tout, Nous tient à remercies le bon dieu, et l'unique qui m'offre le courage
et la volonté nécessaire pour affronter les différentes quoi de la vie.*

Je dédie ce modeste travail

A ma mère.

A mon père.

A mes frères et mes sœurs.

A ma famille.

A mes amis et mes collègues de la promotion :

« 2^{ème} Master électromécanique ».

BOUDINA Seid.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Introduction général.....1

Chapitre I : Généralité sur la machine asynchrone

I.1 Introduction..... 3

I.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MAS)..... 3

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone à cage..... 3

I.2.2 Le Stator 4

I.2.3 Le Rotor à cage d'écureuil 4

I.2.3.1. Rotor à cage simple 5

I.2.3.2 Rotor à cage profonde..... 5

I.2.3.3 Rotor à Cage double 5

I.2.4 Paliers 5

I.2.5- Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil 6

I.3 Les différentes causes de défauts d'une machine asynchrone (MAS)..... 7

I.3.1 Les contraintes électriques 7

I.3.2 Les contraintes dynamiques **Erreur ! Signet non défini.**

I.3.3 Les contraintes magnétiques 7

I.3.4 Les contraintes d'environnements..... 7

I.3.5 Les contraintes mécaniques..... 8

I.3.6 Les contraintes thermiques..... 8

I.3.7 Les contraintes de démarrage 8

I.4 Les différentes défaillances d'une machine asynchrone..... 8

I.5 Les défauts mécaniques dans les machines asynchrones..... 9

I.5.1 Défaut de roulement 9

I.5.2 Défaut d'excentricité 10

I.5.3 Les défauts de Flasque 10

I.5.4 Les défauts de l'arbre..... 11

I.6 Les défauts électriques dans la machine asynchrone 11

I.6.1 Les défauts statoriques 11

I.6.2 Les défauts rotoriques 12

I.6.2.1 Rupture de barres..... 12

Sommaire

I.6.2.2 Ruptures d'anneaux.....	12
I.7 Différents méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone.....	12
I.7.1 Diagnostic à partir des méthodes internes (connaissance à priori)	13
I.7.1.1 Diagnostic par mesure de la température	13
I.7.1.2 Diagnostic par mesure des vibrations.....	13
I.7.2 Diagnostic chimiques	14
I.7.3 Techniques magnétiques et électriques	14
I.7.3.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	14
I.7.3.2 Diagnostic par l'analyse des courants statoriques	15
I.8 Conclusion	16

Chapitre II : Modélisation et simulation de la MAS à cage

II.1 Introduction	17
II.2 Mise en équation du modèle de la machine asynchrone saine	18
II.2.1 Equations du stator.....	18
II.2.2 Equations du rotor.....	21
II.3- Système d'équations global de la machine	24
II.4 Validation du modèle de la machine saine	27
II.5Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts.....	28
II.5.1- Le défaut de cassure de barre rotorique.....	29
II.5.2. Simulation de rupture de barres au rotor.....	31
II.5.3Représentation d'état du modèle de rupture de barre	32
II.5.4- Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit.....	32
II.5.5- Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court circuit....	32
II.6 Fonctionnement à vide.....	34
II.7- Modèle de la machine asynchrone avec un fonctionnement en charge $C_r = 3.5N.m$, à $t=0.6s$	37
II.8- Interprétation des résultats de simulation de fonctionnement à vide	42
Conclusion :.....	43

Chapitre III : Diagnostic du MAS en présence de défaillance

III.1 Introduction	44
--------------------------	----

Sommaire

III.2- Modèle de la machine Asynchrone en présence des défauts de cassures de barres.....	44
III.2.1- Résultats de la simulation.....	44
III.2.1.1- Cas d'une barre cassée (N°10) à t=1.4 s.....	44
III.2.1.2 Cas d'une cassure deux barres adjacentes (N° 9 et N° 10) à t=1.4s.....	49
III.2.1.3- Cas d'une cassure de deux barres opposées (N° 2 et N° 10) à t=1.4s.....	53
III.2.1.4- Cas d'une cassure de trois barres simultanément (barres N° 9, 10, et 11) à (1.4s, 1.5s et 2.6s)	57
III.3- Interprétation des résultats	63
III.3.1- Cas d'une barre cassée (N° 10 à t = 1.4s)	63
III.3.2- Cas deux barres adjacentes cassées (N° 9 et N° 10 à t=1.4s).....	63
III.3.3- Cas de cassure de deux barres opposées (N° 2 et N° 10) à t=1.4s	63
III.3.4- Cas de cassure de trois barres simultanément barres N° 9, 10, et 11 à (1.4s, 1.5s et 2.6s)	63
III.4- Analyse spectral du courant statorique	64
III.5- Interprétation des résultats l'analyse spectral du courant statorique	66
III.6- Conclusion	67
Conclusion générale.....	68

Liste des figures

Chapitre (I) Généralité sur la machine asynchrone

Fig. I.1 : Constitution physique du Moteur asynchrone	3
Fig. I.2: Stator (vue d'ensemble).....	4
Fig. I.3 : Rotor à barres d'aluminium.....	4
Fig. I.4 : Cage d'écureuil en aluminium.....	4
Fig. I.5 : Rotor à cage simple.....	5
Fig. I.6 : Rotor à cage profonde	5
Fig. I.7 : Rotor à cage double	5
Fig. I.8 : Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance.....	8
Fig. I.9 : Répartition des défauts pour une machine de grande puissance.....	9
Fig. I.10 : Constitution d'un roulement à billes	9
Fig. I.11 : Représentation de l'excentricité statique, dynamique, et mixte	10
Fig. I.12 : Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques.....	11
Fig. I.13 : Les différents défauts statoriques	11
Fig. I.14 : Défaut rotor à cage a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit.....	12
Fig. I.15 : différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.....	13
Fig. I.16 : Bobine exploratrice pour mesure du flux de fuite axial.....	15
Fig. I.17 : Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique...	16

❖ Chapitre (II) Modélisation du MAS à cage d'écureuil

Fig. II.1 : Structure du stator(a), et du rotor(b).....	18
Fig. II.2 : Schéma équivalent d'une maille du rotor à cage d'écureuil.....	22
Fig. II.3 : Organigramme	28
Fig. II.4 : Deux mailles adjacente	29
Fig. II.5 : Deux mailles adjacente avec une barre cassée	29
Fig. II.6 : Schéma de fonctionnement d'un rotor sain et en défaut	30
• Modèle de la machine asynchrone avec un fonctionnement à vide	
Fig. II.1 : Courant dans la phase statorique A	34
Fig. II.2 : Courant dans la phase statorique B	34
Fig. III.3 : Courant dans la phase statorique C.....	35
Fig. II.4 : Courant dans les trois phases statoriques	35
Fig. III.5 : Courant dans la 1 ^{eme} , 2 ^{eme} , et la 3 ^{eme} barres rotoriques	36
Fig. III.6 : Vitesse de rotation	36

Liste des figures

Fig. II.7 : Couple électromagnétique.....	37
• Modèle de la machine asynchrone avec un fonctionnement en charge (Cr =3.5N.m, à t=0.6s)	
Fig. II.8 : Courant dans la phase statorique A	37
Fig.II.9 : Courant dans la phase statorique B	38
Fig. II.10 : Courant dans la phase statorique C	38
Fig. II.11 : Courant dans les trois phases statoriques	39
Fig. II.12 : Courant dans la barre 1.....	39
Fig. II.13 : Courant dans la barre 2.....	40
Fig. II.14 : Courant dans la barre 3.....	40
Fig. II.15 : Courant dans la 3 ^{eme} , 9 ^{eme} , et 16 ^{eme} barres.....	41
Fig. II.16 : Vitesse de rotation	41
Fig. II.17 : Couple électromagnétique.....	42
Diagnostic du MAS en présence de dé faillance	
Cas d'une barre cassée (N°10) à t=1.4 s	
Fig. III.18 : Courant dans la phase statorique A	44
Fig. III.19 : Courant dans la phase statorique B.....	45
Fig.III.20 : Courant dans la phase statorique C.....	45
Fig. III.21 : Courant dans les trois phases statoriques.....	46
Fig. III.22 : Courant de 10 ^{eme} barre rotorique cassé à t=1.4 s	46
Fig. III.23 : Courant dans 3 ^{eme} barre rotorique.....	47
Fig. III.24 : Courant de 9 ^{eme} barre rotorique	47
Fig. III.25 : La vitesse de rotation du moteur.....	48
Fig. III.26 : Couple électromagnétique	48
• Cas d'une cassure deux barres adjacentes (N° 9 et N° 10) à t=1.4s	
Fig. III.27 : Courant dans la phase statorique A	49
Fig. III.28 : Courant dans la phase statorique B.....	49
Fig. III.29 : Courant dans la phase statorique C.....	50
Fig. III.30 : Courant dans les trois phases statoriques.....	62
Fig.III.31 : Courant de la 9 ^{eme} et la 10 ^{eme} barres rotoriques cassés à t=1.4s	51
Fig. III.32 : Courant de la3 ^{eme} et la 8 ^{eme} barre rotoriques de référence	51
Fig. III.33 : La vitesse de rotation du moteur.....	52
Fig. III.34 : Couple électromagnétique	52

Liste des figures

Cas d'une cassure de deux barres opposées (N° 2 et N° 10) à $t=1.4s$

Fig. III.35 : Courant dans la phase statorique A	53
Fig. III.36 : Courant dans la phase statorique B.....	53
Fig. III.37 : Courant dans la phase statorique C.....	54
Fig. III.38 : Courant dans les trois phases statoriques.....	54
Fig. III.39 : Courant dans la 2 ^{ème} et la 10 ^{ème} barres rotoriques cassés à $t=1.4s$	55
Fig. III.40 : Courant dans la 3 ^{ème} et la 16 ^{ème} barre rotoriques de référence	55
Fig. III.41 : La vitesse de rotation du moteur.....	56
Fig. III.42 : Couple électromagnétique	56

- Cas d'une cassure de trois barres simultanément barres N° 9, 10, et 11
à (1.4s, 2s et 2.6s)

Fig. III.43 : Courant dans la phase statorique A	57
Fig. III.44 : Courant dans la phase statorique A	57
Fig. III.45 : Courant dans la phase statorique A	58
Fig. III.46 : Courant dans les trois phases statoriques.....	58
Fig. III.47 : Courant dans les barres rotoriques 9,10 et 11 ^{ème} cassés à $t=1.4s, 2s$ et $2.6s$	59
Fig. III.48 : Zoom le courant dans la 9 ^{ème} la 10 ^{ème} et la 11 ^{ème} barre rotorique cassées	59
Fig. III.49 : Courant dans toutes les barres rotoriques	60
Fig. III.50 : Courant dans la 3 ^{ème} et la 8 ^{ème} barre rotorique.....	60
Fig. III.51 : Zoom le courant dans la 3 ^{ème} et la 8 ^{ème} barre rotorique	61
Fig. III.52 : La vitesse de rotation du moteur.....	61
Fig. III.53 : Zoom la vitesse de rotation du moteur	62
Fig. III.54 : Couple électromagnétique	62
Fig. III.55 : Spectre de la FFT du courant statorique dans la plage [0-100] Hz	65
Fig. III.56 : Spectre de la FFT du courant statorique en présence d'une cassure de barre	65
Fig. III.57 : Spectre de la FFT du courant statorique en présence d'une cassure de 2 barres adjacentes	65
Fig. III.58 : Spectre de la FFT du courant statorique en présence d'une cassure de 3barres adjacentes	66

Liste des figures

Introduction générale

Les moteurs asynchrones (MAS) sont certainement les machines électriques les plus fréquemment utilisées dans l'industrie vu leurs grandes robustesses, leurs facilités de démarrage, et leurs prix de maintenance bas. Toutes ces qualités justifient le regain d'intérêt de l'industrie vis-à-vis de ce type des machines. Néanmoins, Ces moteurs MAS sont soumis pendant leurs fonctionnements à plusieurs contraintes de différentes natures (électrique, magnétique, mécanique et thermique) ce qui provoque des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator, ou du rotor, ou les deux en même temps. Noter bien que ces défauts peuvent engendrer un arrêt entraînant la perte de production et des réparations coûteuses, et peut y aller jusqu'à la détérioration de la machine.

Pour cela, cet axe de recherche (diagnostic) c'est devenu un axe de référence vu le nombre important des chercheurs qui travail sur lui. Par conséquent, une diversité de travaux de recherche existe dans la littérature de diagnostic, ce qui peut être bénéfique pour la machine elle-même et pour le propriétaire. Tenant l'exemple de l'auteur [1] qui a contribué à la détection des défauts statoriques et rotoriques dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes. De très bons résultats ont été obtenus et la tâche a été faite avec succès.

Ainsi, Surveillance et diagnostic des défauts rotorique et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée a été convenablement présenté par [2]. Alors [3] a fait avec excellence le diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des forme. Ainsi, le facteur commun de ces travaux de recherche est la compréhension du fonctionnement de la machine asynchrone avec et sans défaut rotorique, ce qui nécessite pratiquement un modèle mathématique adéquat décrivant le comportement de la machine.

Dans notre étude, nous utiliserons un modèle basé sur la modélisation de la cage ratorique sous forme de mailles reliées entre elles électriquement et couplées magnétiquement pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone à cage saine et avec défaut (cassure de barre).

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux :

- ✓ Le premier chapitre de ce travail décrit les éléments de construction de la machine asynchrone, le principe de fonctionnement de la machine, ainsi que

Introduction générale

les différents défauts affectant la machine. On outre, nous citerons quelques techniques de détection de ces défauts.

- ✓ Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation (formulation mathématique) du modèle de la machine asynchrone saine, puis le modèle avec défaut en utilisant la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés. A ce stade, nous abordons le problème de la machine à cage présentant des défaillances de structure, dont on se focalisera plus spécialement à la rupture de barres rotoriques, ainsi que et leurs impacts sur le fonctionnement de la machine.
- ✓ Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation du MAS pour les différents cas du fonctionnement avec et sans défaut.
- ✓ La méthode d'analyse spectrale du courant statorique dans le domaine fréquentiel sera détaillée dans le dernier chapitre.

Enfin, on termine par une conclusion générale dont on récapitulera ce qu'on a fait, et on notera à la fin quelques perspectives tirées à travers le travail fait.

I.1 Introduction

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevée et entretien facile. Ainsi, Sa gamme de puissance est établie de quelques centaines de watts à plusieurs centaines de Kilowatts dont sa vitesse de rotation n'est pas liée à la fréquence du réseau d'alimentation. Noter bien que les différents types de moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor dont le stator en principe le même.

I.2 Moteur asynchrone à cage d'écureuil (MAS)

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone à cage

Une machine asynchrone peut se décomposer principalement en trois parties essentielles (Figure. I.1) :

- ❖ un stator fixe (inducteur) portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation
- ❖ un rotor (induit) qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer
- ❖ les palies, partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre moteur [1].

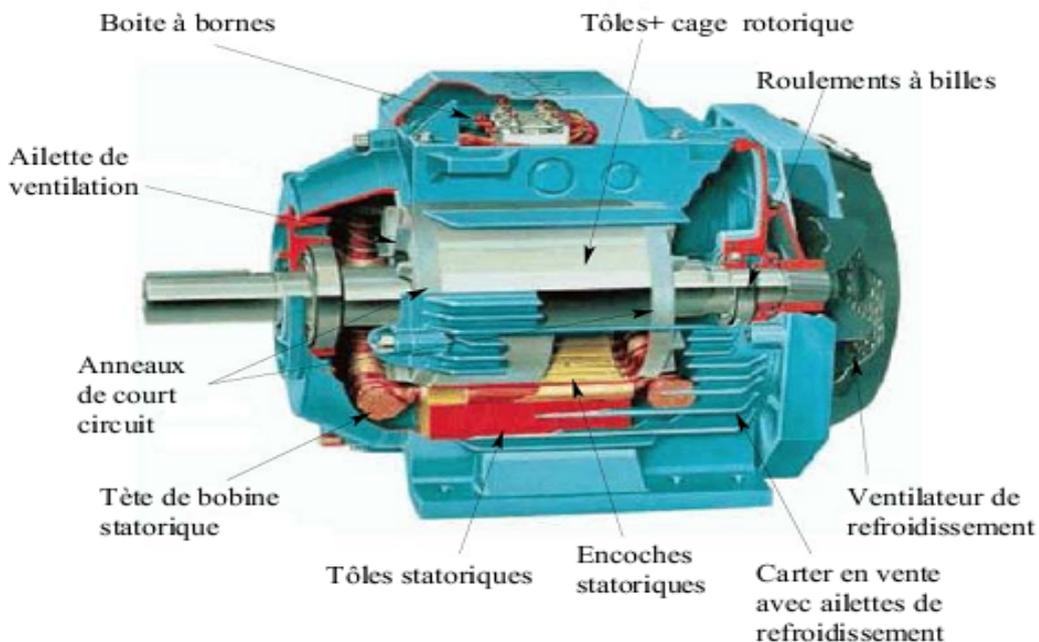


Fig. I.1 Constitution physique du moteur asynchrone

I.2.2 Le Stator

Il est constitué d'une couronne de tôles mince (0.35mm) empilées, caractérisées par des pertes allant de 1.6 à 2.3w/kg à 50Hz. Cette couronne est serrée dans une carcasse. Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches contiennent un enroulement triphasé. Cet enroulement peut être bipolaire, tétra polaire, etc. (Fig. I.2). Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque à bornes [2].

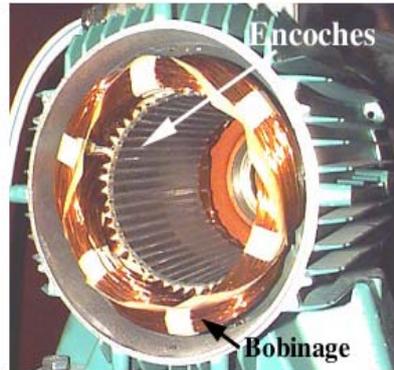


Fig. I.2. Stator (vue d'ensemble)

I.2.3 Le Rotor à cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné [6].

Ainsi, les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur [6]. Noter bien que la construction de la cage en barres est actuellement réservée aux moteurs de grande puissance (Fig. I.3). D'autre part, les moteurs de petites et moyennes puissances ont des cages en aluminium (Fig. I.4) [2].

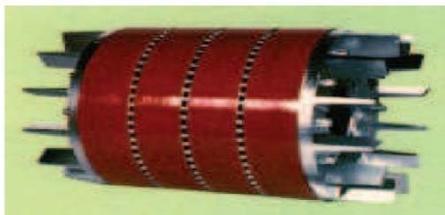


Fig. I.3- Rotor à barres d'aluminium

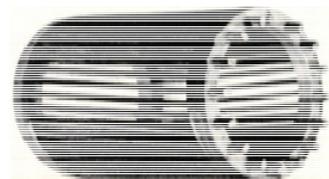


Fig. I.4- Cage d'écureuil en aluminium

Le rotor des moteurs en court-circuit est de trois types :

I.2.3.1. Rotor à cage simple

Les encoches du rotor découpés dans l'acier ont le plus souvent une forme ovale avec un rapport plus au moins grand entre la hauteur et la largeur de l'encoche. Dans ces encoches, des barres en aluminium conductrices sont coulées pour former la cage d'écureuil (voir Fig.I.5) [6].

I.2.3.2 Rotor à cage profonde

C'est une cage constituée d'un type de barre plus profond que la précédente. Lors du démarrage d'un moteur de ce type, un phénomène physique fait circuler le courant dans la périphérie des conducteurs. Comme l'extérieur de la cage a une section plus faible, la résistance est plus élevée et le courant limité. A la fin du démarrage, le courant circule dans toute la surface de la cage (Fig. I.6) [6].

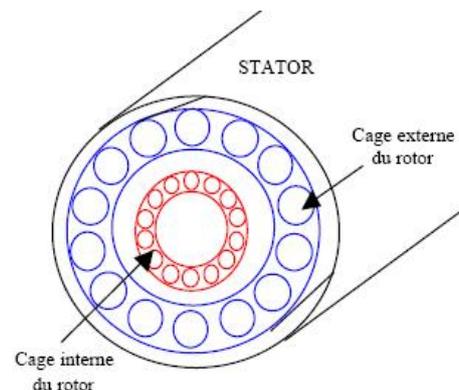
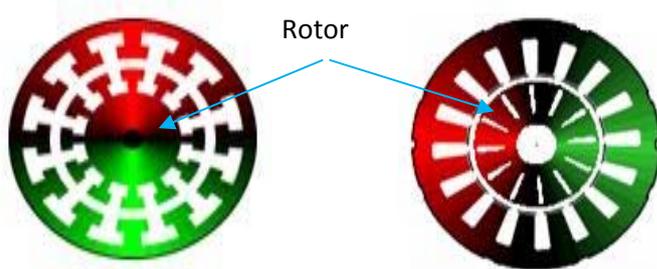


Fig. I.5- Rotor à cage simple. **Fig. I.6-** Rotor à cage profonde. **Fig. I.7-** Rotor à cage double.

I.2.3.3 Rotor à Cage double

Le rotor à double cage d'écureuil (Fig. I.7) comporte une cage supérieure de résistance relativement grande et inductance faible en laiton ou en bronze, et une cage inférieure de faible résistance en cuivre, la première fonctionne au démarrage et la deuxième en régime permanent [6].

I.2.4 Paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage [5].

I.2.5- Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le principe de fonctionnement est basé entièrement sur les lois de l'induction [1]. Premièrement, les tensions d'une ligne triphasée appliquées au stator d'un moteur asynchrone produisent des courants triphasés, ces courants produisent un champ tournant, le champ tournant induit une tension dans les barres du rotor donne naissance à des courant intense dans les barres [4].

Les barres portant un courant et situées dans un champ magnétique, sont soumises à des forces électromagnétiques. Ces forces tendent à entrainer le rotor dans le sens de rotation du champ, l'ensemble des forces agissant sur les conducteurs produit un couple qui met rapidement le rotor en mouvement quand il est libre de tourner. Ainsi, la vitesse de rotor doit être légèrement inférieure à la vitesse synchrone pour produire un courant et un couple suffisant pour vaincre les frottements [4].

La machine asynchrone est caractérisée par le fait que son rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant dans l'entrefer. L'application adéquate d'une tension de pulsation ω_s aux enroulements statoriques d'une machine asynchrone, crée un champ magnétique statorique tournant. Ce champ induit dans le circuit fermé du rotor un champ magnétique rotorique tournant à une vitesse ω_r par rapport au rotor. Quand cette vitesse est additionnée à la vitesse électrique de rotation du rotor ω_s , on obtient selon la relation interne de la machine asynchrone, la pulsation statorique ω_s [13].

$$\omega_s = \omega + \omega_r \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$\omega = g \omega_s \quad (\text{I.2})$$

Le champ statorique tourne à la vitesse :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{I.3})$$

Ou :

ω_s : est la pulsation du courant et de la tension statorique ($\omega_s = 2\pi f$).

P : nombre de paires de pôles.

Le glissement par rapport au champ tournant du stator est exprimé par le rapport :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (\text{I.4})$$

Dans le repère rotorique, toutes les grandeurs électriques ont une pulsation :

$$\omega_r = (1-g)\omega_s \quad (\text{I.5})$$

I.3 Les différentes causes de défauts d'une machine asynchrone (MAS)

La machine asynchrone est considérée comme étant robuste. Néanmoins, pendant leur fonctionnement cette MAS peut être exposé à différents contraintes nocives qui sont généralement de nature thermique, électrique, mécanique, environnementale, dynamique, résiduelle, comme elle peut avoir des défauts de fabrication [5].

I.3.1 Les contraintes électriques

Elles ont des effets directs sur la partie isolante du bobinage, ce qui crée des problèmes diélectrique pouvant entraîner les ruptures des isolants [5].

I.3.2 Les contraintes dynamiques

Elles ont pour conséquence du dépassement dynamique d'origine externe apparaissant sous forme de couples pulsatoires, vibrations, forces centrifuges, augmentation de la vitesse et la contrainte périodique. Ces contraintes peuvent provoquer le décalage de la masse rotorique, la flexion de l'arbre et déformations au niveau des barres rotoriques [5].

I.3.3 Les contraintes magnétiques

- Les effets électromécaniques.
- Les parasites et les vibrations électromagnétiques [5].

I.3.4 Les contraintes d'environnements

Un moteur doit toujours être gardé dans un endroit propre et sec car sa bonne tenue dépend de l'environnement dans lequel il fonctionne. Dans ce contexte, la poussière et l'humidité qui contient des particules métalliques engendre de graves endommagements au

niveau de la surface rotorique et détériore l'isolant ce qui provoque des courts-circuits dans ses enroulements [5].

I.3.5 Les contraintes mécaniques

Elles se présentent sous les formes : mouvement des bobinages et déflexion de l'arbre [5].

I.3.6 Les contraintes thermiques

L'augmentation de température provoque essentiellement la dégradation des isolants des enroulements et contribue à leur vieillissement, engendrant des courts-circuits [1].

Ainsi, les dépassements thermiques sont dus :

- à des variations des tensions.
- au démarrage de moteur.
- à la surcharge du moteur.
- à la défaillance du système de ventilation.
- à l'augmentation de la température ambiante.

I.3.7 Les contraintes de démarrage

Le démarrage est la période la plus dangereuse pour la tenue de l'enroulement rotorique d'un moteur, durant laquelle tous les phénomènes sont aggravés par suite de l'appel important du courant [5].

I.4 Les différentes défaillances d'une machine asynchrone

Une étude statistique effectuée sur les pannes des machines asynchrone de moyenne puissance (de 50KW à 200 KW) a donné les résultats suivants [7] :

Stator : 60%.

Rotor : 20%.

Mécanique : 20%.

Autre : 10%.

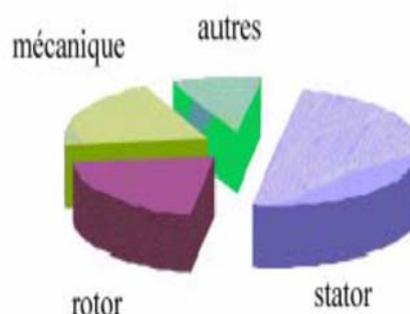


Fig. I.8 Répartition des défauts pour une machine de moyenne puissance

En outre, une autre étude a été faite sur les machines de grande puissance (de 100 KW à 1 MW) a donné les résultats suivants [6] :

1-Stator : 13%.

2-Autres : 34%.

3-Rotor : 08%.

4-Couplage mécanique : 04%.

5-Roulement : 41%.

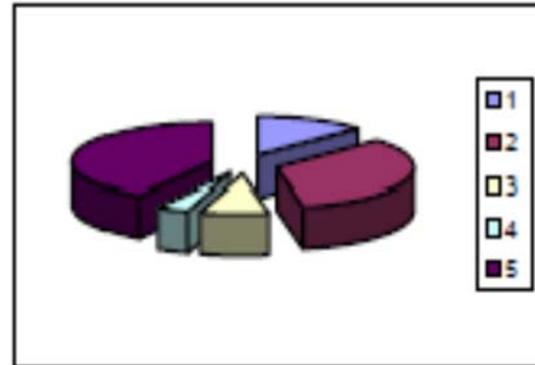


Fig. I.9. Répartition des défauts pour une machine de grande puissance

I.5 Les défauts mécaniques dans les machines asynchrones

I.5.1 Défaut de roulement

Les roulements à billes sont constitués de deux bagues, extérieure et intérieure, entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants (Fig. I.10) [5].

Nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [7] :

- Défaut de bague extérieure.
- Défaut de bague intérieure.
- Défaut de billes.



Fig. I. 10- Constitution d'un roulement à billes

I.5.2 Défaut d'excentricité

L'excentricité est la variation d'épaisseur et l'uniformité de l'entrefer entraîne une répartition non homogène des courants dans le rotor et le déséquilibre des courants statoriques. Le déséquilibre des efforts sur les barres génère un couple globale non constant [7]. Ce défaut peut survenir suite à la flexion de l'arbre, à un mauvais positionnement du rotor par rapport au stator, à l'usure du roulement, ou à un déplacement du noyau statorique [5].

Trois cas d'excentricité sont distingués (voir Fig. I.11) :

a) Excentricité statique

Déformation du corps du stator, positionnement incorrecte du rotor et/ou du stator à l'assemblage [5].

b) Excentricité dynamique

Le centre du rotor n'est plus confondu avec le centre de rotation peut être provoqué par des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement...etc. [5].

c) Excentricité mixte

Combinaison des excentricités statiques et dynamiques dans laquelle l'axe du rotor tourne autour d'un axe différent de celui du rotor [7].

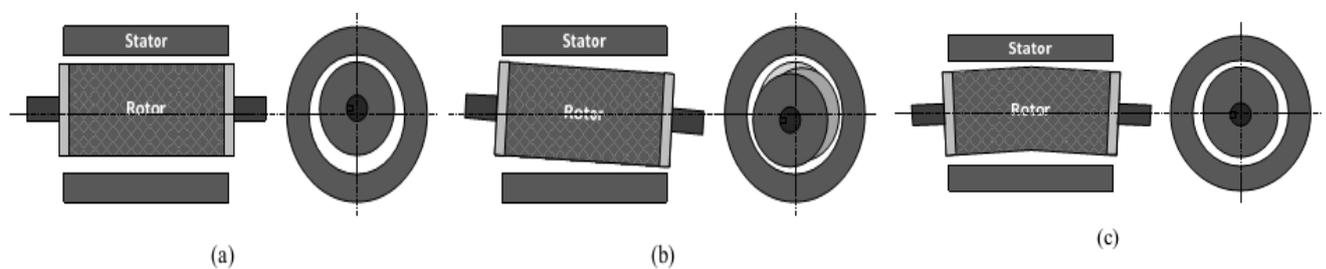


Fig. I.11 Représentation de l'excentricité statique, dynamique, et mixte.

I.5.3 Les défauts de Flasque

Les défauts créés par les flasques sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. Un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité [7].

I.5.4 Les défauts de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant un arrêt de la machine asynchrone [7].

I.6 Les défauts électriques dans la machine asynchrone

I.6.1 Les défauts statoriques

La dégradation de l'isolation électrique engendre des défauts de court-circuit illustrés par la (Fig. I.12). On peut clarifier Les différents défauts possibles de court-circuit par [1], [7]:

- ❖ des défauts inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques,
- ❖ les défauts entre une phase et le neutre,
- ❖ les défauts entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques.

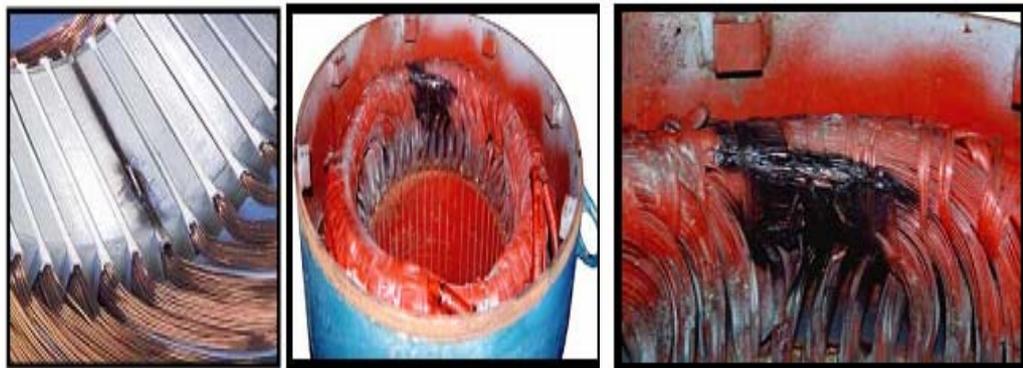


Fig. I.12- Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques

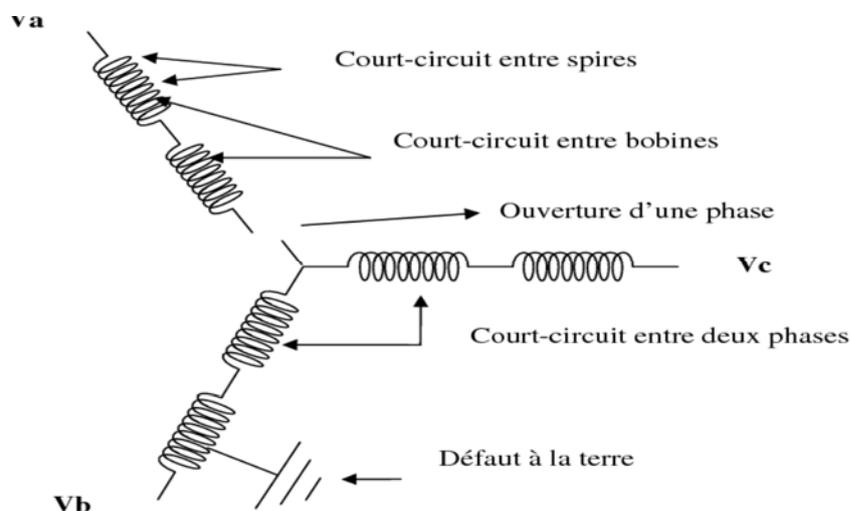


Fig. I.13 : Les différents défauts statoriques

I.6.2 Les défauts rotoriques

I.6.2.1 Rupture de barres

La cassure de barre est l'un des défauts les plus fréquents au rotor (Fig.I.14). Une barre cassée, signifie que le courant dans cette barre est nul [5]. La détérioration des barres réduit la valeur moyenne de couple électromagnétique et augmente l'amplitude de l'oscillation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine [7].

I.6.2.2 Ruptures d'anneaux

Les ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux (Fig. I.14). La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres [7].

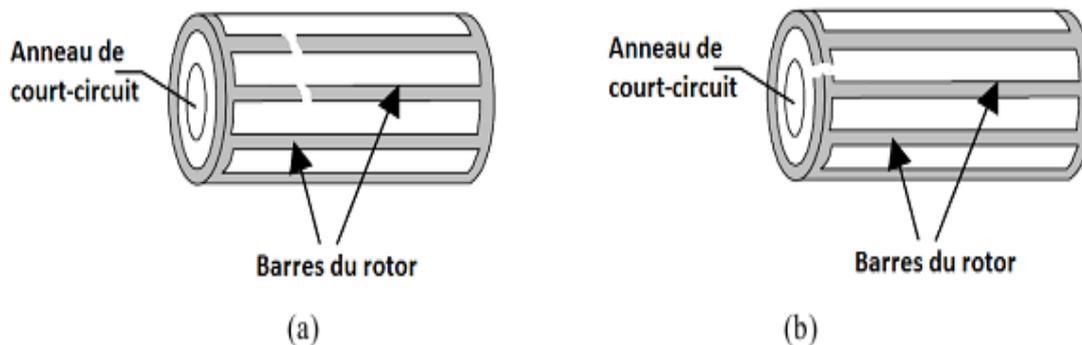


Fig.I.14-Défauts du rotor à cage : a) rupture de barres (b) rupture d'anneau de court-circuit.

I.7 Différents méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures. Par conséquent, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Et pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit), et d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) (Figure I-16)[8].

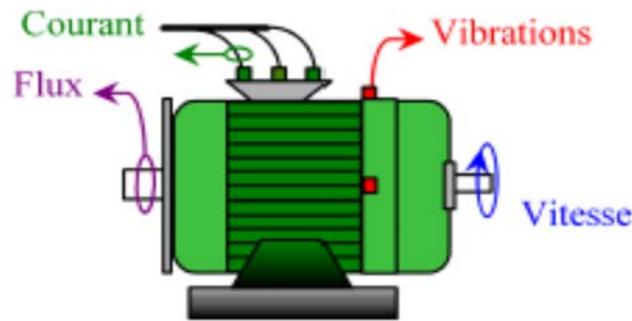


Fig. I.15- Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.

I.7.1 Diagnostic à partir des méthodes internes (connaissance à priori)

I.7.1.1 Diagnostic par mesure de la température

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance. Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements. Elles sont rarement mesurées à cause des problèmes d'obtention de l'isolation électrique contre les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant. Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures lequel peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement isolé par rapport à son instrument de mesure [8].

I.7.1.2 Diagnostic par mesure des vibrations

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques. Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine. Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté, les mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons. Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre. Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, au moment où les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence. Les signaux de vibrations détectés

contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations [8].

I.7.2 Diagnostic chimiques

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [1]. A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison elles peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance. Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation malgré que les machines soient des moteurs électriques. La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostics sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé [8].

I.7.3 Techniques magnétiques et électriques

I.7.3.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Le flux de fuite axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la machine (Fig. I.16) et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall. Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice (F_{em}) induite qui est liée aux flux de fuite axiaux. Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu d'harmoniques des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est directement en relation avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor. La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite

axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [8].

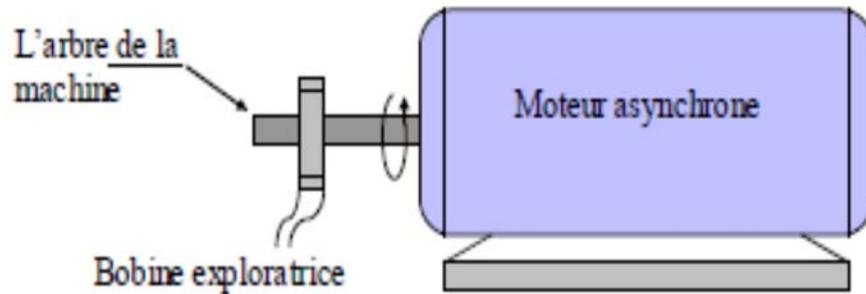


Fig. I.16 : Bobine exploratrice pour mesure du flux de fuite axial

I.7.3.2 Diagnostic par l'analyse des courants statoriques

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique. Celle-ci est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la Fmm. Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la Fmm en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique, cas d'un moteur à cage [8].

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone, l'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor. Ce courant produit une Fmm pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est (gf) . Cette Fmm produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2g)f$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2g)f$ [8] (fig. I.17).

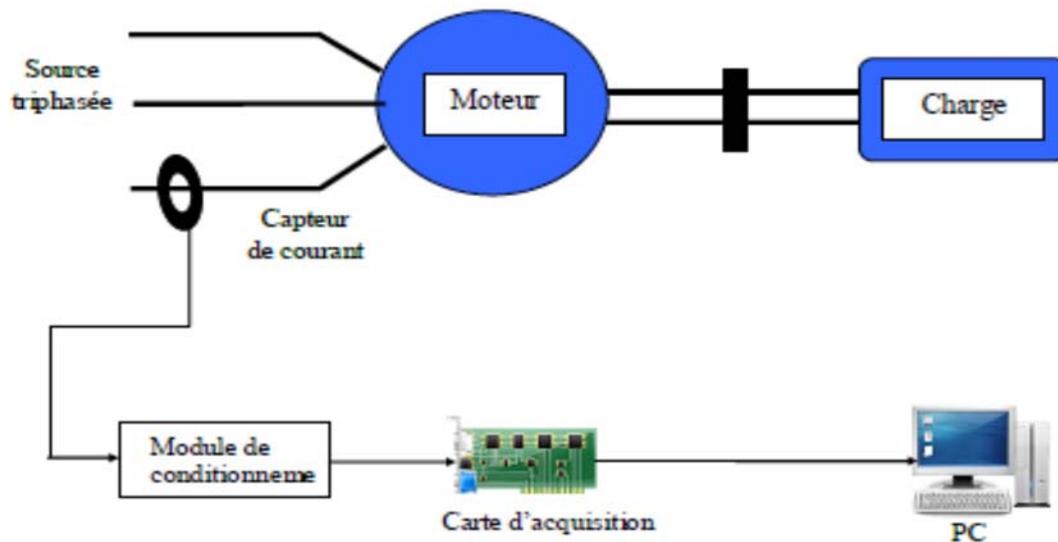


Fig. I.17 Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce premier chapitre les éléments de constitution de la machine asynchrone, les différents défauts pouvant se produire sur les différentes parties de la machine, ainsi que leurs méthodes de diagnostics.

Pour montrer l'effet des défauts sur le moteur, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique régissant le fonctionnement du moteur lors du défaut afin de simuler son comportement. Ceci fera l'objet du deuxième chapitre suivant.

II.1 Introduction

La simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est effectuée après l'étape de modélisation qui utilise les circuits électriques magnétiquement couplés. Noter bien que ce modèle est basé sur l'approche du couplage magnétique en considérant que le courant dans chaque barre est une variable indépendante.

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation, car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotorique. Cette approche offre un bon compromis en termes de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneaux de court-circuit. [13]

Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs de la machine asynchrone (vitesse de rotation, couple électromagnétique, courants statoriques et courants rotoriques). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine.

Considérons tout d'abord une machine avec les hypothèses suivantes :

- les barres rotoriques étaient isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-barres et leurs effets au sein même de la cage rotorique.
- l'entrefer est constant, l'effet d'encoche est négligé.
- la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer fixe). Cette hypothèse nous a permis d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.
- la répartition de la force magnétomotrice et du flux dans l'entrefer est sinusoïdale.
- la saturation, les effets capacitifs et les effets thermiques ont été négligés dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.
- On considère, par ailleurs, que la machine est constituée d'un stator à bobinage réparti ayant 3 phases et d'un rotor à cage ayant (Nbr) barres.

La cage d'écuréuil de la machine se compose de (Nbr) encoches rotoriques (nombre de barres rotoriques) qui peuvent se décomposer en (Nbr+1) circuits électriques rotoriques indépendants (Fig. II.1). À chacun de ces circuits (boucles) on associe un courant, ce qui amène à calculer (Nbr+1) courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit. Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus un (tenant compte de l'un des deux anneaux).

II.2 Mise en équation du modèle de la machine asynchrone saine

Considérons une machine à cage d'écuréuil ayant (3) enroulements identiques et symétriques au stator dont Chacun est traité en tant qu'enroulement séparé (Fig. II.1.a) [10].

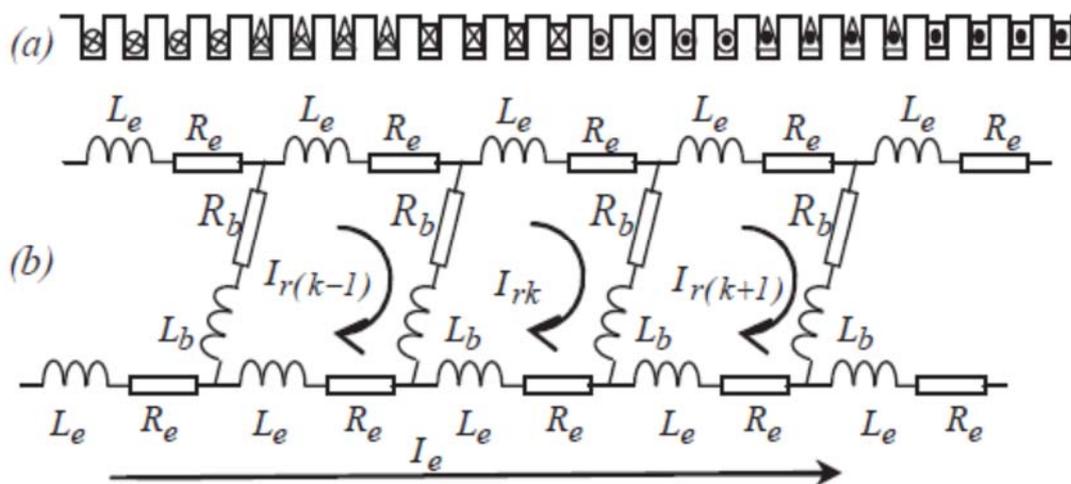


Fig. II.1 Structure du stator (a), et du rotor (b).

Le rotor est considéré comme un circuit maillé, c'est-à-dire constitué d'un nombre (Nbr) de barres identiques et équidistantes court-circuitées aux deux extrémités par deux anneaux identiques (Fig. II.1.b).

II.2.1 Equations du stator

Ces équations différentielles vont nous permettre d'associer le vecteur de tension, le vecteur de courant ainsi que le vecteur de flux pour les trois phases statoriques ($S_a S_b S_c$). En généralisant les équations à toutes les phases statoriques, alors l'équation du stator peut être mise sous la forme vectorielle suivante :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\psi_s] \quad (2-1)$$

Où :

$[V_s]$: Vecteur des tensions des phases statoriques de dimension 3.

$[i_s]$: Vecteur des courants des phases statoriques de dimension 3.

$[\psi_s]$: Vecteur des flux traversant les phases statoriques de dimension 3.

$[R_s]$: Matrice diagonale des résistances des phases du stator de dimensions (3,3).

Les vecteurs $[V_s][i_s][\psi_s]$ et la matrice des résistances $[R_s]$ s'écrivent de la façon suivante :

$$[V_s] = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T [i_s] = [i_{sa} i_{sb} i_{sc}]^T [\psi_s] = [\psi_{sa} \psi_{sb} \psi_{sc}]^T \quad (2-2)$$

$$[R_{ss}] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \text{ Avec } R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s \quad (2-3)$$

Le vecteur de flux statorique $[\psi_s]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants statoriques et courants rotoriques de la manière suivante :

$$[\psi_s] = [L_{ss}] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \quad (2-4)$$

$$[i_r] = [i_{r1} \quad i_{r2} \quad i_{r3} \cdots i_{r(Nbr+1)}]^T \quad (2-5)$$

Où :

$[L_{ss}]$: Est la matrice symétrique des inductances statoriques de dimension (3,3).

$[M_{sr}]$: Est la matrice des inductances mutuelles des phases statoriques et les mailles rotoriques de dimension (3, Nbr+1).

Ces deux matrices s'écrivent :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sasa} & M_{sasb} & M_{sasc} \\ M_{sbsa} & L_{sbsb} & M_{sbsc} \\ M_{scsa} & M_{scsb} & L_{scsc} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Où :

L'inductance totale d'une bobine statorique est la somme à l'inductance magnétisant L_{ms} et l'inductance de fuite L_{fs}

$$L_{sasa} = L_{sbsb} = L_{scsc} = L_{ms} + L_{fs} \quad (2-7)$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sar2} & \cdots & M_{sar(Nbr+1)} \\ M_{sbr1} & M_{sbr2} & \cdots & M_{sbr(Nbr+1)} \\ M_{scr1} & M_{scr2} & \cdots & M_{scr(Nbr+1)} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Avec :

M_{sari} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "a" et la ($i^{\text{ème}}$) maille rotorique.

M_{sbri} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "b" et la ($i^{\text{ème}}$) maille rotorique.

M_{scri} : Représente l'inductance mutuelle entre la phase "c" et la ($i^{\text{ème}}$) maille rotorique.

M_{smri} : L'inductance mutuelle entre la phase m du stator et la maille i du rotor s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} M_{sari} &= M_{sr} \cos(\theta + k a) \\ M_{sbri} &= M_{sr} \cos\left(\theta + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{scri} &= M_{sr} \cos\left(\theta + k a + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{sr} &= \frac{4\mu_0 N_s Re l}{\pi e p^2} \sin \frac{a}{2} \quad (2-10) \\ a &= p \frac{2\pi}{q} \text{ et } : k = 0, 1, 2, 3, \dots, \text{Nbr}-1 \end{aligned} \quad (2-9)$$

La matrice $[M_{sr}]$ peut-être représenté sous la forme suivante :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & M_{sr} \cos(\theta + ka) & \dots \\ \dots & M_{sr} \cos\left(\theta + k a - \frac{2\pi}{3}\right) & \dots \\ \dots & M_{sr} \cos\left(\theta + k a + \frac{2\pi}{3}\right) & \dots \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

Où :

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'entrefer.

N_s : Nombre de spires par phase statorique.

Re : Rayon moyen de l'entrefer.

l : Longueur de rotor.

q : nombre des barres rotoriques.

e : L'épaisseur de l'entrefer.

Si les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les segments de l'anneau de court-circuit sont négligées, la dernière colonne de la matrice représentée par un zéro.

Ce qui peut se mettre sous la forme :

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sar2} & \dots & M_{sar(Nbr)} & 0 \\ M_{sbr1} & M_{sbr2} & \dots & M_{sbr(Nbr)} & 0 \\ M_{scr1} & M_{scr2} & \dots & M_{scr(Nbr)} & 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

On peut remarquer, à ce stade, que la matrice $[L_{ss}]$ est de dimensions (3,3) compte tenu du nombre de phases statoriques, alors que la matrice $[M_{sr}]$ est de dimensions (3, Nbr+1) ce qui implique que le vecteur $[i_r]$ des courants rotoriques comportera (Nbr+1) éléments

Correspondants aux (Nbr) mailles (Nbr barres) de la cage plus la maille de l'anneau de court-circuit.

En remplaçant l'équation (2-4) dans (2-1) on obtient :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d[i_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[i_r]}{dt} + [i_r] \frac{d[M_{sr}]}{dt} \quad (2-13)$$

Avec :

$$\frac{d[M_{sr}]}{dt} [i_r] = \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [i_r] \quad (2-14)$$

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2-15)$$

Où :

θ_r : Est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

Ω : Est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (2-14) et (2-15) dans (2-13), on obtient :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d[i_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[i_r]}{dt} + \Omega \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_r} [i_r] \quad (2-16)$$

II.2.2 Equations du rotor

La cage d'écureuil de la machine se compose de (Nbr) encoches rotoriques (nombre de barres rotoriques) qui peuvent se décomposer en (Nbr+1) circuits électriques rotoriques indépendants (Fig. II.1). À chacun de ces circuits (boucles) on associe un courant, ce qui amène à calculer (Nbr+1) courants rotoriques. Chaque barre rotorique est modélisée par une inductance en série avec une résistance, tout comme chaque segment d'anneau de court-circuit.

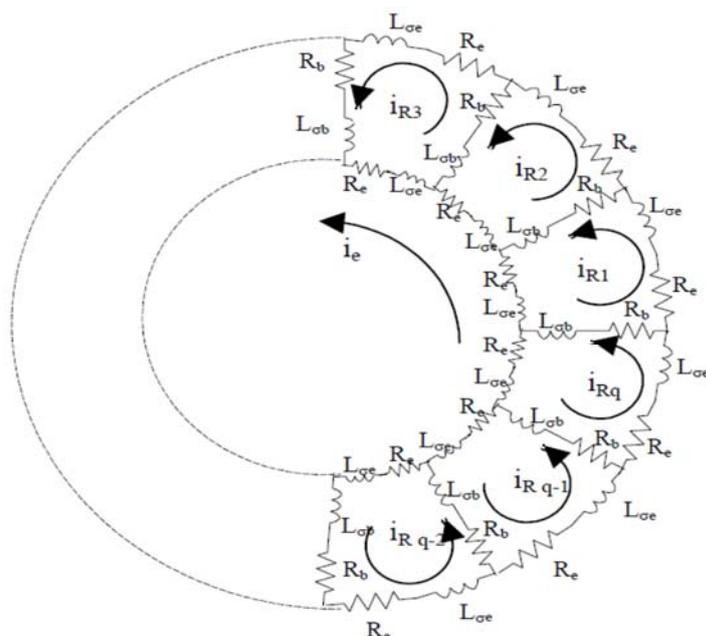


Fig. II.2 Schéma équivalent d'une maille du rotor à cage d'écureuil

Le nombre d'équations différentielles obtenues est égal au nombre de barres plus un (tenant compte de l'un des deux anneaux). Par conséquent, les courants indépendants dans la cage sont au nombre de $(Nbr+1)$.

La mise en équation de la maille rotorique (k) de la cage donne lieu à l'expression suivante :

$$-R_b i_{rk-1} + 2(R_b + R_e) i_{rk} - R_b i_{rk+1} - R_e i_e + \frac{d}{dt} \psi_{rk} + \frac{d}{dt} \psi_{sk} = 0 \quad (2-17)$$

Où :

ψ_{rk} et ψ_{sk} : sont respectivement le flux de la cage envoyé à travers la maille (k), y compris le flux propre de la maille (k), et le flux envoyé par les bobinages statoriques à travers la maille (k). De la même façon pour le stator, en désignant par (L_{rrkn}) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la maille (n) d'un côté, et par (L_{rskn}) l'inductance mutuelle entre la maille (k) et la phase statorique (n) de l'autre, les flux (ψ_{rk}) et (ψ_{sk}) s'écrivent en fonction des courants de mailles et de phases de la façon suivante :

$$\psi_{sk} = \sum_{n=1}^m L_{rskn} i_{sn} \quad (2-18)$$

$$\psi_{rk} = (L_{rrkk} - L_b) i_{rk-1} + (L_{rrkk} + 2(L_b + L_e) i_{rk} + (L_{rrkk} - L_b) i_{rk+1} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k-1 \\ n \neq k \\ n \neq k+1}}^n L_{rrkn} i_{rn} - L_e i_e$$

Les équations précédentes peuvent être généralisées à toutes les mailles de la cage. A cela, il faut ajouter l'équation d'un anneau de court-circuit en considérant qu'il n'y a pas de flux axial dans la machine :

$$qR_e i_e - \sum_{n=1}^m R_e i_{rn} + \frac{d}{dt} (qL_e i_e - \sum_{n=1}^q L_e i_{rn}) = 0 \quad (2-19)$$

En regroupant les équations précédentes (2-18) et (2-19) sous forme matricielle, on aboutit à l'équation du rotor :

$$[V_r] = [0] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} [\psi_r] \quad (2-20)$$

Le vecteur flux rotorique $[\psi_r]$ s'exprime en fonction des vecteurs courants rotoriques et statoriques de la manière suivante :

$$[\psi_r] = [L_{rr}] \cdot [i_r] + [M_{rs}] \cdot [i_s] \quad (2-21)$$

Où :

$[V_r]$: Est le vecteur des tensions rotoriques, qui est nul pour le cas d'un rotor à cage d'écuréuil.

$[i_r]$: Est le vecteur des courants de mailles rotoriques, de dimension $(q+1)$.

$[\psi_r]$: Est le vecteur des flux traversant les mailles rotoriques, de dimension $(q+1)$.

$[R_r]$: Est la matrice des résistances de la cage, de dimensions $(q+1, q+1)$.

$[L_{rr}]$: Est la matrice des inductances propres rotoriques.

$[M_{rs}]$: Est la matrice des inductances mutuelles entre les mailles rotoriques et les phases statoriques, elle est égale à la matrice $[M_{sr}]^T$.

$$[i_r] = [i_{r1} \ i_{r2} \ i_{r3} \ \dots \ i_{r(q+1)}]^T \text{ et } [\psi_r] = [\psi_{r1} \ \psi_{r2} \ \dots \ \psi_{r(q+1)}]^T \quad (2-22)$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \ddots & 0 & -R_e \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & (Nbr + 1)(-R_e) \end{bmatrix}$$

Avec : R_b et R_e représentent, respectivement, la résistance d'une barre rotorique et la résistance d'un segment de l'anneau de court-circuit.

- ✓ $[L_{rr}]$: est de dimensions $(Nbr+1, Nbr+1)$ composées par l'inductance de fuite d'une barre L_b et l'inductance d'une portion de l'anneau de court-circuit L_e , en plus insérant les inductances propres aux mailles L_{mr} et les inductances mutuelles L_{rirj} entre la maille i et la maille j .
- ✓ $[M_{rs}]$: est de dimensions $(Nbr+1, 3)$. Ces deux matrices s'écrivent de la façon suivante :

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{sar1} & M_{sbr1} & M_{scr1} \\ M_{sar2} & M_{sbr2} & M_{scr2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{sar(Nbr+1)} & M_{sbr(Nbr+1)} & M_{scr(Nbr+1)} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r1r2} - L_b & L_{r1r3} & \dots & L_{r1rq} - L_b & -L_e \\ L_{r2r1} - L_b & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & L_{r2r3} - L_b & \dots & L_{r2rq} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & -L_e \\ L_{rqr1} - L_b & L_{rqr2} & L_{rqr3} & \dots & L_{mr} + 2(L_b + L_e) & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -(Nbr + 1)L_e \end{bmatrix}$$

Où :

L_{mr} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.

L'inductance principale d'une maille rotorique est donnée par l'équation suivante :

$$L_{rp} = \frac{Nbr-1}{Nbr^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot Re \quad (2-24)$$

La mutuelle entre deux mailles rotoriques est donnée par l'équation suivante :

$$M_{rr} = \frac{-1}{Nbr^2} \frac{\mu_0}{e} 2\pi \cdot l \cdot Re \quad (2-25)$$

En remplaçant l'équation (2-21) dans (2-20), on obtient :

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d[i_r]}{dt} + [M_{rs}] \frac{d[i_s]}{dt} + \frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] \quad (2-26)$$

Sachant que :

$$\frac{d[M_{rs}]}{dt} [i_s] = \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [i_s] \quad (2-27)$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + [L_{rr}] \frac{d[i_r]}{dt} + [M_{rs}] \frac{d[i_s]}{dt} + \Omega \frac{d[M_{rs}]}{d\theta_r} [i_s] \quad (2-28)$$

II.3- Système d'équations global de la machine

Les deux équations matricielles (2-6) et (2-14) du stator et du rotor peuvent être regroupées dans une seule équation sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} [V_s] \\ [V_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \Omega \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

On obtient :

$$[V] = [R][I] + [L] \left\{ \frac{d}{dt} [I] \right\} + \Omega \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (2-30)$$

Où :

- ✓ $[V] = \begin{bmatrix} [V_s] \\ [0] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1)$
- ✓ $[I] = \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1)$
- ✓ $[R] = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1, 3+Nbr+1)$
- ✓ $[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$ de dimension $(3+Nbr+1, 3+Nbr+1)$

La vitesse mécanique de rotation du rotor :

$$\Omega = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2-31)$$

La vitesse mécanique de l'arbre s'écrit de la façon suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad (2-32)$$

Où

C_{em} : est le couple électromécanique,

C_r : est le couple de charge,

J : est le moment d'inertie de l'ensemble de masses tournantes,

f : est le coefficient de frottement visqueux,

Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de la Co-énergie magnétique emmagasinée dans la machine :

$$C_{em} = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right] \quad (2-33)$$

Dans un système magnétique linéaire, la Co-énergie est égale à l'énergie stockée dans un circuit linéaire s'exprime en fonction des courants et des inductances :

$$W_{co} = \frac{1}{2} [I]^T [L] [I] \quad (2-34)$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I]^T \left\{ \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] \quad (2-35)$$

$$W_{co} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_s^T & i_r^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

$$W_{co} = \frac{1}{2} i_s^T L_{ss} i_s + \frac{1}{2} i_s^T M_{sr} i_r + \frac{1}{2} i_r^T M_{sr} i_s + \frac{1}{2} i_r^T L_{rr} i_r \quad (2-37)$$

Dans ce cas L_{ss} et L_{rr} contiennent seulement des éléments constants donc :

$$\frac{dL_{ss}}{d\theta_r} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dL_{rr}}{d\theta_r} = 0 \quad (2-38)$$

En remplaçant les équations (2-37) et (2-38) dans (2-33), on obtient :

$$C_{em} = \frac{1}{2} i_s^T \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r + \frac{1}{2} \frac{\partial M_{rs}}{\partial \theta_r} i_r^T i_s \quad (2-39)$$

Pour un entrefer uniforme M_{sr} et M_{rs} sont égaux, l'expression du couple électromagnétique se réduit à la forme suivante :

$$C_{em} = i_s^T \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta_r} i_r \quad (2-40)$$

Les équations (2-31) et (2-32) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{em} - C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-41)$$

En combinant l'équation électrique (2-41) et l'équation de mouvement (2-30), les équations de la machine asynchrone s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -Cr \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R] + \Omega \frac{d}{d\theta_r} [L] & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

Ce qui donne une forme condensée sous la forme suivante :

$$[U] = [B][X] + [A][\dot{x}] \quad (2-$$

43)

Le vecteur $[X]$ peut s'écrire :

$$[\dot{x}] = [A]^{-1}([U] - [B][X]) \quad (2-$$

44)

Le vecteur $[U]$ est donné par l'expression suivante :

$$[U] = ([V], [-Cr], [0])^T \quad (2-45)$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] & [A_0]^T & [A_0]^T \\ [M_{rs}] & [L_r] & [A_0]^T & [A_0]^T \\ [A_0] & [A_0] & j & 0 \\ [A_0] & [A_0] & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Avec : $[A_0] = [A_0 \text{ sta} \quad A_0 \text{ rot} \quad A_0 \text{ cc}]$

$A_0 \text{ sta} = \text{zeros}(1,3)$

$A_0 \text{ rot} = \text{zeros}(1, \text{Nbr})$

$A_0 \text{ cc} = 0$

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

$$[B] = \begin{bmatrix} [R_s] & \left[\Omega \frac{dM_{sr}}{d\theta_r} \right] & [S_0]^T & [S_0]^T \\ \left[\Omega \frac{dM_{rs}}{d\theta_r} \right] & [R_r] & [B_0]^T & [B_0]^T \\ C_{stator} & C_{barre} & f & 0 \\ [S_0] & [B_0] & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

Les deux matrices qui interviennent dans l'expression de la matrice $[B]$ sont :

$$\left[\Omega \frac{dM_{sr}}{d\theta_r} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1 \text{ Nbr}+1} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2 \text{ Nbr}+1} \\ g_{31} & g_{32} & \cdots & g_{3 \text{ Nbr}+1} \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

$$\left[\Omega \frac{dM_{sr}}{d\theta_r} \right] = -M_{sr} \begin{bmatrix} \Omega \sin(\theta_r) & \Omega \sin(\theta_r + a) & \cdots & \Omega \sin(\theta_r + (\text{Nbr} + 1)a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \cdots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (\text{Nbr} + 1)a) \\ \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + a) & \cdots & \Omega \sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3} + (\text{Nbr} + 1)a) \end{bmatrix} \quad (2-49)$$

Les constantes C_{stator} , C_{rotor} , C_{barre} et B_0 sont définies comme suit :

$$C_{stator} = 0.5 p [I_r][H]^T \quad (2-50)$$

$$C_{rotor} = 0.5 p [I_s][H] \quad (2-51)$$

$$C_{barre} = [C_{rotor} \quad 0] \quad (2-52)$$

$$[B_0] = \text{zeros}(1, \text{Nbr}+1) \quad (2-53)$$

$$[H] = M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + a) & \cdots & \sin(\theta_r + (\text{Nbr} + 1)a) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + a) & \cdots & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3} + (\text{Nbr} + 1)a) \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + a) & \cdots & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3} + (\text{Nbr} + 1)a) \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

II.4 Validation du modèle de la machine saine

Après avoir décrit le modèle de la machine asynchrone à rotor cage, un programme écrit sous l'environnement Matlab nous a permis de mettre en évidence le comportement de la machine. Ainsi, pour la résolution du système différentiel nous avons utilisé la méthode Rung-kutta d'ordre 4 selon l'organigramme illustré dans la (Fig. II.3). Les paramètres de la machine utilisés sont donnés en annexe.

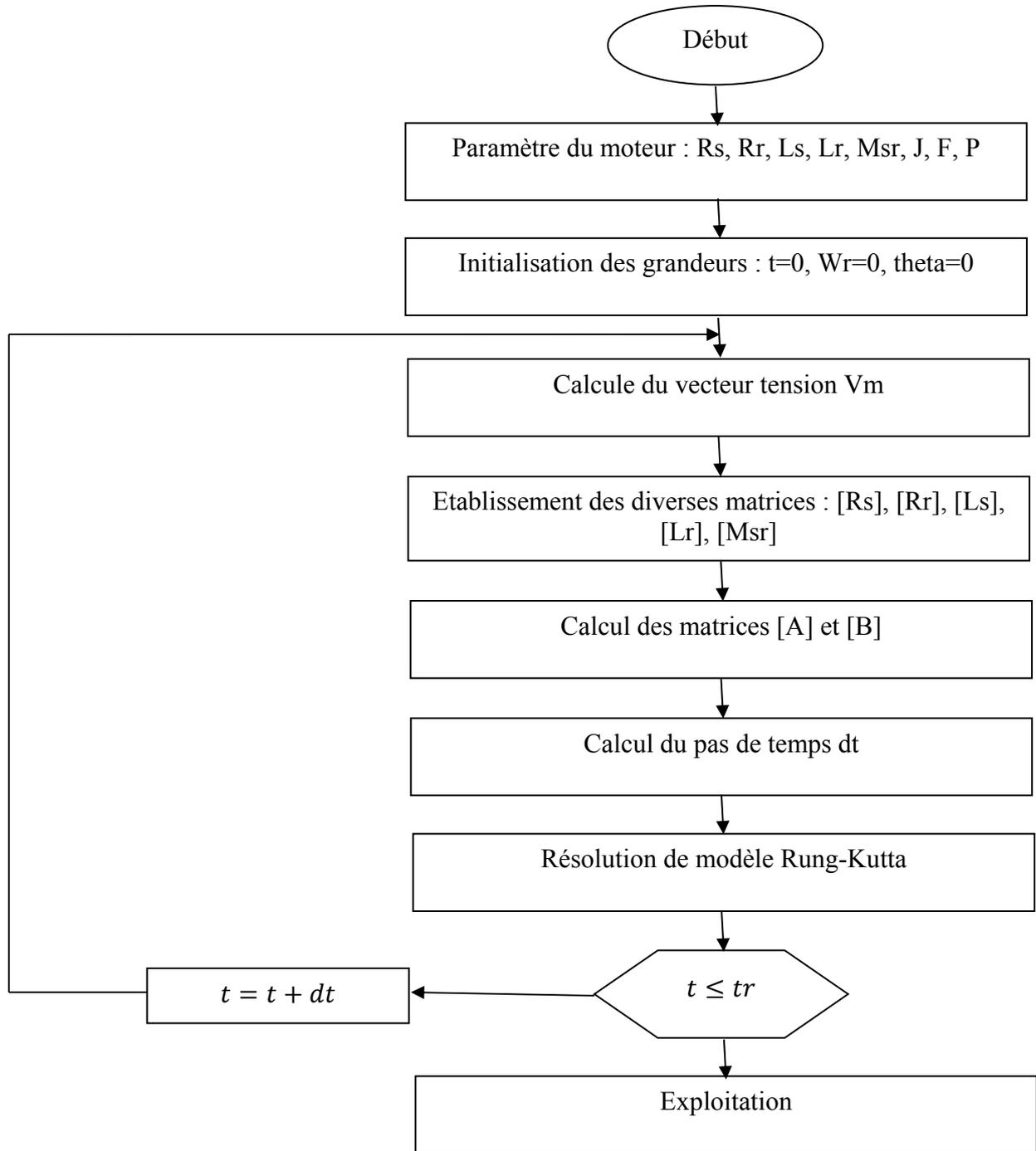


Fig. II.3- Organigramme

II.5 Modèle de la machine asynchrone en présence des défauts

Dans la simulation des défauts de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit, le modèle du moteur sain sera utilisé tel qu'il est, il suffit seulement de faire augmenter les résistances des barres ou de segments en défaut à des valeurs pouvant refléter le degré de rupture partielle voulu. Ces considérations sont prises du fait qu'une rupture totale de barres se reproduit rarement. Les résultats obtenus sont intéressants, du fait que toutes les raies prédites par les développements analytiques peuvent être observées dans les spectres résultants. Plus-le facteur de multiplication est grand, plus la sévérité de défaut grande.

II.5.1- Le défaut de cassure de barre rotorique

La rupture d'une barre peut être totale ou partielle.

A-Cassure totale d'une barre

Le cas d'une cassure totale d'une barre signifie que le courant ne passe pas dans cette barre, donc il est nul. La Figure (II.4) montre la disposition générale de deux mailles adjacentes et donne les courants qui circulent dans les barres et dans les anneaux [12].

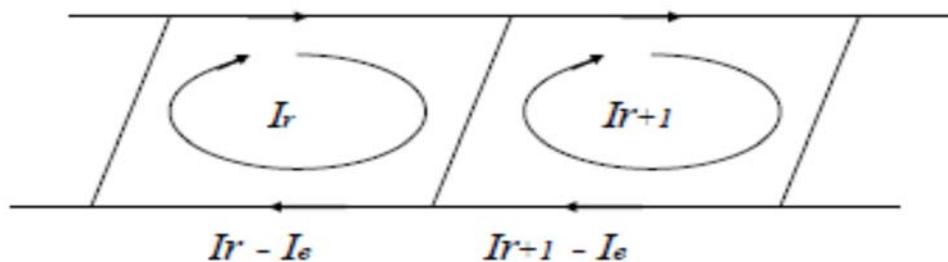


Fig. II.4- Deux mailles adjacentes

Si une barre est ouverte (cassée), cela implique que ($I_{r+1} = I_r$) voir la Figure (II.5)

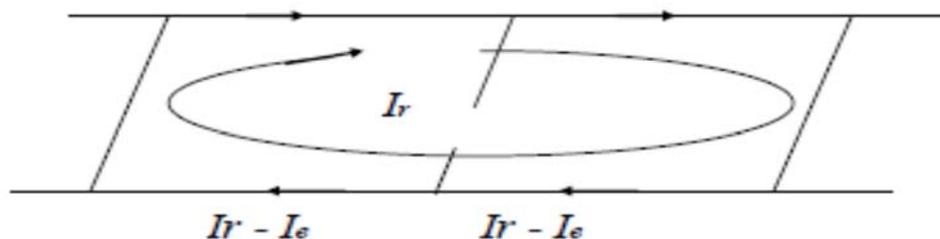


Fig. II.5- Deux mailles adjacentes avec une barre cassée

La condition ($I_{r+1} = I_r$) est imposée sur la matrice des résistances et des inductances par l'addition de la colonne relative à (I_{r+1}), à celle relative à (I_r). De même pour les lignes

$(I_r + I)$ est supprimé du vecteur courant et tension. La taille des matrices est réduite selon le nombre de barres cassées [12].

B-Cassure partielle d'une barre

Une barre rétrécie ou mal soudée représente une augmentation de la résistance de cette dernière par rapport à une barre normale, Ce qui signifie le passage d'un faible courant dans cette barre. La matrice de résistance est modifiée en augmentant la valeur de la résistance de la barre défectueuse [12].

Le rotor avec ce défaut crée, en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse $(g\Omega_s)$ par rapport au rotor (g le glissement de la machine), un champ inverse qui, lui tourne à une vitesse $(-g\Omega_s)$. L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance des composantes de fréquence $(2g\Omega_s)$ dans le couple électromagnétique. Ces composantes seront la cause d'oscillations de la vitesse. Cette dernière donne naissance à des f.é.m. aux pulsations (Ω_s) , $(1-2g)\Omega_s$, $(1+2g)\Omega_s$ et $(1-4g)\Omega_s$ qui créent à leur tour des courants aux mêmes pulsations. Les champs créent par ces courants vont à leur tour induire au rotor des courants directs et inverses. Ainsi par un processus identique, on retrouve dans le courant statorique des Composantes de fréquences [12] :

$$f_{\text{défaut}} = (1 \pm k g) f \quad (2-55)$$

Où :

k : Un entier positif.

g : Le glissement.

f : La fréquence d'alimentation.

Le schéma de la figure (I.6) permet une meilleure compréhension du fonctionnement du moteur avec un rotor sain et en défaut.

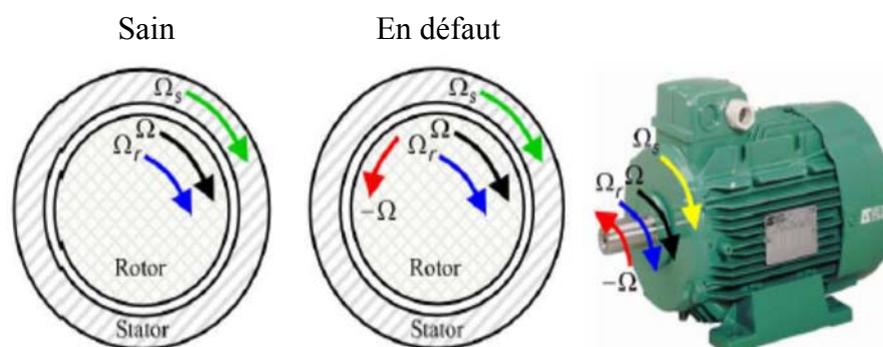


Fig. II.6 Schéma de fonctionnement d'un rotor sain et en défaut.

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (2-56)$$

Ω_s : Représente la vitesse de synchronisme.

P : Est le nombre de paires de pôles de la machine.

$$\Omega_r = (1-g) \Omega_s \quad (2-57)$$

Ω_r : Représente la vitesse de rotation

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (2-58)$$

g: est le glissement

Alors :

$$\Omega_{défaut} = \Omega_r - g\Omega_s = (1 - g)\Omega_s - g\Omega_s \quad (2-59)$$

$$\Omega_{défaut} = (1-2g)\Omega_s \quad (2-60)$$

D'où la fréquence du défaut :

$$F_{défaut} = (1-g)f - gf = (1-2g)f \quad (2-61)$$

II.5.2. Simulation de rupture de barres au rotor

Il est assez difficile d'écrire exactement la succession des phénomènes physiques entrant en jeu lors d'une rupture d'une barre. La simulation de ce type de défaillance peut être faite en utilisant deux méthodes différentes, le but étant d'annuler le courant qui traverse la barre incriminée. Le circuit électrique rotorique donné par la (Figure(II.6)) doit être reconsidéré pour permettre la prise en compte du défaut rotorique dans le modèle de la machine.

Une première méthode de modélisation consiste à annuler le courant qui traverse cette barre. Les matrices des inductances et des résistances sont modifiées de tel façon que : si la barre k est rompue, le courant i_{bk} dans cette barre s'annule. Dans ce cas, le courant dans la maille (k-1) devient égal au courant dans la maille (k), c'est-à-dire ($i_{r(k-1)} = i_{rk}$).

Ceci est traduit dans les matrices des inductances et des résistances, Par l'addition des deux colonnes et des deux lignes liées aux courant $i_{r(k-1)}$ et i_{rk} . Le courant i_m est donc supprimé du vecteur des courants.

La seconde approche consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche

possible du zéro en régime permanent. En comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons dans ce type de modélisation, 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 différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut [11].

II.5.3 Représentation d'état du modèle de rupture de barre

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

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 \dots & \dots & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 \dots & \dots & 0 & -R_e \\ 0 & -R_b & 2(R_b + R_e) & \dots & \dots & 0 & -R_e \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\alpha R_{bk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & (\alpha 2R_b + R_e) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & -\alpha R_{bk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & \dots & -R_e & -R_e & (N_{br}+1) -R_e \end{bmatrix}$$

α est le coefficient d'augmentation de la barre incriminée.

II.5.4- Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

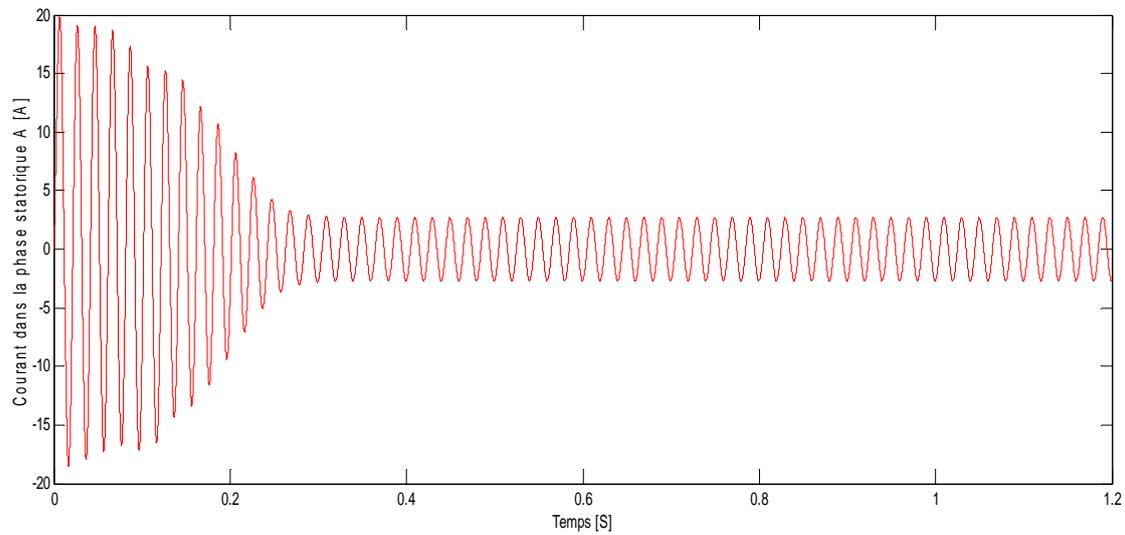
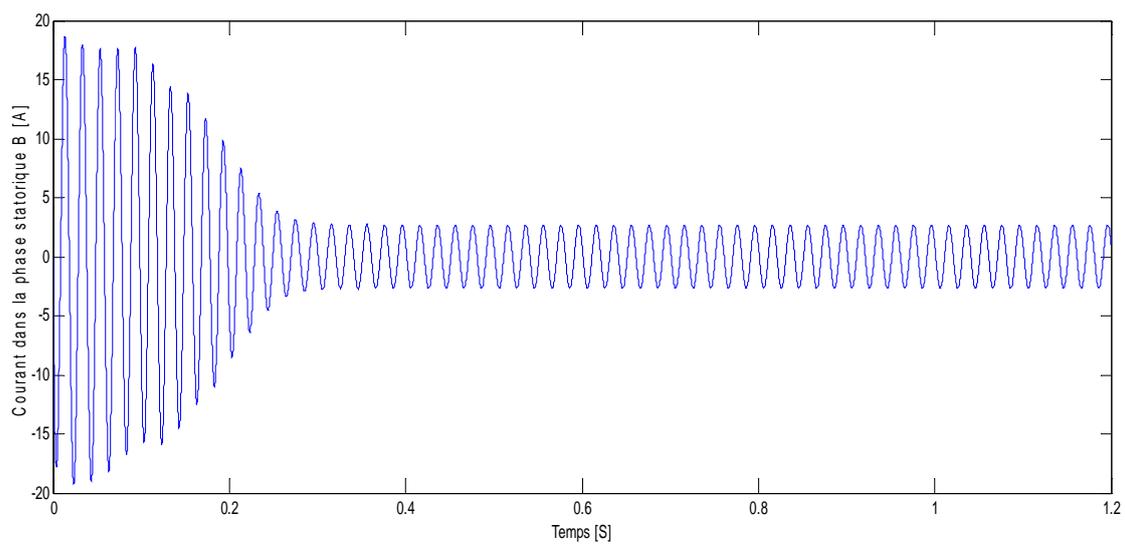
Les défauts qui peuvent apparaître au niveau des segments d'anneau de court-circuit ont souvent les mêmes origines que celle présentées pour la cassure d'une barre de la cage rotorique. La méthodologie adoptée pour la prise en compte de ce type de défaut dans le modèle est elle aussi identique à l'approche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

II.5.5- Représentation d'état du model Cassure d'un segment d'anneau de court-circuit

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 :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & 0 \dots & \cdot & \cdot & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 \dots & \cdot & \cdot & 0 & -R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & 2(R_b + \beta R_e) & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & -\beta R_e \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & (N_{br} - 1) R_e + \beta R_e \end{bmatrix}$$

β est le coefficient d'augmentation de l'anneau incriminé.

II.6 Modèle de la machine asynchrone avec un fonctionnement à vide**Figure II.7 : Courant dans la phase statorique A****Figure II.8 : Courant dans la phase statorique B**

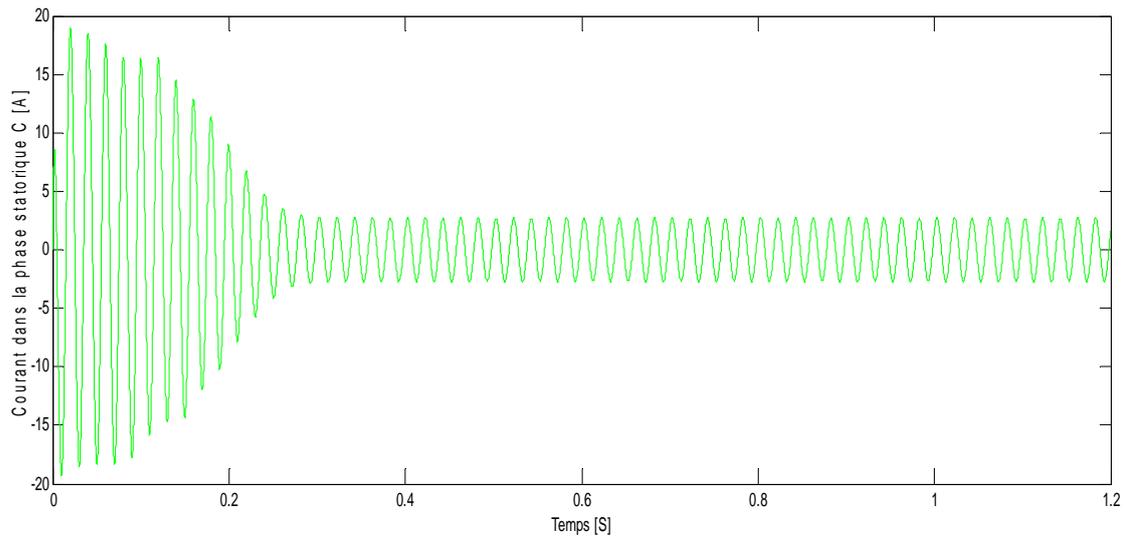


Figure II.9 : Courant dans la phase statorique C

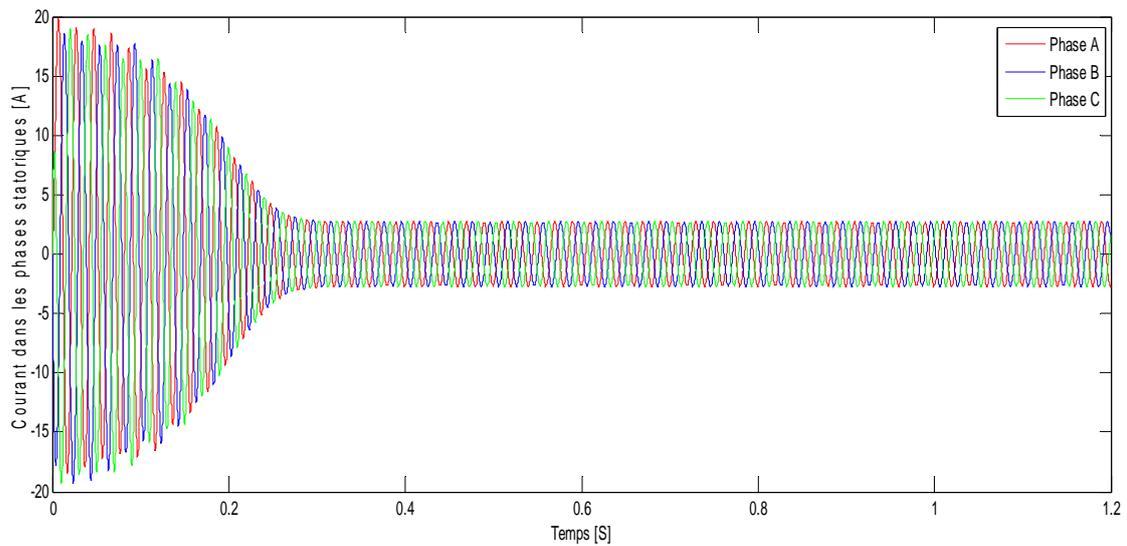


Figure II.10 : Courant dans les trois phases statoriques.

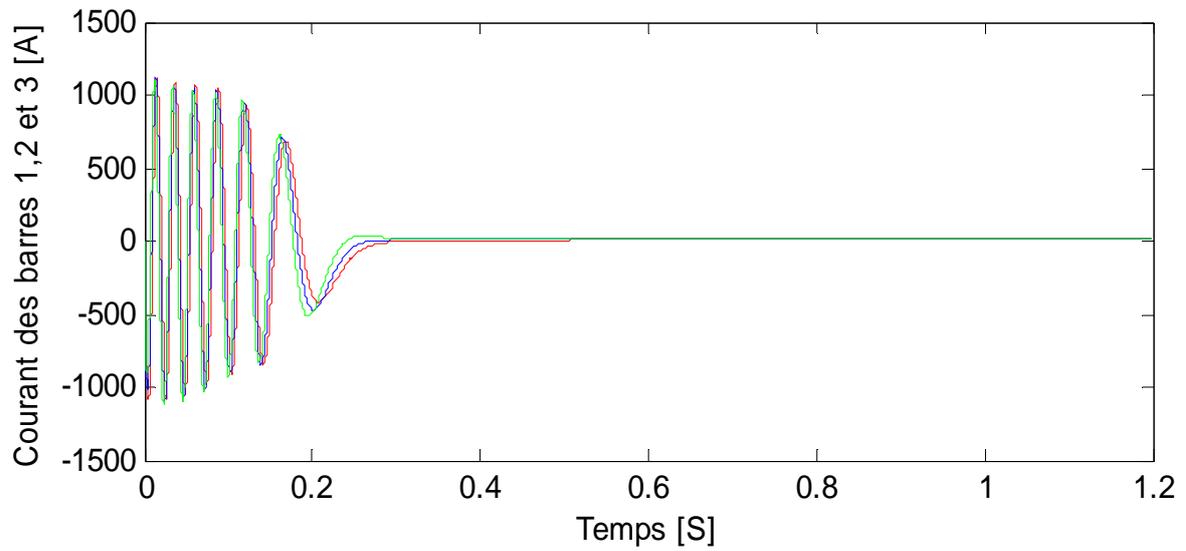


Figure II.11 : Courant dans la 1^{eme}, 2^{eme}, et la 3^{eme} barres rotoriques.

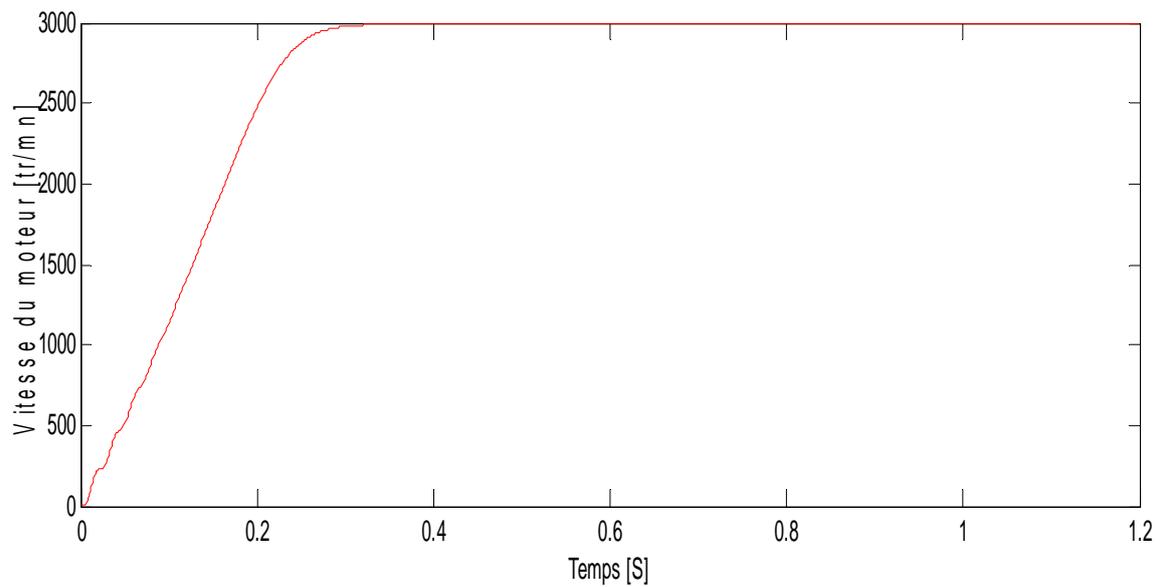


Figure II.12 : Vitesse de rotation.

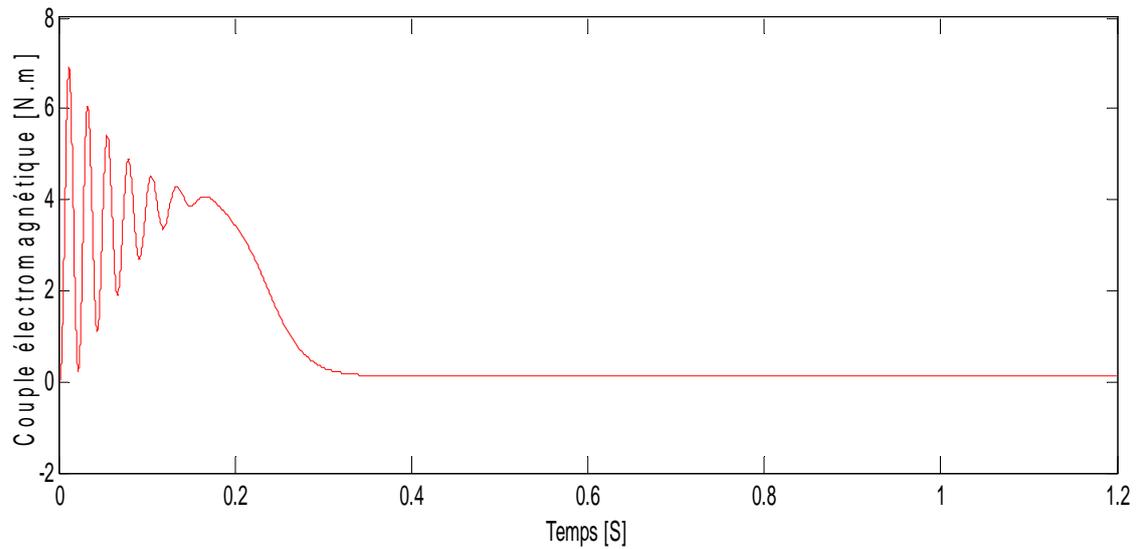


Figure II.13 : Couple électromagnétique

II.7 Modèle de la machine asynchrone avec un fonctionnement en charge

($C_r = 3.5 \text{ N.m}$, à $t = 0.6 \text{ s}$)

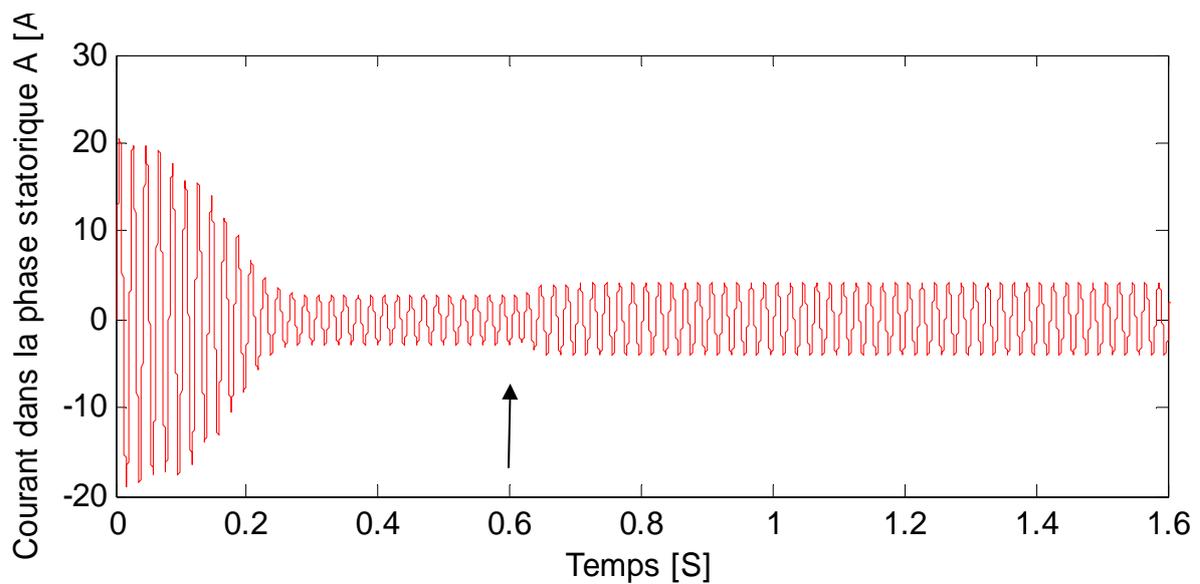


Figure II. 14 : Courant dans la phase statorique A.

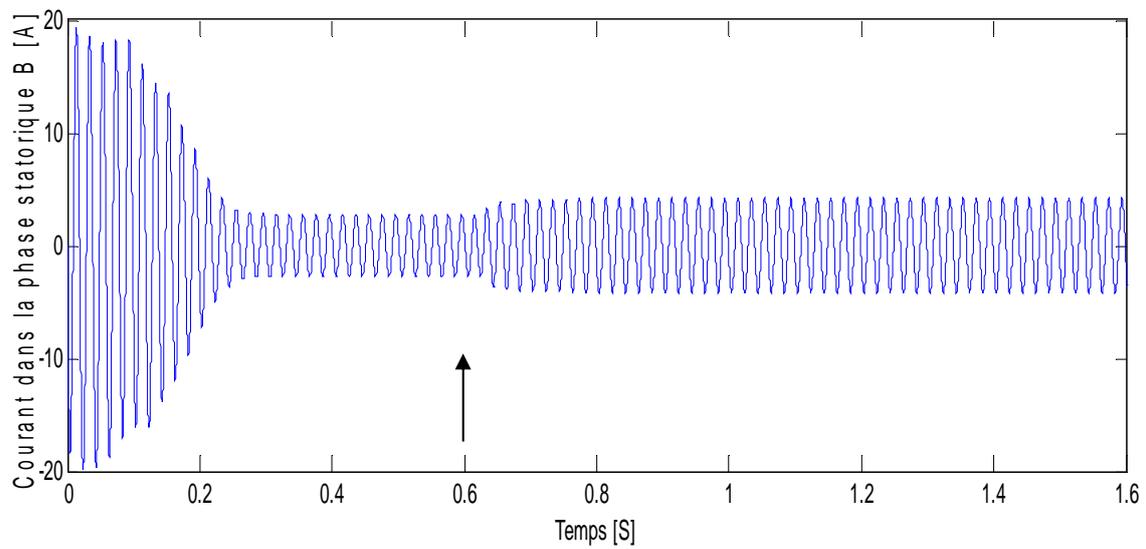


Figure II.15 : Courant dans la phase statorique B.

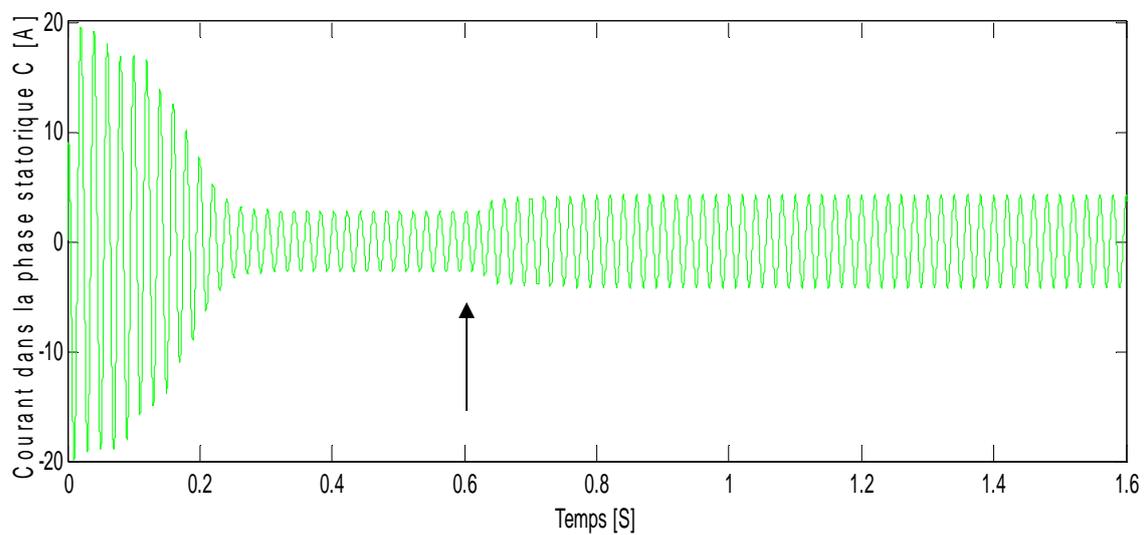


Figure II.16 : Courant dans la phase statorique C

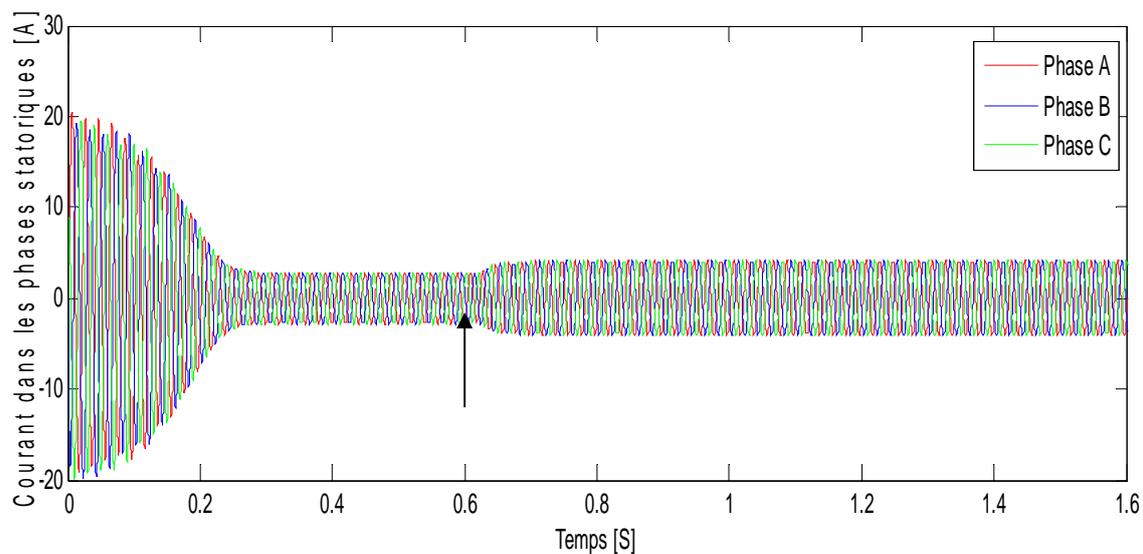


Figure II.17 : Courant dans les trois phases statoriques

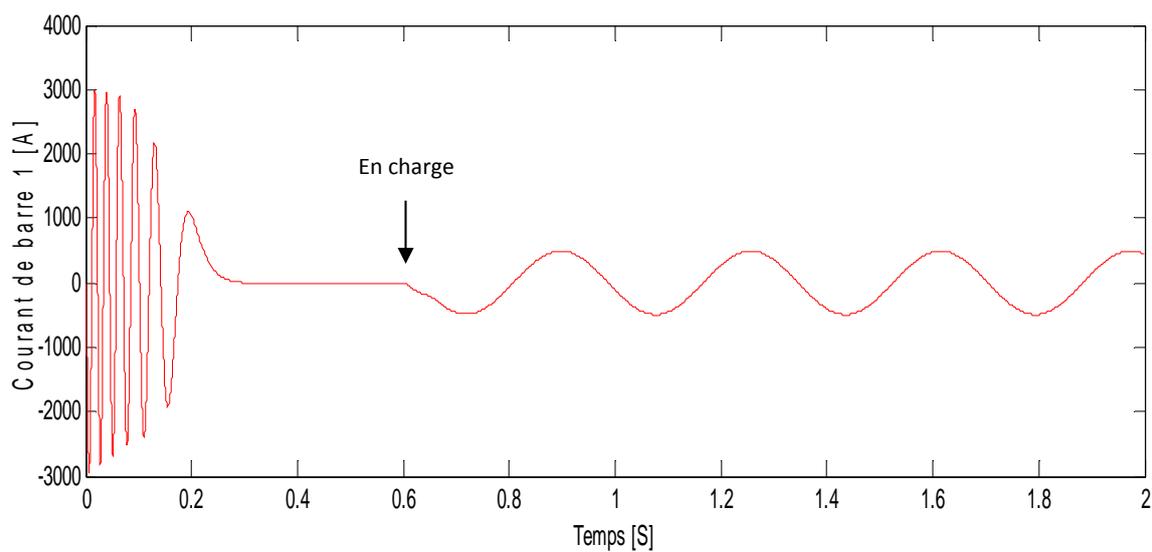


Figure II.18 : Courant dans la barre 1

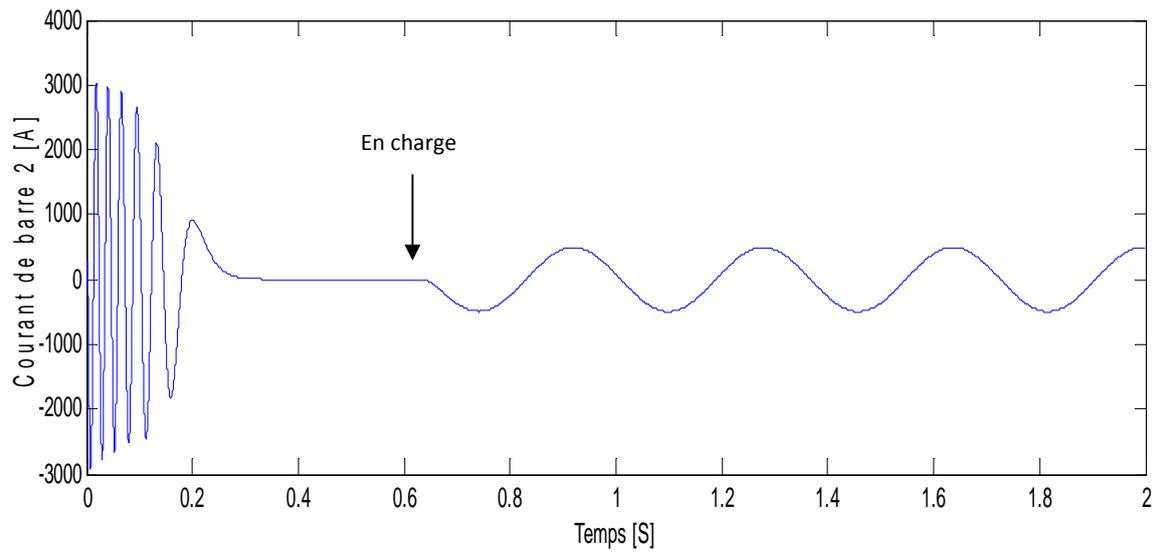


Figure II.19 : Courant dans la barre 2.

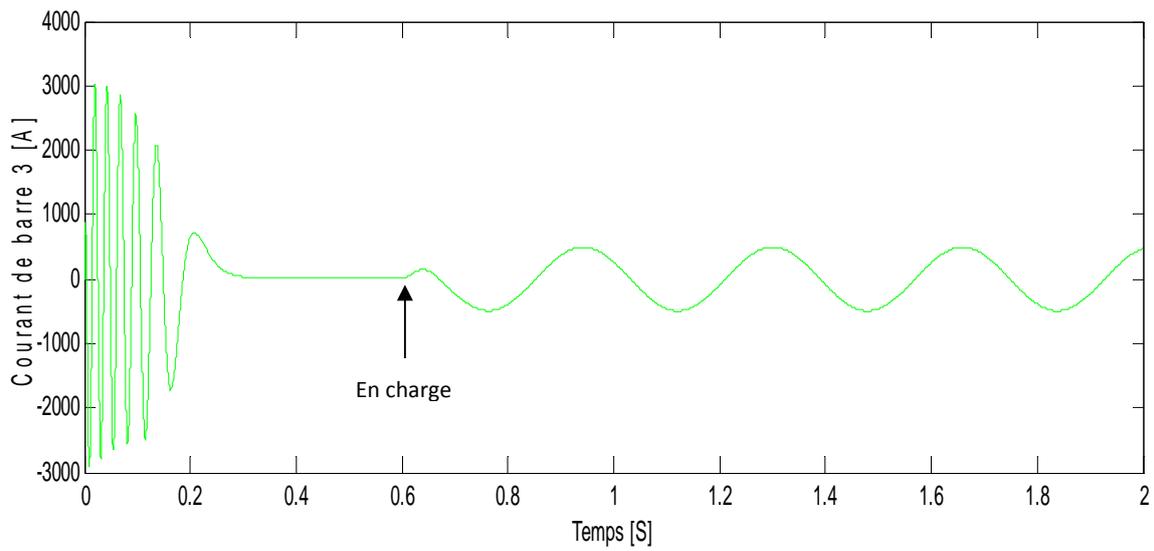


Figure II.20 : Courant dans la barre 3.

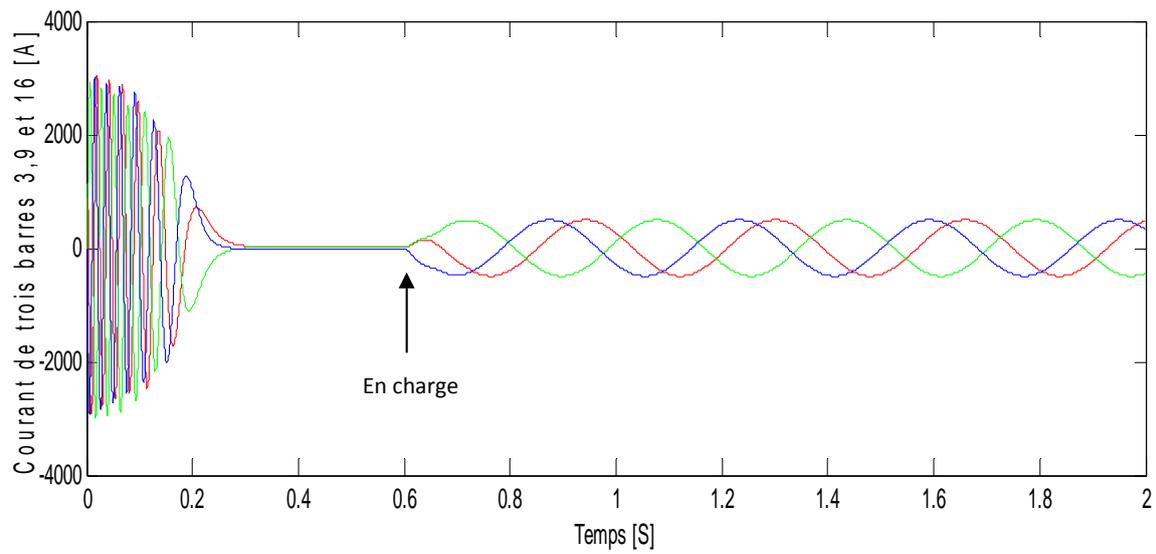


Figure II.21 : Courant dans la 3^{eme}, 9^{eme}, et 16^{eme} barres.

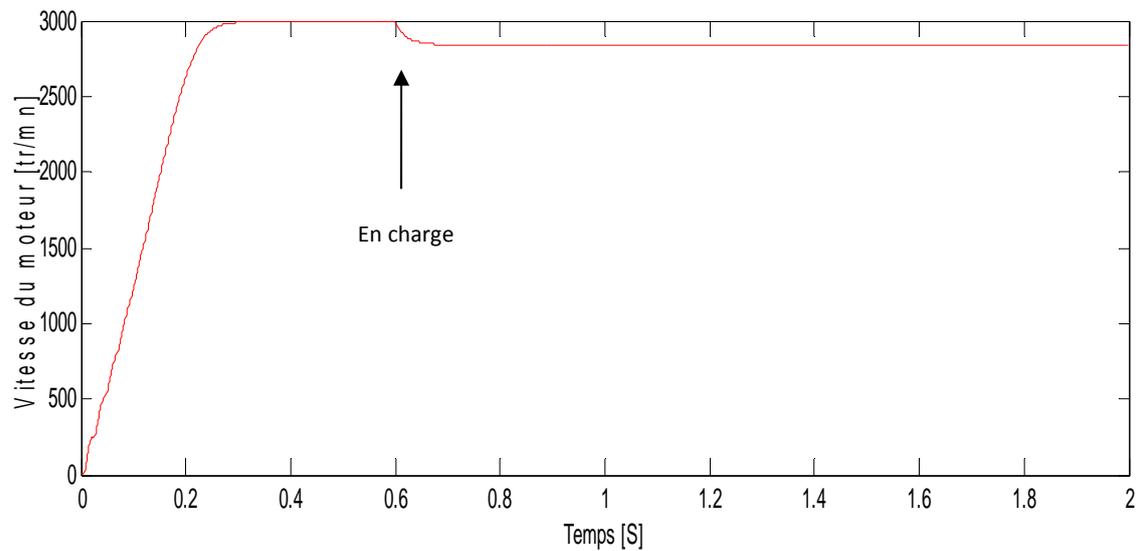


Figure II.22 : Vitesse de rotation.

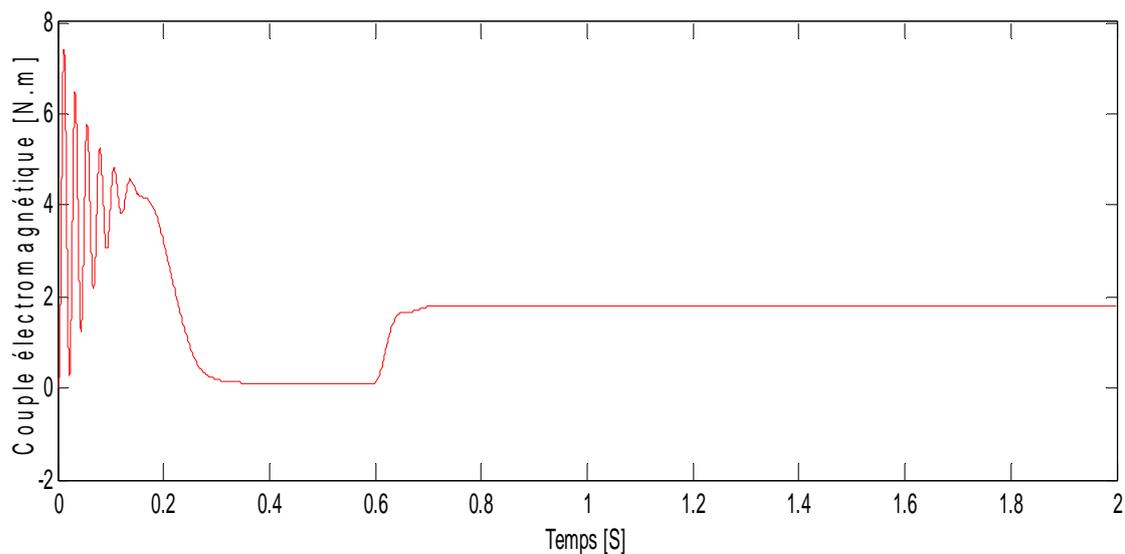


Figure II.23 : Couple électromagnétique.

II.8- Interprétation des résultats de simulation de la MAS saine

La simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil alimenté par des tensions sinusoïdales, nous a permis d'observer le comportement de celle-ci. Lors du démarrage, on constate des pics de courant importants qui s'atténuent avec l'évolution du régime transitoire. Les courbes présentées par les figures (II.7 jusqu'à II.21) détaillent l'évolution de la vitesse, du couple électromagnétique, et des courants statoriques et rotoriques à vide et en charge.

Les deux figures (II.12) et (II.22) représentent l'évolution de la vitesse de rotation de la machine en fonction du temps, en régime transitoire nous remarquons un accroissement linéaire de la vitesse au début de 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 à $t=0.6s$, à partir de cet instant la vitesse décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise à une certaine valeur.

Les deux figures (II.13) et (II.21) représentent l'évolution du couple électromagnétique, au démarrage dans l'intervalle 0 et 0.6s, le couple est fortement pulsatoire, il atteint une valeur maximale de 7.5 N.m, ceci explique le bruit engendré par la partie mécanique et après disparition du régime transitoire, le couple tend vers zéro, cette valeur représente le couple de

frottement, jusqu'à l'instant 0.6s on remarque le passage d'un régime à vide vers un régime en charge s'établit presque instantanément, sans oscillations, avec un très faible dépassement. L'application de couple résistant $C_r = 3.5 \text{ N.m}$ à l'instant 0.6s la machine développe un couple électromagnétique qui augmente brusquement pour atteindre la valeur $C_{em} = 1.7 \text{ N.m}$.

Les figures (II.11), (II.16), (II.19), (II.20) et (II.21) représentent l'évolution des courants rotoriques, nous remarquons dans l'intervalle 0 et 0.25s les courants oscillent et ils atteignent la valeur maximale de 3000A en cas de charge, ce qui illustre le régime transitoire, à partir de $t=0.25\text{s}$, les courants chutent à une valeur presque nulle, et lors de l'application de couple résistant ($C_r=3.5 \text{ N.m}$) à l'instant 0.6s, des ondulations sont apparues et oscillent autour de l'axe de zéro (voir la figure II.21), ainsi le courant varie sinusoïdalement autour d'une valeur efficace de 500A.

L'évolution des courants statoriques absorbés par les trois phases du stator est illustrée dans les figures (II.7), (II.8), (II.9), (II.10), (II.14), (II.15), (II.16) et (II.17). En régime transitoire, les courants oscillent autour de l'axe zéro avec une amplitude de 19 A, puis il se stabilise à une valeur efficace de 2.8 A. En régime permanent et après l'application du couple résistant à l'instant $t=0.6\text{s}$, les courants augmentent pour atteindre une valeur maximale de 5 A et cela est dû au fait que la machine faisant appel à un sur plus de courant pour faire face à ce couple résistant.

Conclusion :

Dans ce chapitre, une mise en équation du modèle de la machine asynchrone a été faite en état sain, puis avec défauts. Ainsi, une bibliothèque de simulation a été présentée dans le but de valider les propos présentés en théorie. Dans la prochaine partie, des simulations du MAS vont être présentées afin d'étudier l'influence de ruptures de barres rotoriques sur l'évolution temporelle des grandeurs (courant, vitesse et couple) de la machine.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons des simulations d'une machine asynchrone à cage d'écuriel pour étudier l'influence de ruptures d'une ou plusieurs barres rotoriques sur les grandeurs courants, vitesse et couple électromagnétique de la machine. Pour cela, un programme de simulation sera écrit sous Matlab afin de nous donner l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement sain et en défaut. Dans ce contexte, l'analyse spectrale des courants statoriques est effectuée par l'algorithme de la transformée de Fourier rapide FFT sous Matlab.

La simulation des défauts de barres nous permet de faire une comparaison entre les grandeurs temporelles et le spectre fréquentiel du courant statorique obtenus avec un modèle sain et un modèle défaillant.

III.2- Modèle de la machine Asynchrone en présence des défauts de cassures de barres

III.2.1- Résultats de la simulation

Nous allons présenter l'évolution temporelle des grandeurs de la machine lorsque la cage d'écuriel présente une ou plusieurs barres cassées.

III.2.1.1- Cas d'une barre cassée (N°10) à $t=1.4$ s

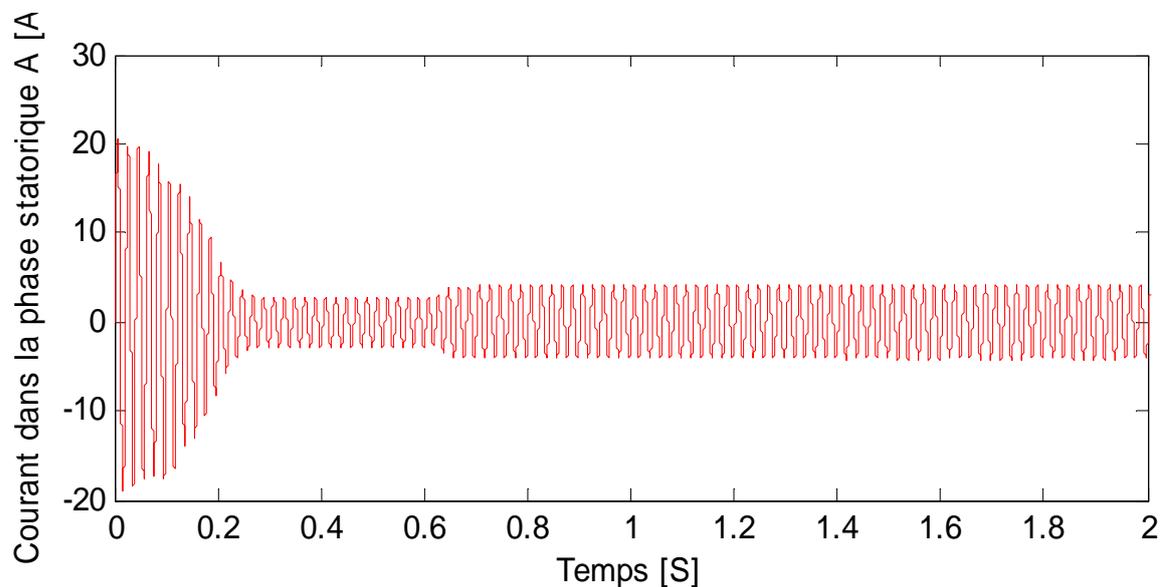


Figure III.1 : Courant dans la phase statorique A.

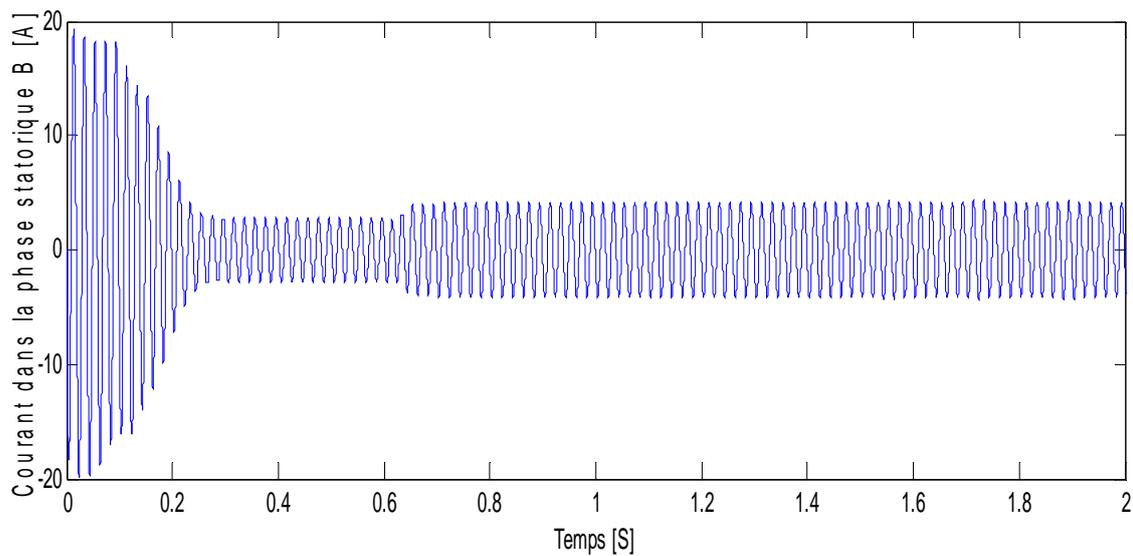


Figure III.2 : Courant dans la phase statorique B.

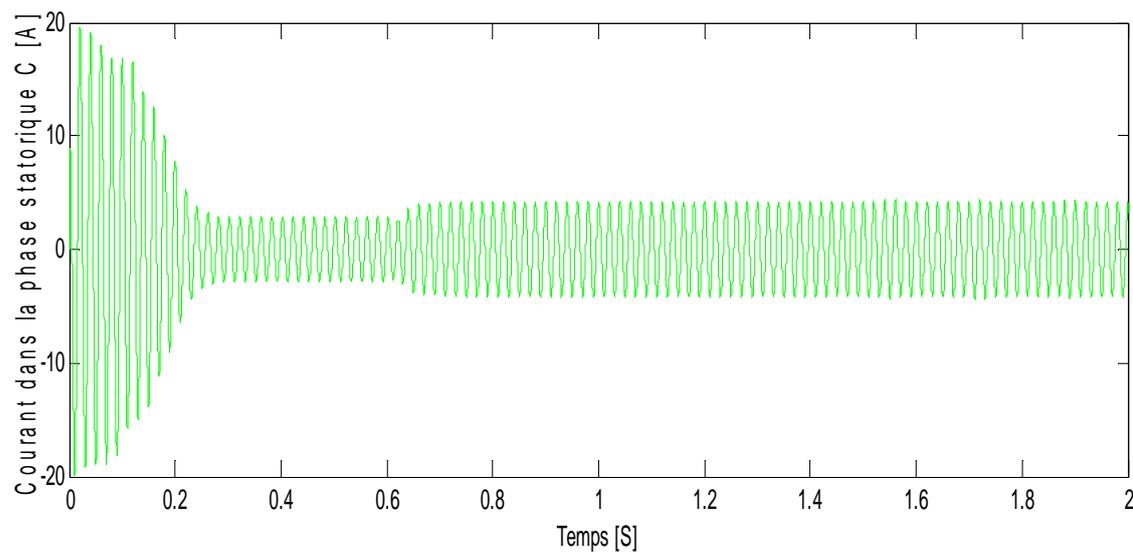


Figure III. 3 : Courant dans la phase statorique C.

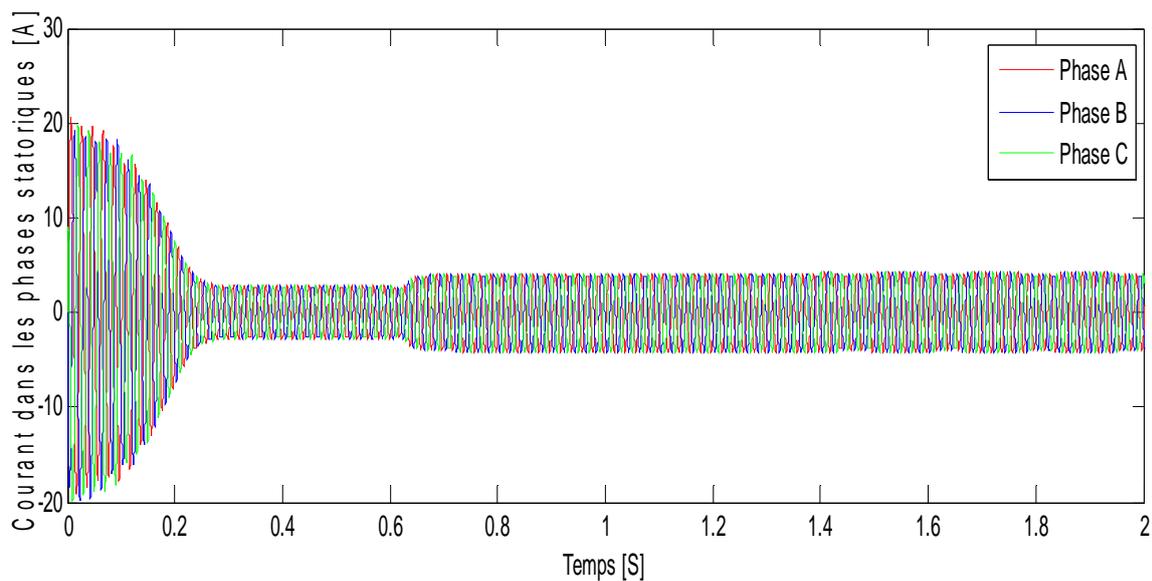


Figure III.4 : Courant dans les trois phases statoriques.

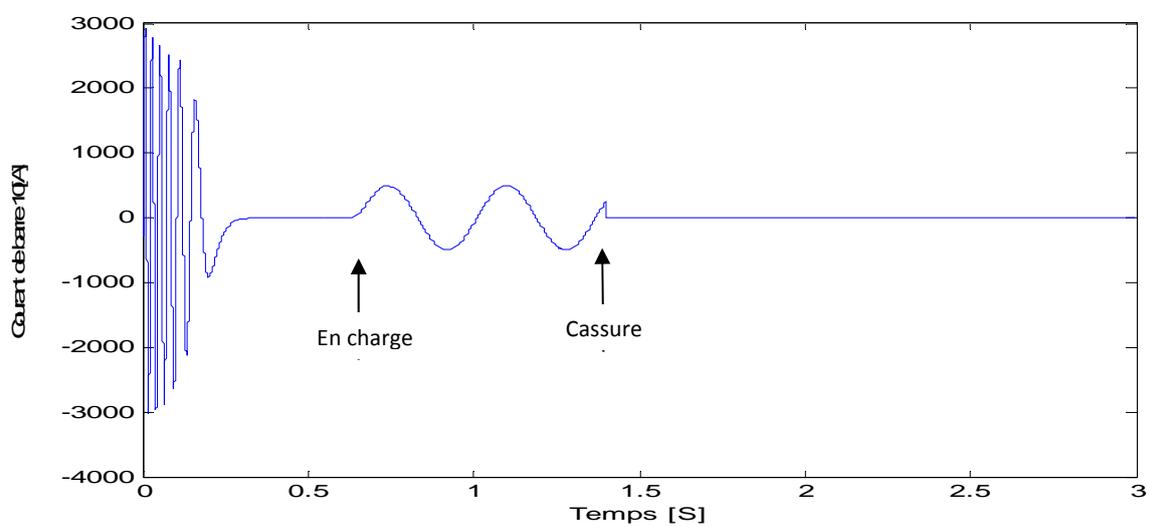


Figure III.5 : Courant de la 10^{ème} barre rotorique cassé à t=1.4 s.

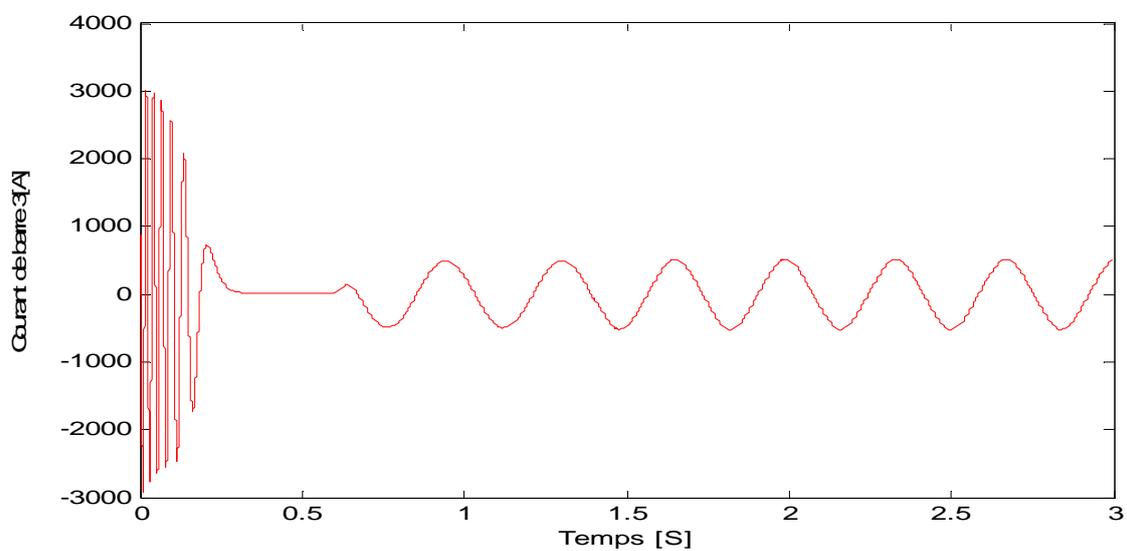


Figure III.6 : Courant dans la 3^{ème} barre rotorique.

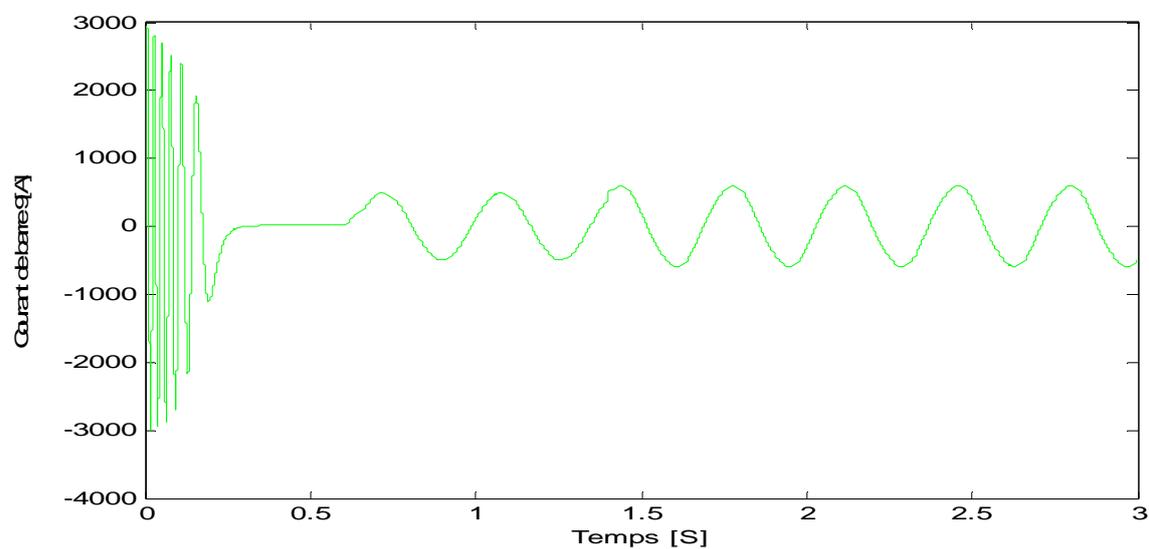


Figure III.7 : Courant de la 9^{ème} barre rotorique.

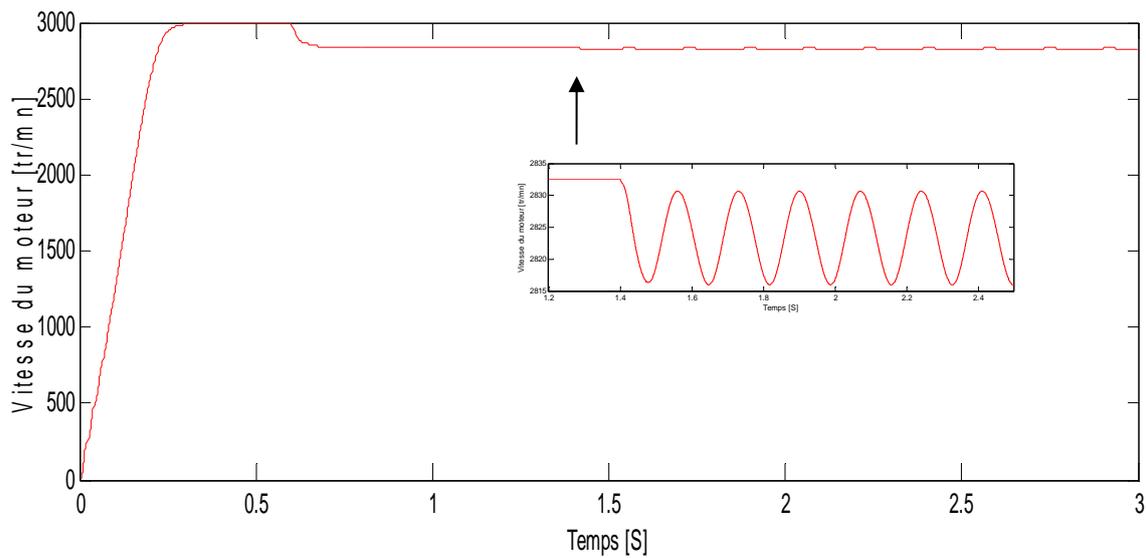


Figure III.8 : La vitesse de rotation du moteur.

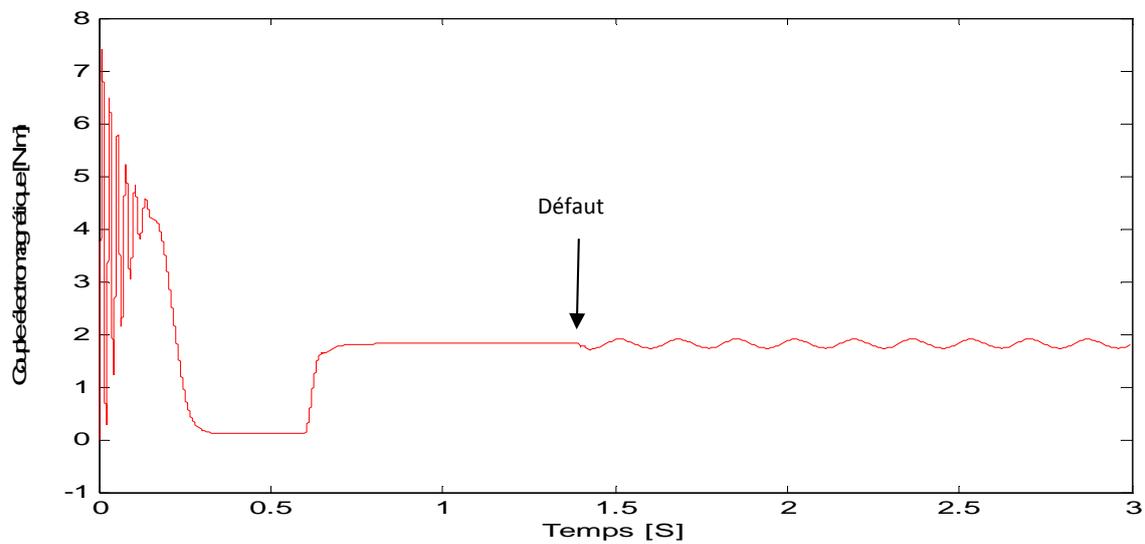


Figure III. 9 : Couple électromagnétique.

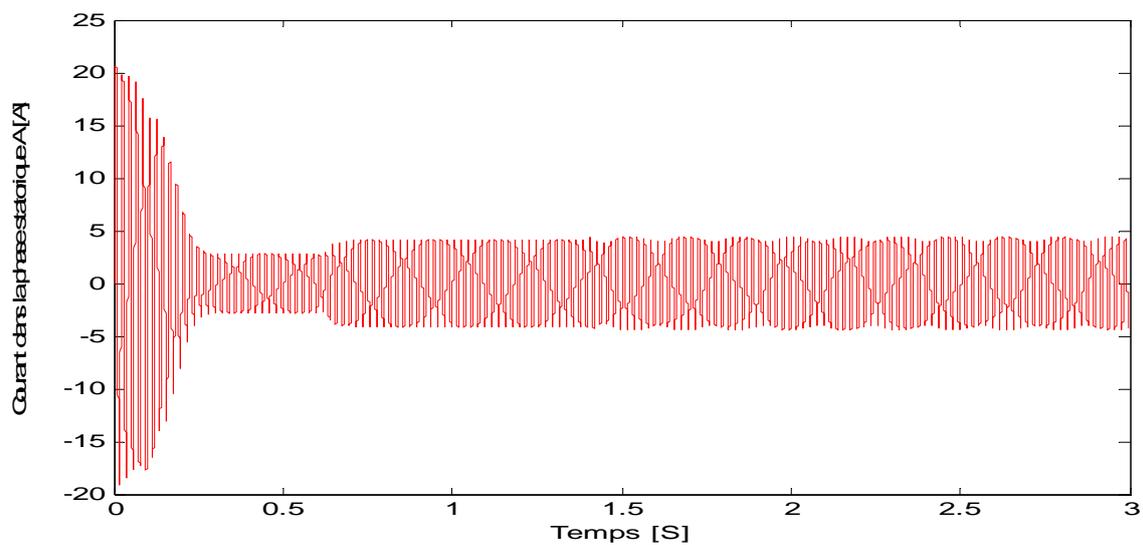
III.2.1.2 Cas d'une cassure deux barres adjacentes (N° 9 et N° 10) à $t=1.4s$ 

Figure III. 10 : Courant dans la phase statorique A.

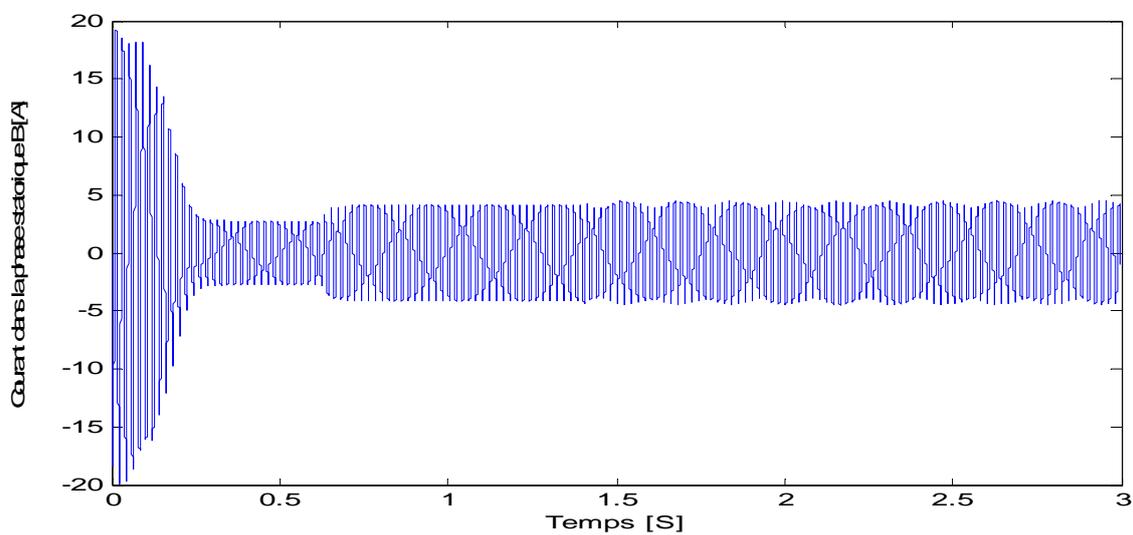


Figure III.11 : Courant dans la phase statorique B.

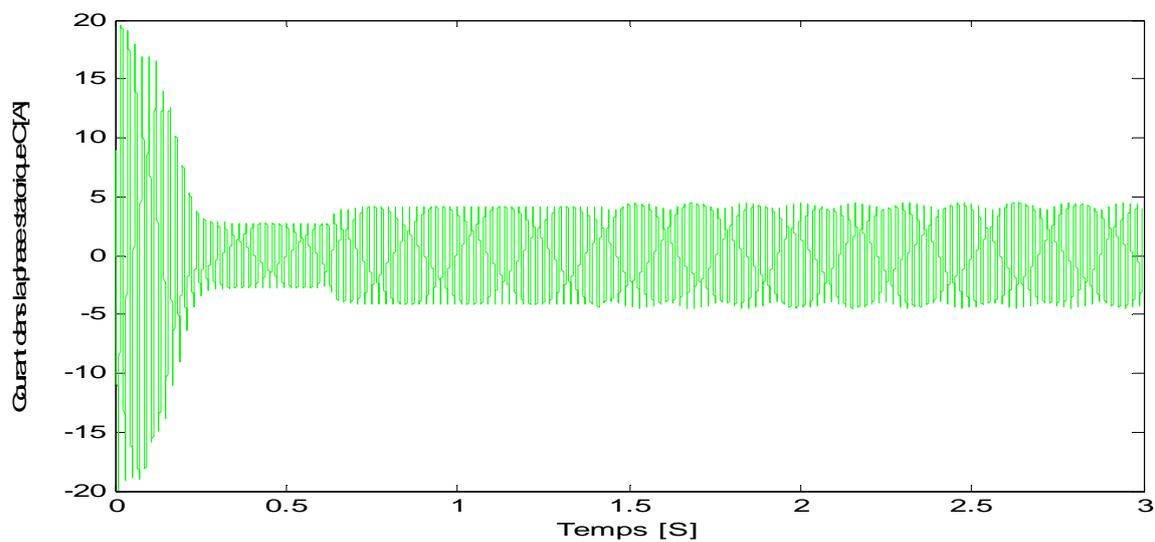


Figure III.12 : Courant dans la phase statorique C.

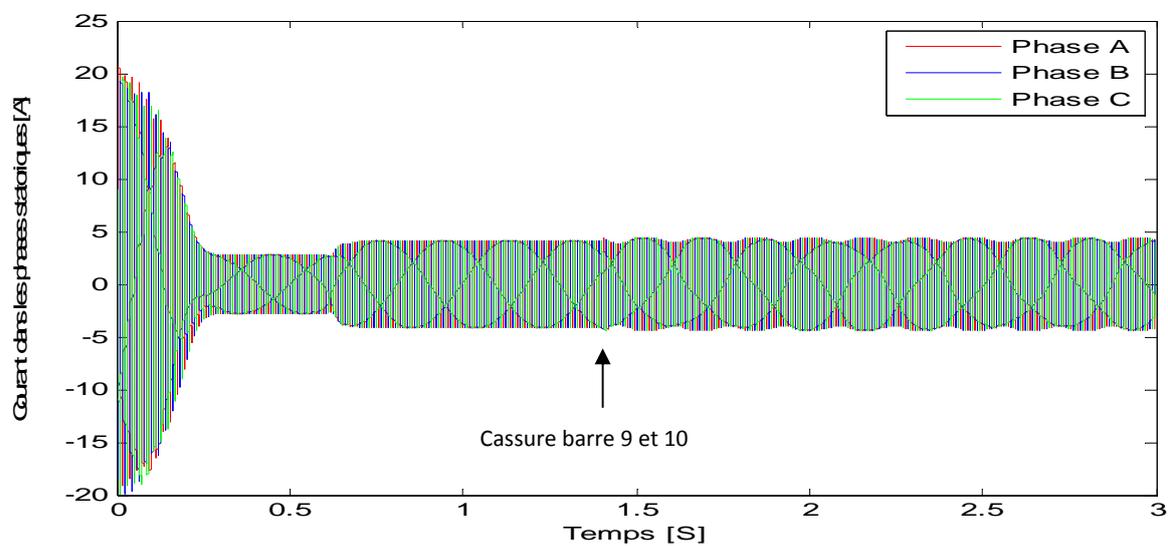


Figure III.13 : Courant dans les trois phases statoriques.

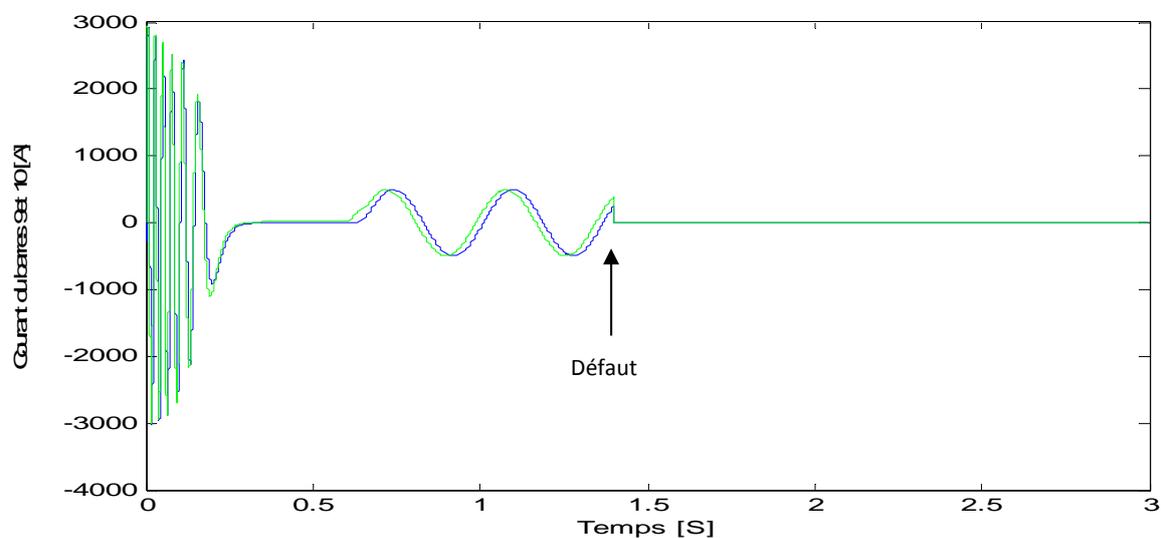


Figure III.14 : Courant de la 9^{ème} et la 10^{ème} barres rotoriques cassés à t=1.4s.

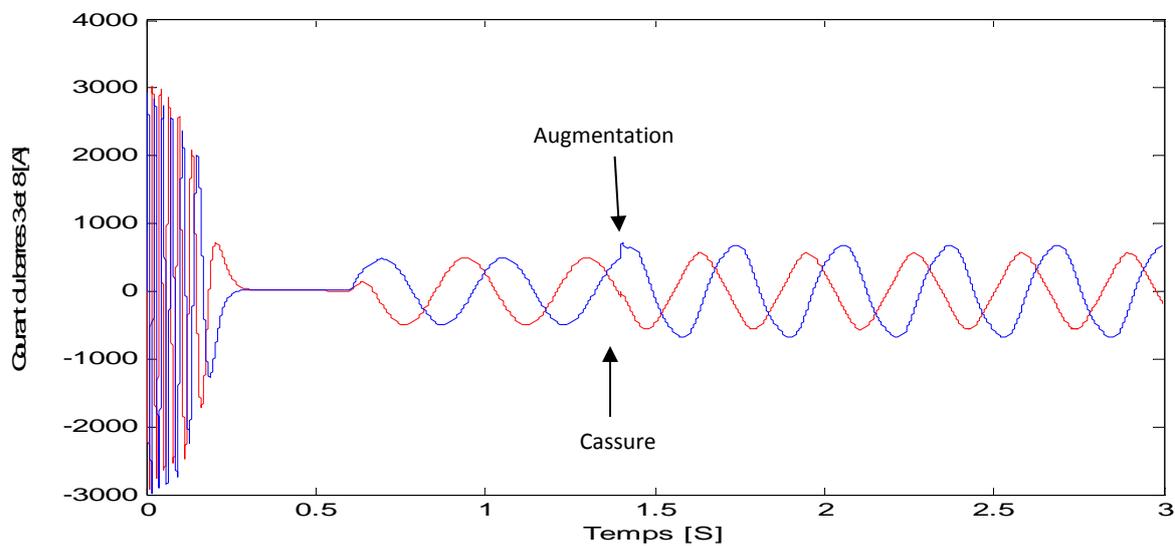


Figure III.15 : Courant de la 3^{ème} et la 8^{ème} barre rotoriques de référence.

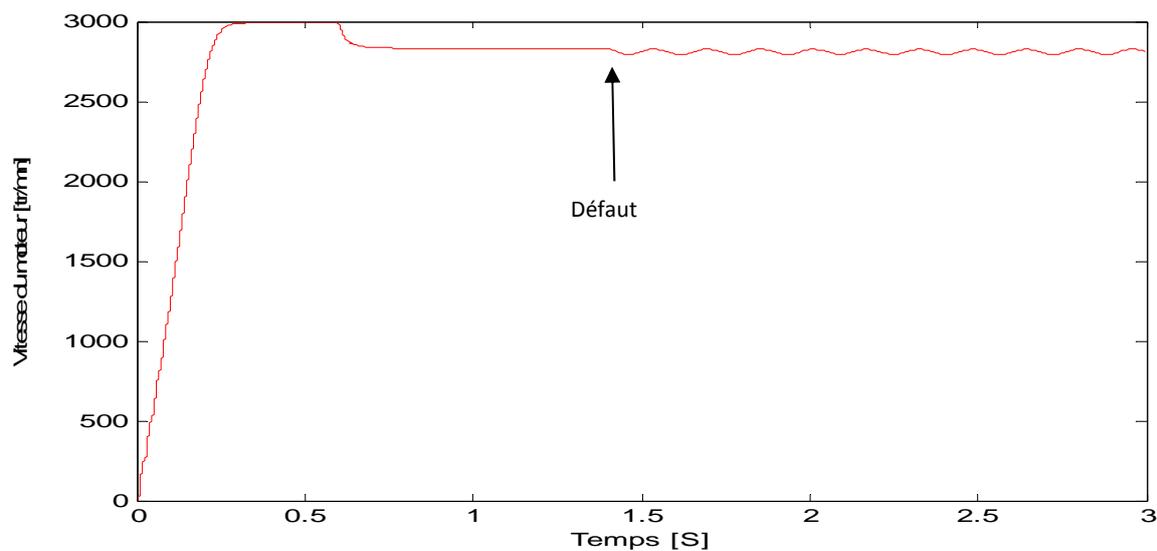


Figure III.16 : La vitesse de rotation du moteur.

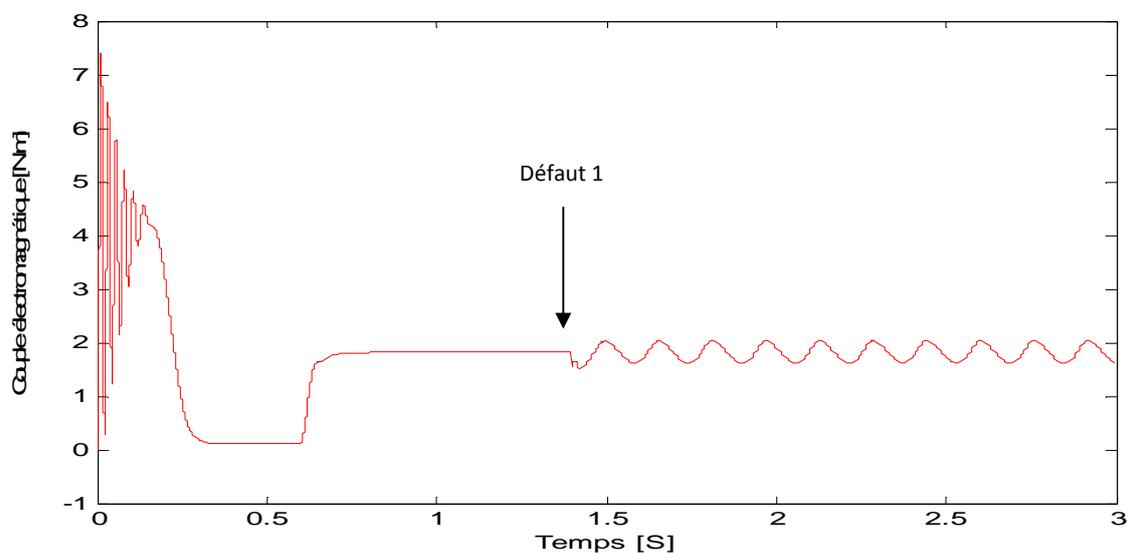


Figure III.17 : Couple électromagnétique.

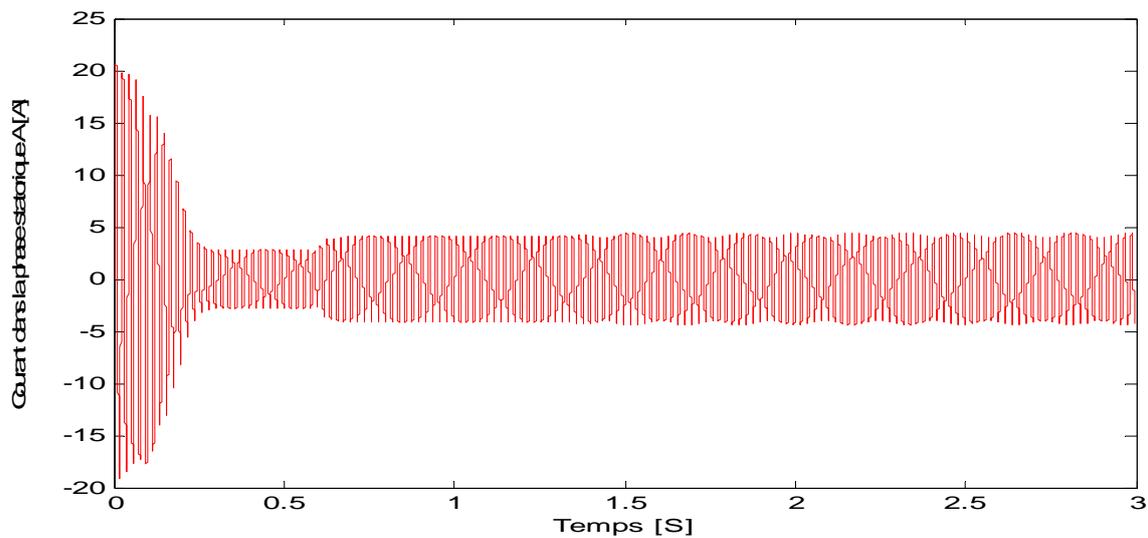
III.2.1.3 Cas d'une cassure de deux barres opposées (N° 2 et N° 10) à $t=1.4s$ 

Figure III.18 : Courant dans la phase statorique A.

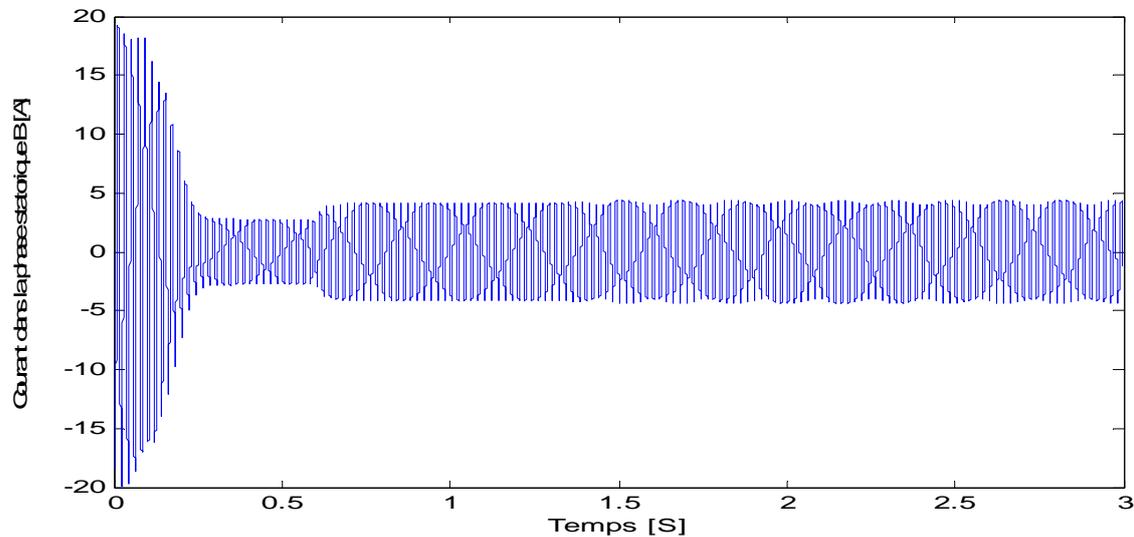


Figure III.19 : Courant dans la phase statorique B.

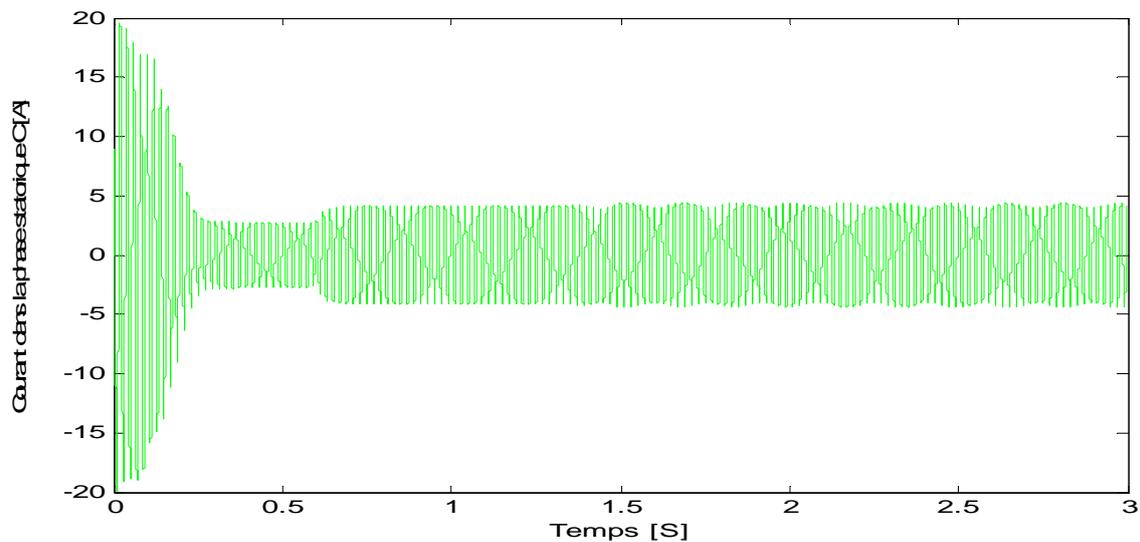


Figure III.20 : Courant dans la phase statorique C.

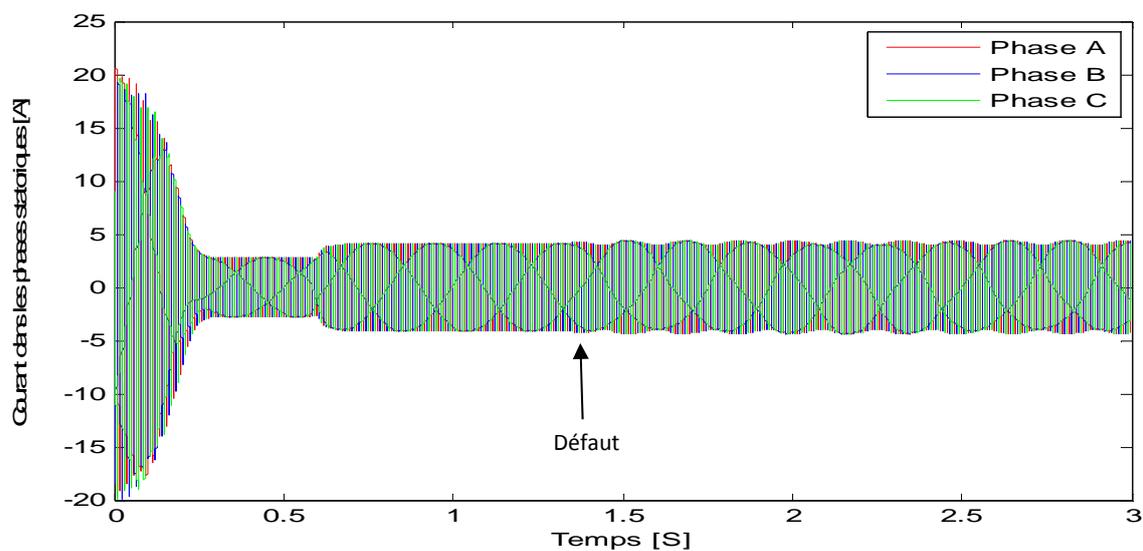


Figure III.21 : Courant dans les trois phases statoriques.

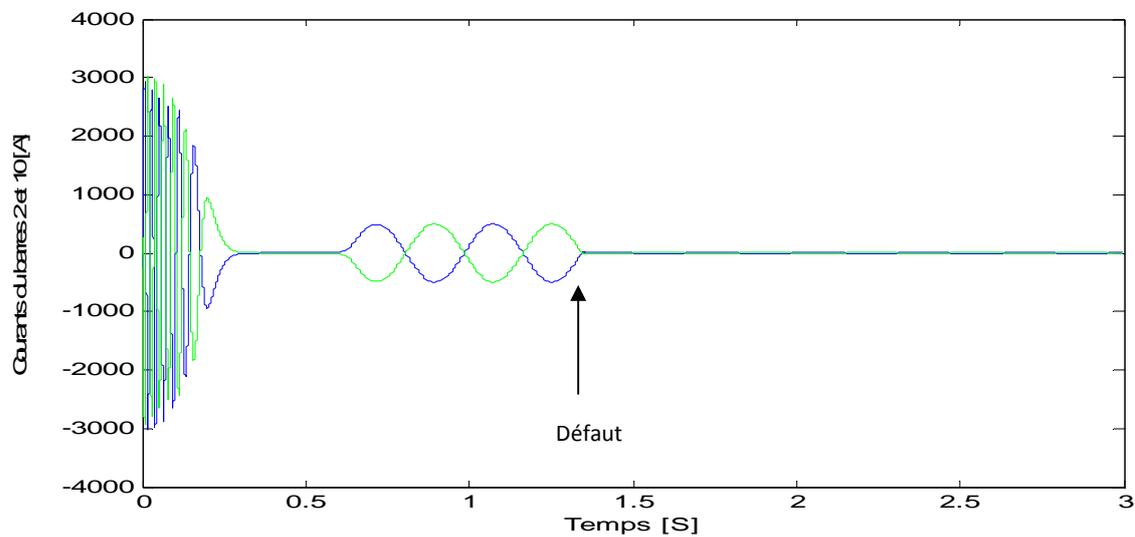


Figure III.22 : Courant dans la 2^{ème} et la 10^{ème} barres rotoriques cassés à t=1.4s.

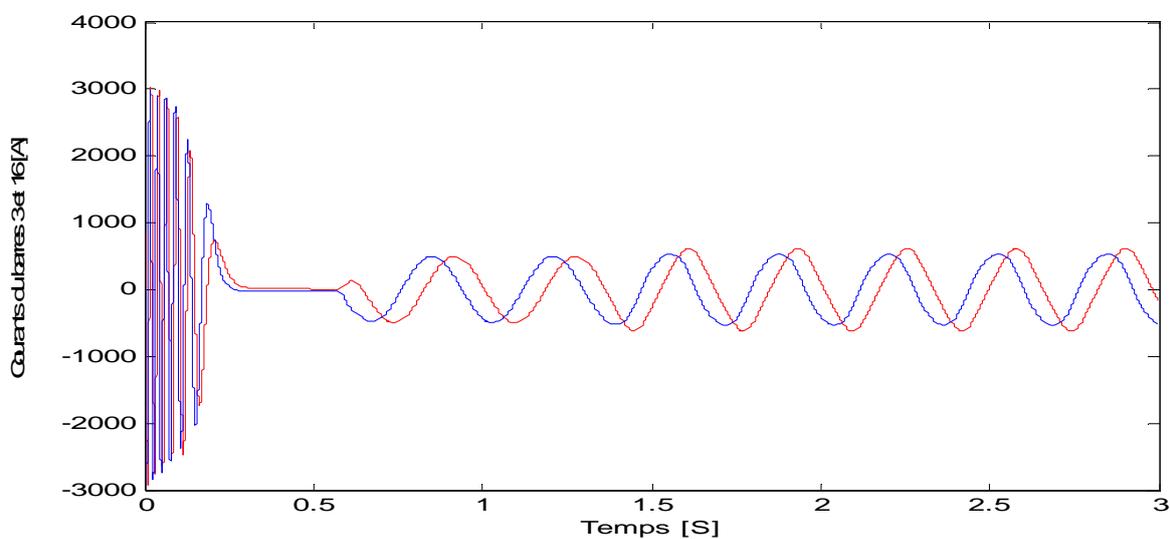


Figure III.23 : Courant dans la 3^{ème} et la 16^{ème} barre rotoriques de référence.

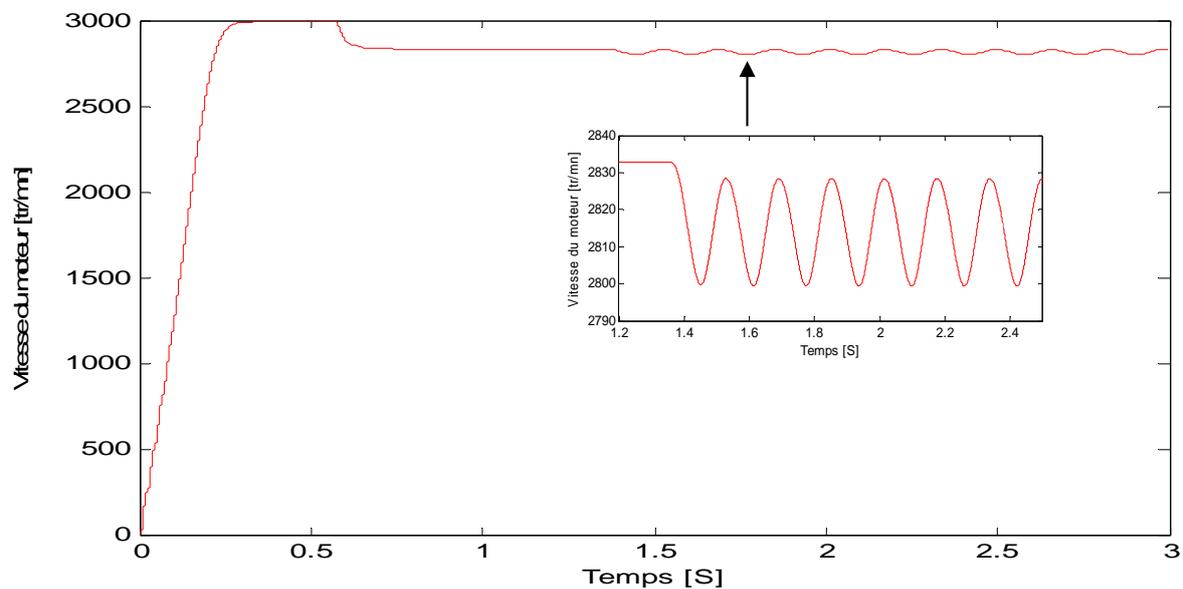


Figure III.24 : La vitesse de rotation du moteur.

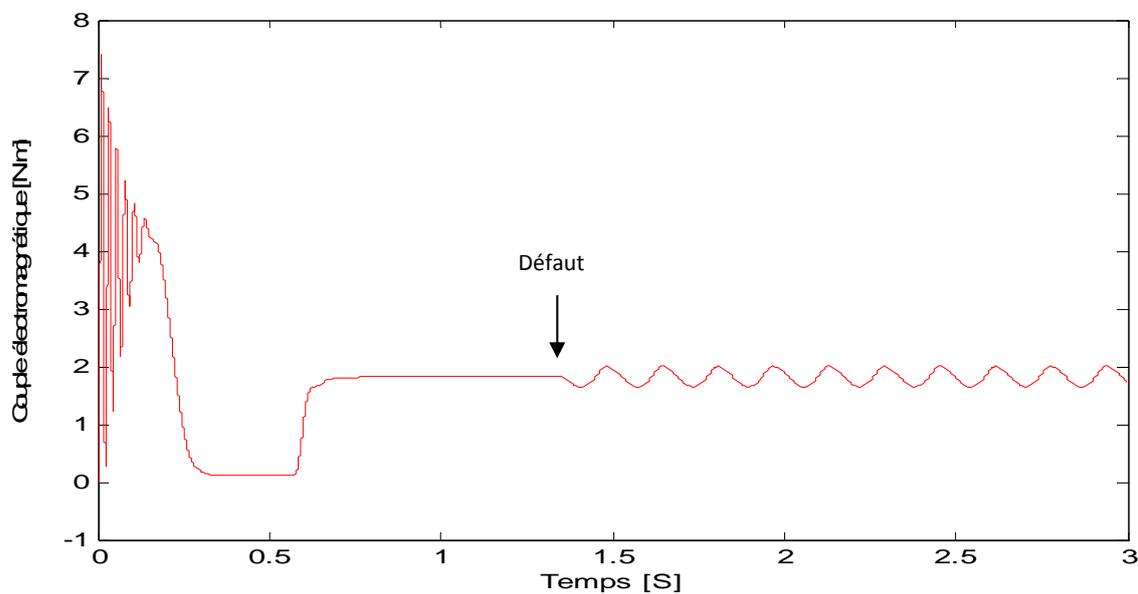


Figure III.25 : Couple électromagnétique.

III.2.1.4- Cas d'une cassure de trois barres simultanément (barres N° 9, 10, et 11) à (1.4s, 1.5s et 2.6s)

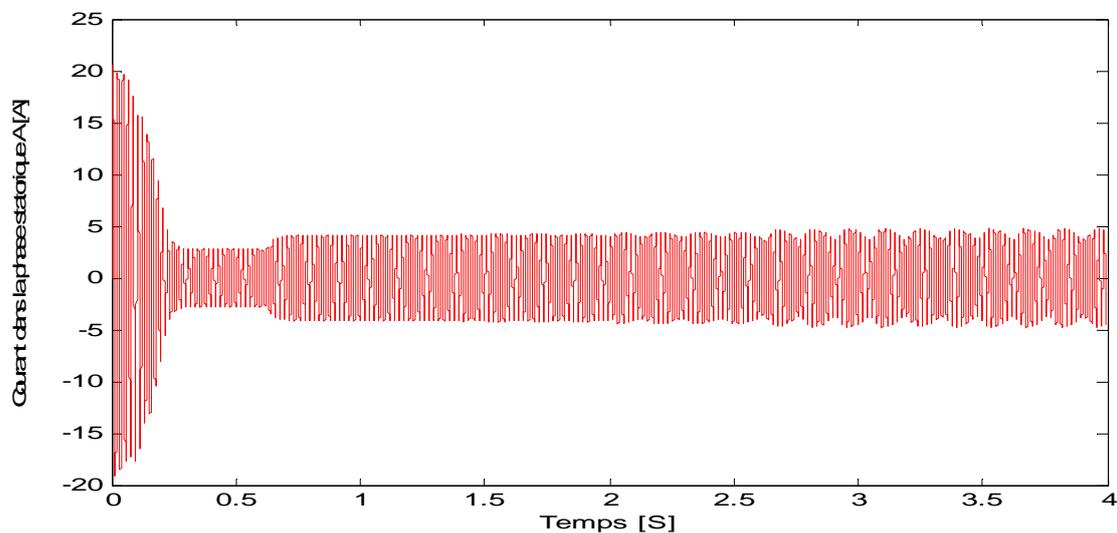


Figure III.26 : Courant dans la phase statorique A.

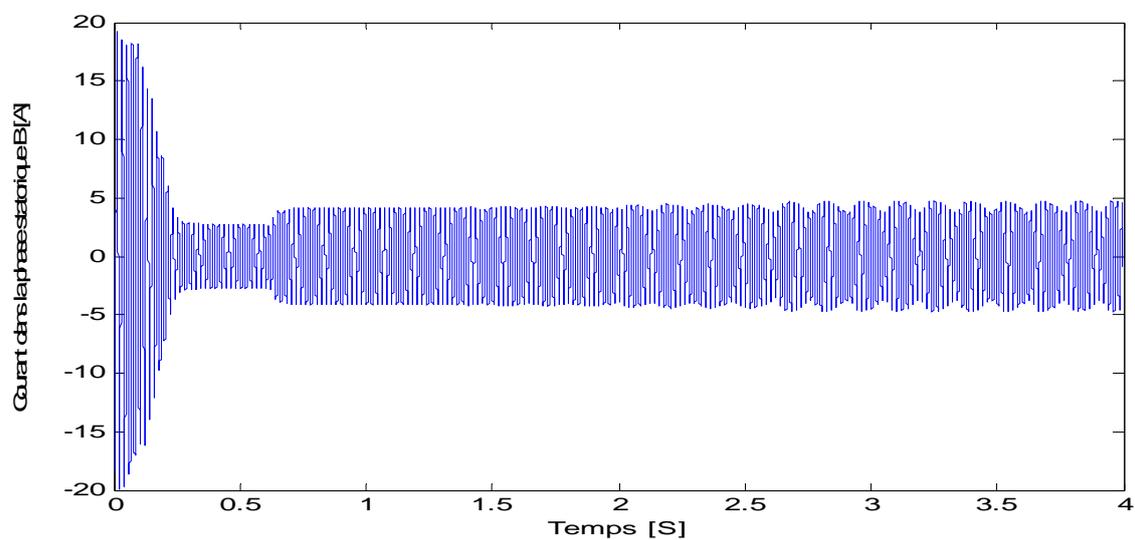


Figure III.27 : Courant dans la phase statorique B.

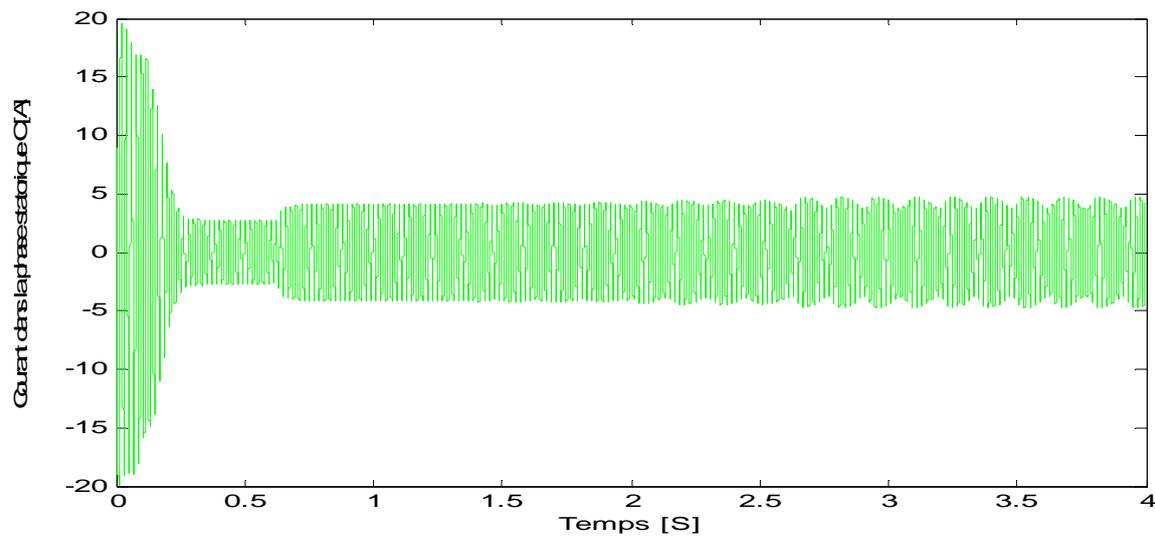


Figure III.28 : Courant dans la phase statorique C.

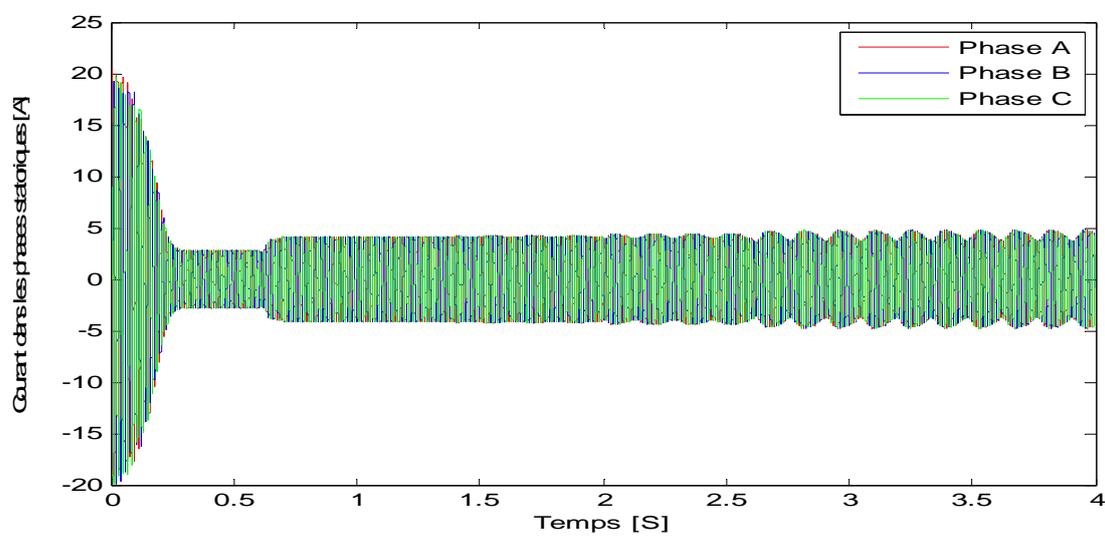


Figure III.29 : Courant dans les trois phases statoriques.

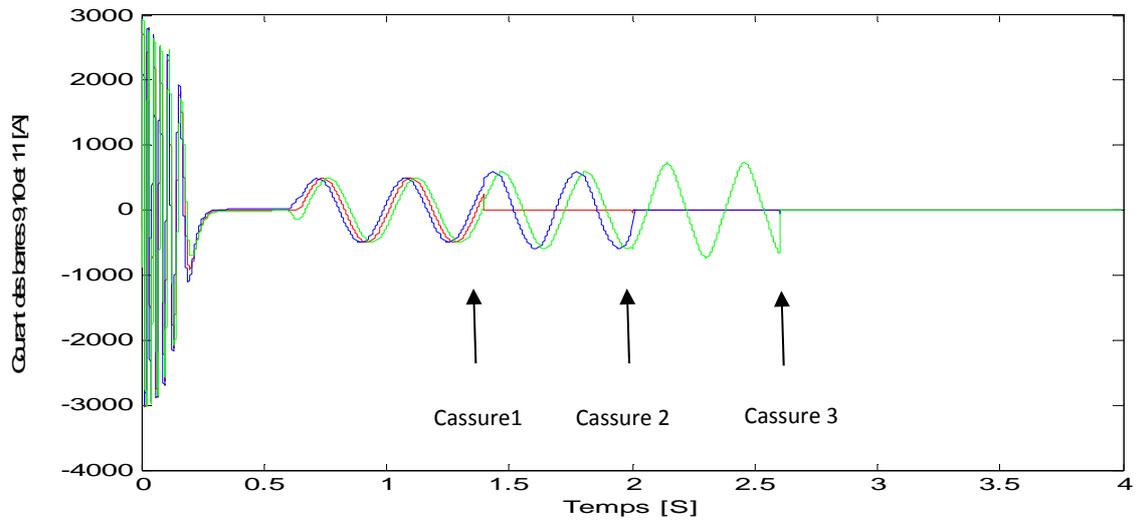


Figure III.30 : Courant dans les barres rotoriques 9,10 et 11 cassés à $t=1.4s$, $2s$ et $2.6s$.

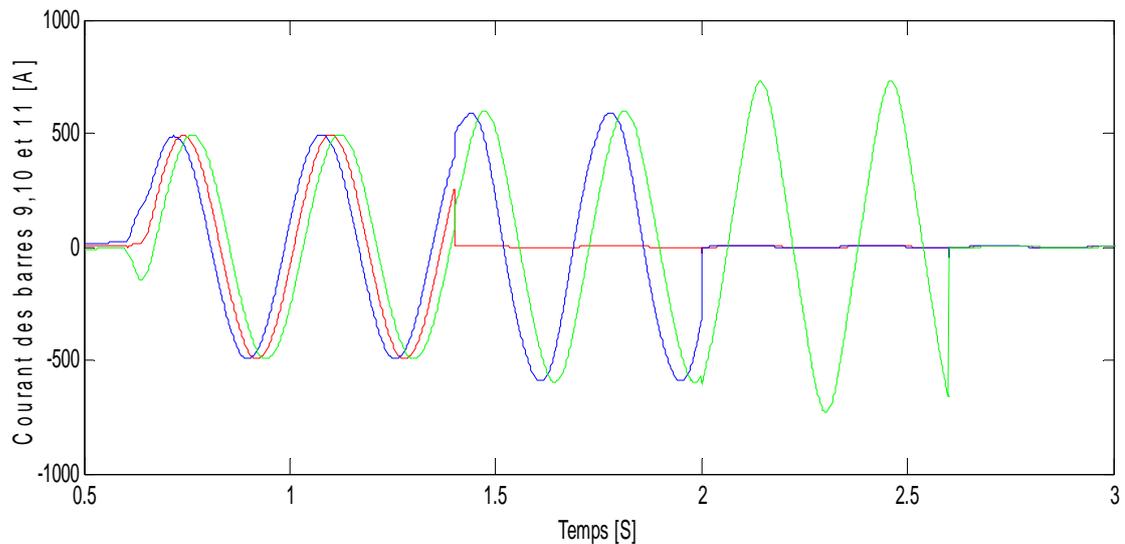


Figure III.31 : Zoom du courant dans la 9^{ème}, 10^{ème}, et la 11^{ème} barre rotorique cassées.

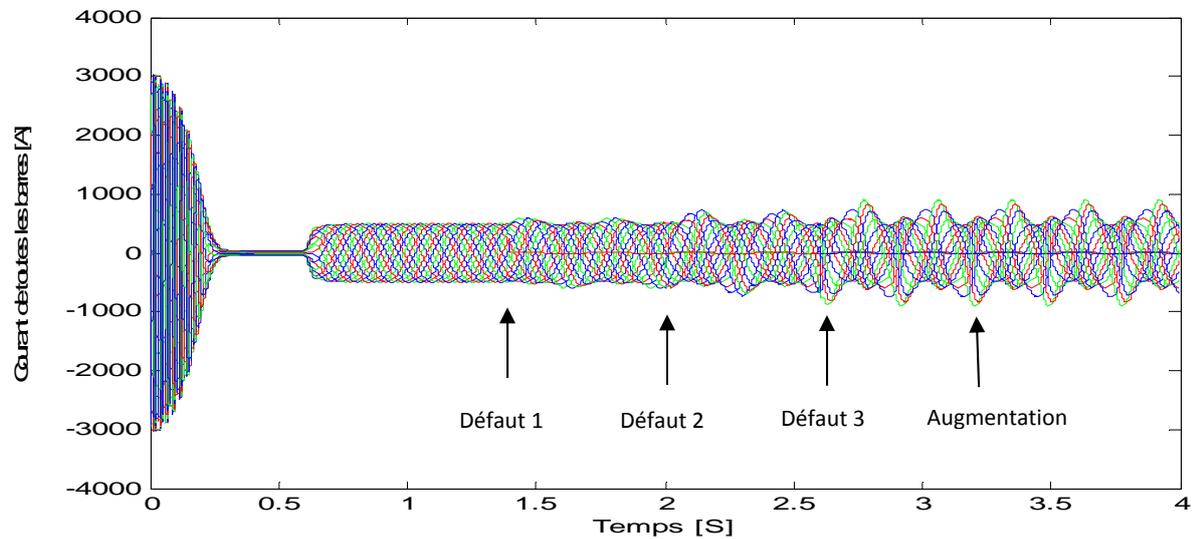


Figure III.32 : Courant dans toutes les barres rotoriques.

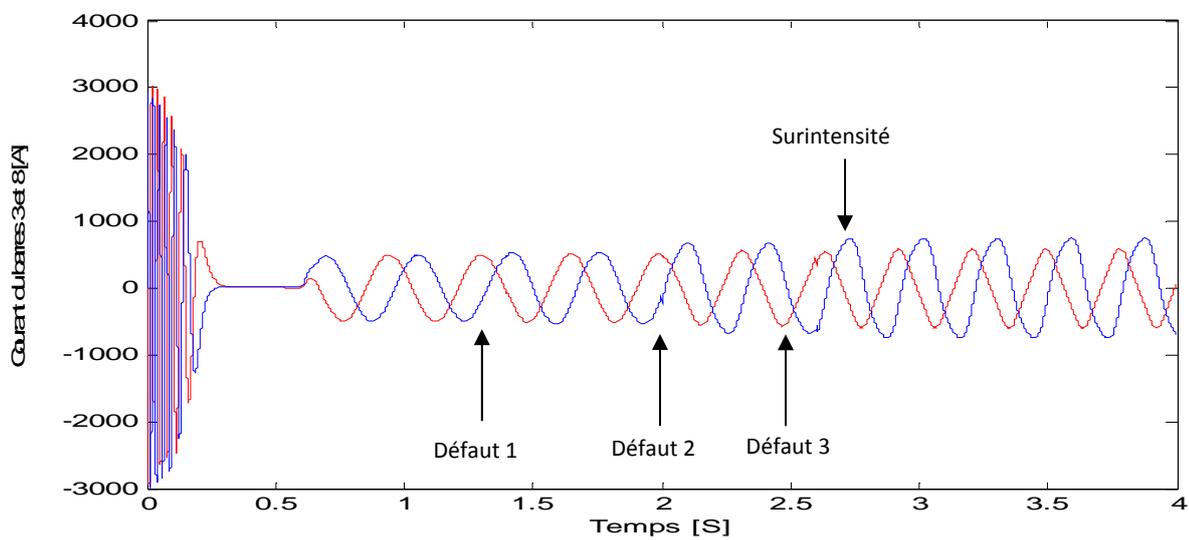


Figure III.33 : Courant dans la 3^{ème} et la 8^{ème} barre rotorique.

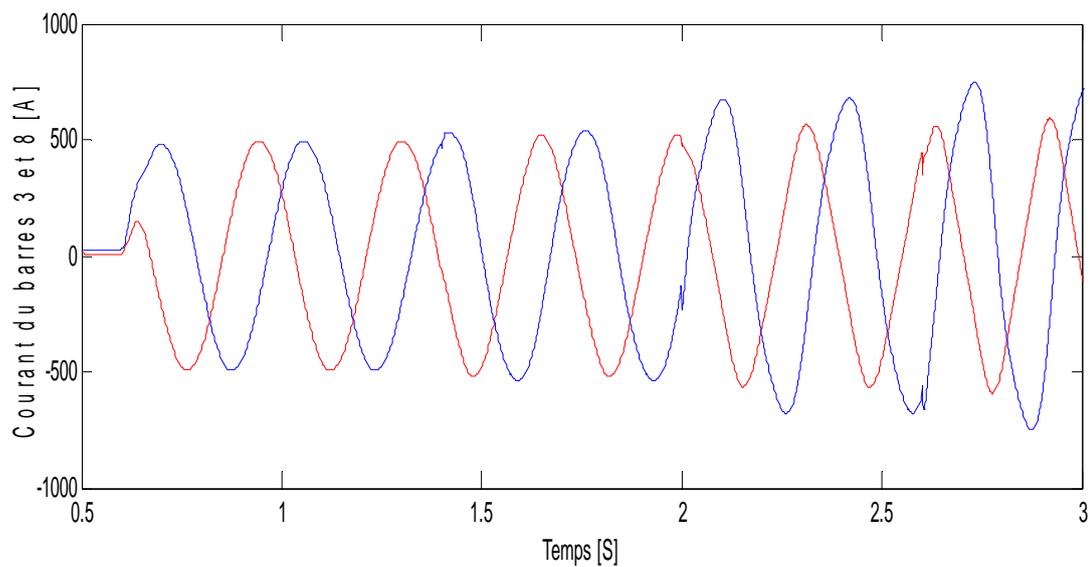


Figure III.34 : Zoom le courant dans la 3^{eme} et la 8^{eme} barre rotorique.

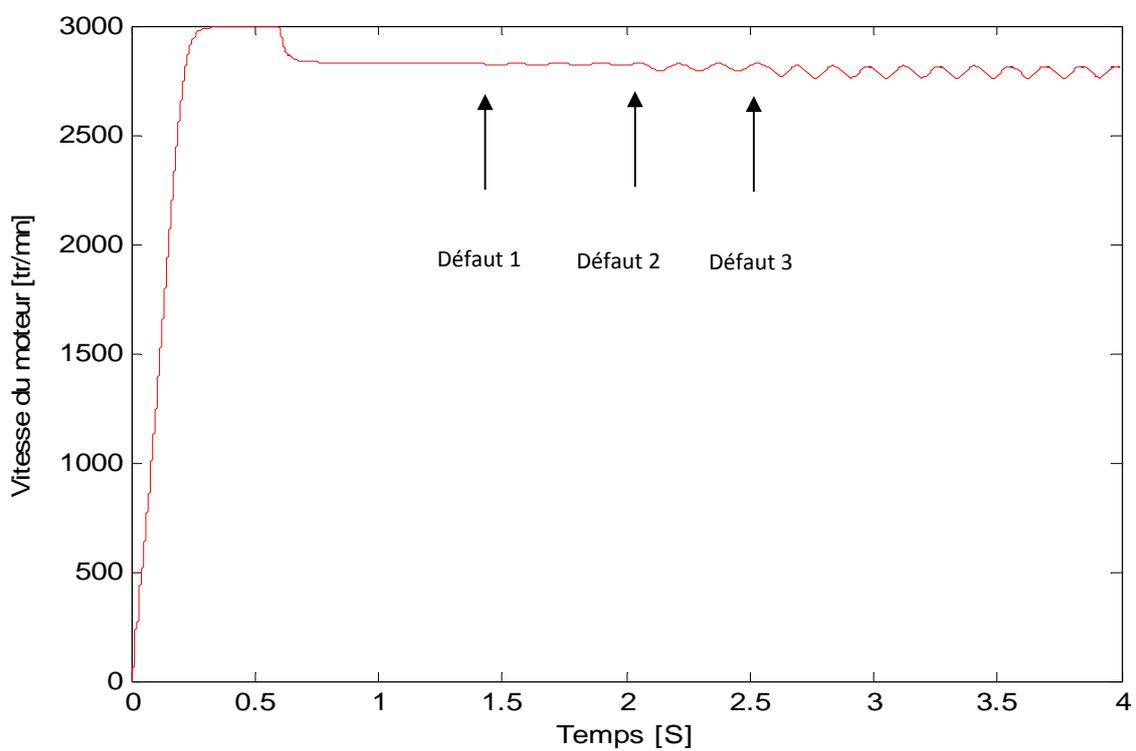


Figure III.35 : La vitesse de rotation du moteur.

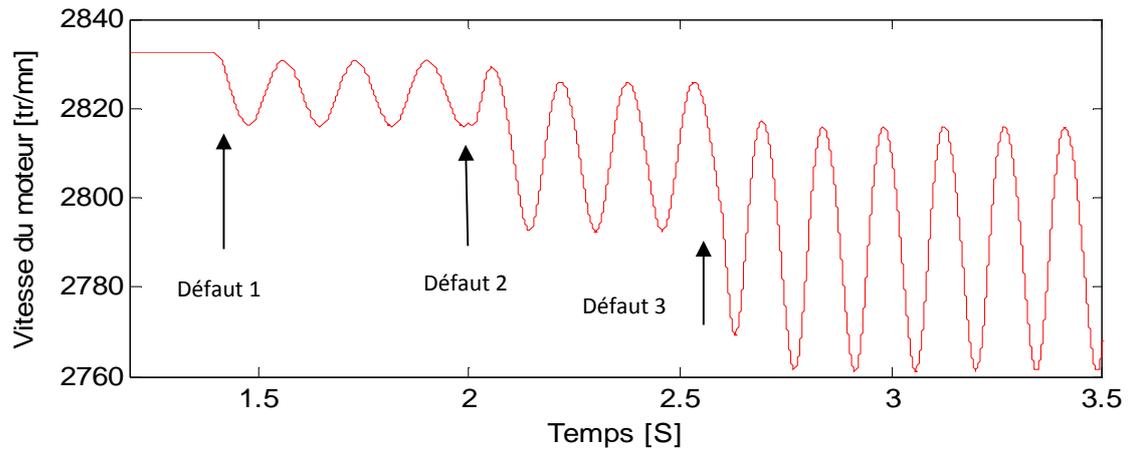


Figure III.36 : Zoom la vitesse de rotation du moteur.

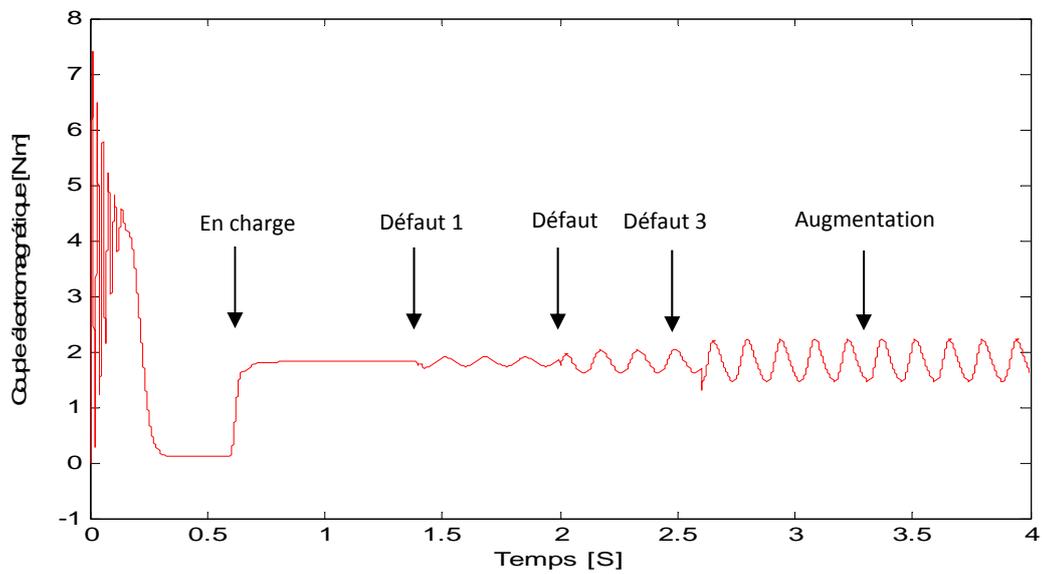


Figure III.37 : Couple électromagnétique.

III.3- Interprétation des résultats

III.3.1- Cas d'une barre cassée (N° 10 à $t = 1.4s$)

Le démarrage s'effectue à vide sous tension nominale avec une alimentation triphasée sinusoïdale équilibré. A l'instant $t = 0.6s$, la machine est soumise à un couple résistance nominale $C_r = 3.5Nm$. Dans ce cas-là, le couple électromagnétique vient pour équilibrer le couple résistance, et la vitesse chute alors à la valeur de $2832tr/m$. Ainsi, le courant rotorique augmente et atteint la valeur de 520 A (voir les figure III.5, III.6 et III.7).

A l'instant $t = 1.4s$, on simule ainsi la rupture de la barre 1. Par conséquent, le courant dans cette barre s'annule en augmentant sa résistance de 200fois (voir la figure III.5). On constate l'apparition d'une légère oscillation dans courbe de la vitesse (figure III.8), dans le couple (figure III.9), ainsi qu'une très légère ondulation du courant statorique (figure III.2).

III.3.2- Cas d'une cassure de deux barres adjacentes (N° 9 et N° 10 à $t = 1.4s$)

Nous simulons dans ce cas la rupture de deux barres adjacentes afin de montrer l'influence du nombre de barres cassées sur le fonctionnement normal du MAS. Par conséquent, le courant dans ces barres s'annule fortement (voir figure III.14) et entraîne une surintensité dans les barres voisines (figure III.15). Ainsi, le courant qui parcourait la barre cassée est alors réparti dans les barres voisines, ce qui traduit l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans les courbes de vitesse et du couple (voir les figures III.16 et III.17). Nous constatons également l'augmentation de l'amplitude des ondulations du courant statorique.

III.3.3 Cas de cassure de deux barres opposées (N° 2 et N° 10) à $t = 1.4s$

Dans le cas de rupture de deux barres opposées, nous pouvons noter clairement que le courant qui circulait dans les deux barres défaillantes se partage dans les barres adjacentes (voir la figure III.18, III.19, III.20 et III.21). Ainsi, une augmentation est remarquée sur les amplitudes des ondulations de la vitesse et du couple, (voir les figures III.22 et III.25), plus une augmentation d'amplitudes des courants statoriques (voir la figure III.13).

III.3.4 Cas de cassure de trois barres simultanément barres N° 9, 10, et 11 à (1.4s, 1.5s et 2.6s)

Dans ce dernier test, on présentera le cas de rupture de trois barres (voir figure III.26 jusqu'à III.37). Par conséquent, On obtient le même comportement de la machine dont on constate l'augmentation des amplitudes des surintensités des barres voisines, (voir la figures

III.30, III.31 et III.32), ainsi que l'augmentation des amplitudes des ondulations de la vitesse et du couple, (voir les figures III.35, III.36, et III.37) plus une augmentation d'amplitudes des courants statoriques pour (voir les figures III.26, III.27, III.28 et III.29).

Lorsque le défaut atteint trois barres cassées, on constate que le courant maximum traversant les barres adjacentes est supérieur au courant rotorique obtenu avec une cage d'écureuil saine. De ce fait, une augmentation anormale du courant dans les barres provoque un échauffement local et conduit à une nouvelle rupture [9]. D'après l'analyse précédent, on peut conclure que la détection d'une ou plusieurs défaut de barres rotorique est très difficile si l'on ne se base que sur l'analyse des signaux [9].

III.4 Analyse spectral du courant statorique

L'analyse précédente ne permet pas une visualisation adéquate et une détection exacte de ruptures de barres. Ainsi, la distinction de toutes modulations ou oscillations perturbantes des grandeurs mesurables de la machine est rendu difficile si on se base seulement sur l'analyse des signaux temporels. Pour pouvoir discerner facilement la modulation de l'amplitude de fréquence ($2 \cdot g \cdot f_s$) qui est la fréquence caractérisant le défaut de rupture de barres, une analyse de ces signaux dans le domaine fréquentiel devient une nécessité. C'est là ou l'analyse spectrale du courant statorique sera introduite elle reste toujours parmi les méthodes les plus employée depuis de nombreuses années qui servent à détecter les défaillances dans les machines électriques.

De ce fait, nous déterminons le contenu fréquentiel du courant statorique tout en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT), et par la suite nous retrouverons les raies et les bandes latérales associées aux défauts rotoriques [14].

L'analyse par la transformée de Fourier rapide (FFT) permet de mettre en évidence les raies présentes dans le spectre du signal.

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont été présentés dans la littérature de diagnostic afin de présenter des solutions performantes pour les ruptures des moteurs asynchrone à cage. L'auteur a présenté une étude détaillée sur les outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil [14]. Ainsi, un travail de thèse présenté par [1] cible spécifiquement la détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes, dont l'auteur a présenté une étude large sur cette technique FFT, ce qui a permis d'avoir des résultats acceptables.

Tenant compte des techniques et des résultats obtenus dans les travaux [1] et [14], nous présentons les résultats de simulation de l'analyse du courants statorique I_{sa} par FFT en régime permanent et en charge.

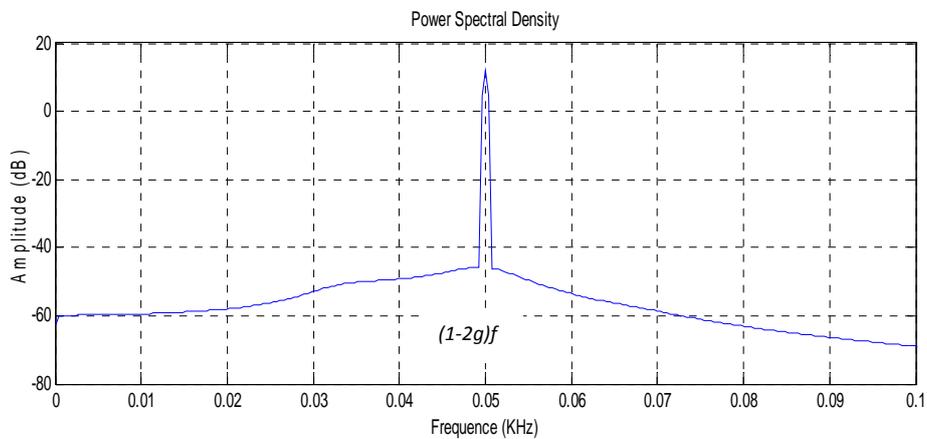


Figure III.38 : Spectre du courant statorique dans la plage [0-100] Hz

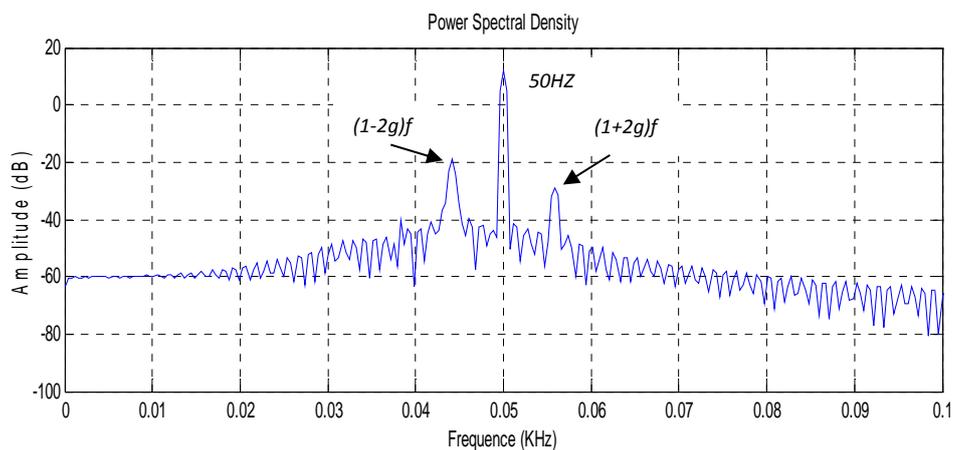


Figure III.39 : Spectre du courant statorique en présence d'une cassure de barre.

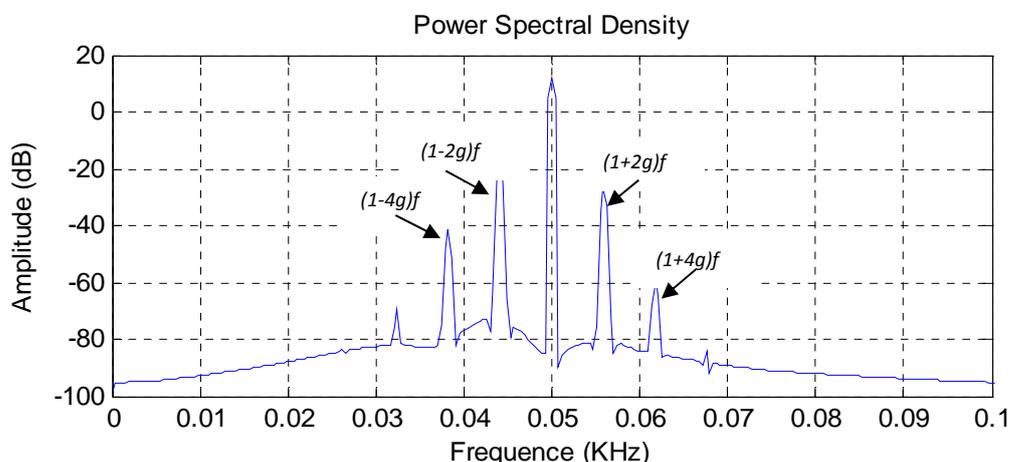


Figure III.40- Spectre du courant statorique en présence d'une cassure de 2 barres adjacentes

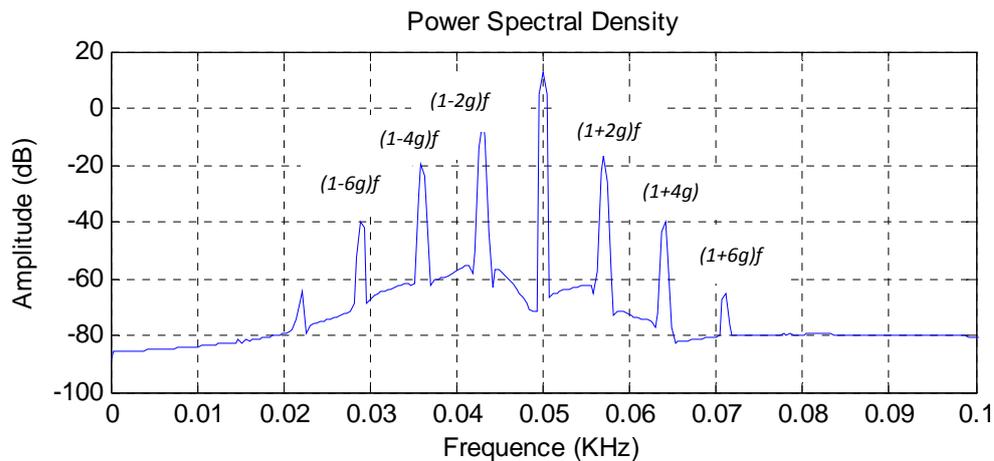


Figure III.41 : Spectre du courant statorique en présence d'une cassure de 3barres adjacentes.

III.5- Interprétation des résultats l'analyse spectral du courant statorique

Les figure (III.38), (III.39), (III.40) et (III.41) mettent en évidence l'allure du spectre fréquentielle du courant statorique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en charge à l'état sain et en présence de défaut de cassure de barres rotoriques.

Ensuite, la figure (III.38) présente le contenu spectral du courant statorique en régime permanent lorsque la machine ne présente aucuns défauts (fonctionnement sous conditions nominales). Ainsi, nous n'observons aucunes raies latérales mais juste la fondamentale oscillant à 50 Hz.

La figure (III.39) montre le spectre du courant dans le cas d'une barre casée, dont la rupture de barre manifeste par la création d'harmonique de fréquence $(1 \pm 2kg)f_s$.

Dans notre cas, le glissement est de $g = 0.056$ dont les fréquences sont de valeurs $f_{b1} = 44.4\text{HZ}$ et $f_{b2} = 55.6\text{HZ}$ avec des amplitudes qui atteignent -21.5db et -16db nous montre une apparition des raie au voisinage de la fréquence fondamentale 50HZ. Ces fréquences ont pour expression $(1 \pm 2kg)f_s$, ($k = 1, 2, 3, \dots$). Elles apparaissent sous formes de raies latérales. Lors de la rupture de la seconde barre adjacente, on constate l'augmentation des amplitude avec des raies à $(1 \pm 4g)f_s$. Ainsi de suite avec la rupture de la troisième barre et la quatrième barre adjacente pour arriver à l'expression finale, en tenant compte des harmoniques de raies latérales qui aura pour expression $(1 \pm 2kg)f_s$ dont leurs amplitudes évoluent avec la rupture de barres adjacentes [14].

Les figures (III.40) et (III.41) représentent le spectre du courant statorique en fonction avec deux et trois barres adjacentes cassées. Une apparition des raies latérales au voisinage du fondamental correspondant aux raies de défaut.

III.6- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation d'une machine en présence d'un ou plusieurs cassure de barre, Cette étude nous a permis d'identifier l'impact de défaut sur l'évolution temporelle des différentes grandeurs tels que les courants, la vitesse et le couple électromagnétique de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

D'après les résultats l'effet du défaut de rupture des barres provoque des oscillations dans le couple électromécanique et dans la vitesse, ainsi qu'une modulation de l'enveloppe du courant statorique, l'amplitude de ces oscillations augment avec le nombre de barres cassées. Dans le cas d'une cassure de deux barres adjacentes, l'amplitude de ces oscillations est autant importante que para port au défaut de deus barres espacées, ainsi la durée du régime transitoire augment avec la sévérité du défaut de barres.

Nous avons ensuite étudié l'analyse spectrale du courant statorique après introduction de la transformation de Fourier rapide (FFT), nous a permis de déterminer la composition fréquentielle de ce signal et par la suite retrouver les raies latérales associées aux défauts. D'après ces résultats, on constate que la présence des harmoniques $2k f_s$ est un signe de l'existence du défaut de barre et leurs amplitudes indiquent son degré de sévérité.

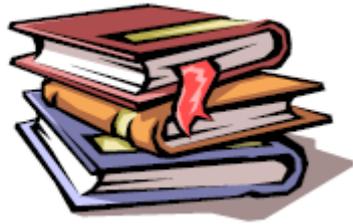
Conclusion Générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté traite donc du diagnostic de défauts rotoriques et plus particulièrement la rupture de barres pouvant survenir au sein de la cage d'écureuil des machines asynchrones.

Dans ce manuscrit, nous avons présenté un modèle externe de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime sain. 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 l'environnement 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.

Ainsi, la modélisation de la machine en présence de défaut de cassure de barres, nous a permis de mettre en évidence un modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil en présence de défaut. De ce fait, le modèle utilisé permet de simuler pratiquement tous les défauts envisageables dans les circuits rotoriques. Nous avons étudié la rupture des barres rotoriques, et ses influences sur le comportement de la machine. Les conséquences de ces défauts s'obtiennent en augmentant la résistance de la barre incriminée. Les résultats de simulation montrent que la rupture de barre 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.



Bibliographie

- [1] : HAKIMA CHERIF « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », Mémoire de Magistère, Université de Biskra, sep 2014.
- [2] : MOHAMED EL KAMEL OUMAAR« Surveillance et diagnostic des défauts rotorique et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée », thèse de doctorat, Université de Lorraine, Mars 2012
- [3] : M.SADDEK, H.DJAAFAR «Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode de reconnaissance des forme » mémoire PFE ENP Alger 2007.
- [4] : THEODOR WILDI «ELECTRTECHNIQUE » avec la collaboration de GILBERT SYBILEB, 2^e édition, De Boeck Supérieur- 2005.
- [5] : GUETTAB ABDELKADER« Effet de l'alimentation sur la détection des défauts dans une machine asynchrone à cage basée sur l'analyse de signal du courant », mémoire de Magister, université de Chleff Avril 2011.
- [6] : BOUAOUDA S, CHERIFI R« Etude des procédés de démarrage des moteurs asynchrone au sein de la station d'enrobage SARL EBER Bouira » mémoire, université de Bejaia, 2009.
- [7] : BELHAMDI SAAD« Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différents techniques de commande », Thèse de doctorat Université de Biskra Mai 2014.
- [8] : RIDHA ZAITER « Commande directe du couple DTC d'une machine asynchrone avec défaut », Mémoire de Magister, Université de Biskra juin 2013.
- [9] : G.DIDIER «Modélisation et diagnostique de la Machine asynchrone en présence de défaillance », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I.
- [10]: GILLES HOUDOUIN « Contribution à la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts rotoriques », Thèse de doctorat université de havre mai 2004.

[11] : ABBAS Rachid, et BOUABOUD Hassiba : «Modélisation de la machine à cage d'écureuil en présence des défauts de cassures de barres et d'anneaux de court-circuit », Mémoire de master université de Bouira, 2016.

[12] : HARIR Miloud : « Etude des Défauts dans La Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée », Mémoire de magister université d'Oran, 2009.

[13] : HADJ DIDA Abdelkader : « développement d'une commande numérique d'un moteur a induction», Thèse de magister université d'Oran.

[14] : MERAD Rafik : «Outils de diagnostic appliques a la machine asynchrone triphasée a cage d'écureuil», Mémoire de Magister Université de Constantine 2006.

Annexe

1.1 Caractéristiques nominales

Puissance nominale	$Pa = 1,1Kw$
Tension nominale	$220V / 380V$
Courant nominal	$I_a = 4.5 A / 2.6 A$
Vitesse nominale	$\Omega_n = 2850tr / mn$
Nombre pairs de pôles	$p = 1$

1.2 Paramètres de la machine

Les paramètres de la machine à cage d'écureuil utilisée pour la simulation présentée dans le mémoire sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Paramètres de simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Symbole	Valeur	Désignation
μ_0	$4\pi * 10^{-7}$	Perméabilité du vide
f	$50Hz$	Fréquence d'alimentation
ω_s	$2\pi f$	Pulsation de l'alimentation
V_m	$280v$	Tension composée de l'alimentation
r_s	7.828Ω	Résistance d'une phase de l'enroulement au stator
f_v	$0.725 * 10^{-3}$	Coefficient de frottement
J_t	$0.6093 * 10^{-2}$	Moment d'inertie des masses tournantes
<i>Long mot</i>	$65 * 10^{-3}m$	Longueur effective de la machine
<i>e</i>	$0.5 * 10^{-3}m$	Epaisseur de l'entrefer
R_{moy}	$37.75 * 10^{-3}m$	Diamètre moyen de l'alésage
<i>nb phase</i>	3	Nombre de phases du stator
<i>nb barre</i>	16	Nombre de barres de la cage
N_s	22	Nombre d'encoches au stator
N_{sw}	160	Nombre de conducteurs par encoche au stator
N_{rw}	1	Nombre de conducteurs par encoche au rotor
<i>Alpha sta</i>	1	Angle d'inclinaison des encoches au stator
<i>delta</i>	1	Facteur de raccourcissement
m_e	$N_s / ((2 * p) * nb_phase)$	Nombre d'encoche/pôle/phase
<i>alfa</i>	$(2 * p) / (nb_barre)$	Angle électrique entre deux barres rotoriques
l_s	0.018H	L'inductance propre d'un enroulement au stator
R_b	$150 * 10^{-6} \Omega$	Résistance d'un enroulement au rotor
R_e	$(72 * 10^{-6}) / (nb_barre) \Omega$	Résistance d'un enroulement anneau de court-circuit