

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Étude de MASTER

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Spécialité : **Machines électriques**

*Présenté par*

**NAIT SAIDJ AMRANE**

**TIGUERCHA LYNDA**

Mémoire dirigé par **DICHE AREZKI**

### Thème

## Étude de la machine asynchrone double Etoiles en régime dégradé

*Mémoire soutenu publiquement le 11/07 2018 devant le jury composé de :*

**M<sup>f</sup> : Mustapha ZAOUIA**

Maitre de conférence classe A, UMMTO, Président

**M<sup>f</sup> : Chafik BIROUCHE**

Maitre-Assistant classe A, UMMTO, Examineur

**M<sup>f</sup> : Arezki DICHE**

Maitre-Assistant classe A, UMMTO, Rapporteur

**M<sup>f</sup> : Kaci GHEDAMSI**

Professeur Univ.de Béjaïa, Rapporteur

# Remerciements

*Au terme de ce travail :*

*Nous tenons, en premier lieu à remercier le bon dieu pour le courage, la volonté et la patience qu'il nous a donné afin de mener ce travail à terme.*

*Nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur **DICHE Arezki**, pour l'appui scientifique et pour sa disponibilité le long de notre travail, nous lui sommes infiniment reconnaissants de la bienveillance dont il a fait preuve à notre égard, de ses encouragements incessants et de la confiance dont il nous a témoigné.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Kaci GHEDAMSI**, professeur à université A. Mira de Bejaïa.*

*Nous remercions vivement les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté, en acceptant de juger notre humble travail, et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Nous remercions également à nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.*

*Enfin, un grand merci à nos familles et tous nos amis, plus particulièrement à nos parents, pour nous avoir soutenus et aidés tout au long de nos études.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de connaissance et de gratitude à :*

*La mémoire de mon père, que dieu le compte parmi ses biens aimés.*

*A ma mère pour ses prières, ses encouragements et soutient tout le long de mes études.*

*A ma grande mère ainsi qu'à toute la famille.*

*A mes tantes et leurs familles.*

*A ma future femme Ryma et a toute sa famille.*

*A ceux que j'ai eu la chance de connaître, dans les meilleurs et pires moments de ma vie, à mes amis les plus fidèles.*

*Amrane*

## Liste des figures

---

<b>Figure I-1:</b> Éléments constituant une machine asynchrone à cage d'écureuil .....	05
<b>Figure I-2 :</b> Champ magnétique résultant dans un MAS triphasé à cage.....	06
<b>Figure I-3 :</b> Proportion des défauts .....	09
<b>Figure I-4 :</b> Répartition des pannes dans les machines de faibles et moyennes puissances .....	10
<b>Figure I-5 :</b> Répartition des pannes dans les machines de fortes puissances.....	10
<b>Figure I-6 :</b> Exentricité statique et dynamique.....	14
<b>Figure I-7 :</b> Défaut d'un rotor à cage d'écureuil, rupture de barres .....	16
<b>Figure I-8 :</b> Schémas de fonctionnement d'un moteur sain et sous défaut .....	17
<b>Figure I-9 :</b> Défaut d'un rotor à cage d'écureuil, rupture d'anneau de court-circuit.....	18
<b>Figure I-10 :</b> Défauts statoriques.....	18
<b>Figure II-1 :</b> Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases .....	33
<b>Figure II-2 :</b> Représentation des enroulements de la MASDE .....	36
<b>Figure II-3 :</b> Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.....	43
<b>Figure III-1 :</b> Courants des phases statoriques de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	48
<b>Figure III-2 :</b> Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge .....	48
<b>Figure III-3 :</b> Courant des phases statoriques de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge .....	48

## Liste des figures

---

<b>Figure III-4</b> : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent en charge .....	<b>49</b>
<b>Figure III-5</b> : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.....	<b>49</b>
<b>Figure III-6</b> : Couple électromagnétique à vide puis en charge .....	<b>49</b>
<b>Figure III-7</b> : Vitesse de rotation à vide puis en charge .....	<b>50</b>
<b>Figure III-8</b> : Courants des phases statoriques de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>52</b>
<b>Figure III-9</b> : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge .....	<b>52</b>
<b>Figure III-10</b> : Courants des phases statoriques de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>52</b>
<b>Figure III-11</b> : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent en charge .....	<b>53</b>
<b>Figure III-12</b> : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.....	<b>53</b>
<b>Figure III-13</b> : Couple électromagnétique à vide puis en charge .....	<b>53</b>
<b>Figure III-14</b> : Vitesse de rotation à vide puis en charge .....	<b>54</b>
<b>Figure III-15</b> : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent en charge .....	<b>54</b>
<b>Figure III-16</b> : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>55</b>
<b>Figure III-17</b> : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge .....	<b>55</b>
<b>Figure III-18</b> : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>56</b>

## Liste des figures

---

<b>Figure III-19</b> : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile, en régime permanent en charge .....	<b>56</b>
<b>Figure III-20</b> : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.....	<b>56</b>
<b>Figure III-21</b> : Couple électromagnétique à vide, puis en charge .....	<b>57</b>
<b>Figure III-22</b> : Vitesse de rotation à vide puis en charge .....	<b>57</b>
<b>Figure III-23</b> : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent en charge .....	<b>57</b>
<b>Figure III-24</b> : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>58</b>
<b>Figure III-25</b> : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge .....	<b>59</b>
<b>Figure III-26</b> : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.....	<b>59</b>
<b>Figure III-27</b> : Couple électromagnétique à vide, puis en charge .....	<b>59</b>
<b>Figure III-28</b> : Vitesse de rotation à vide puis en charge .....	<b>60</b>
<b>Figure III-29</b> : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent en charge .....	<b>60</b>
<b>Figure III-30</b> : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge .....	<b>61</b>
<b>Figure III-31</b> : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge .....	<b>62</b>
<b>Figure III-32</b> : Courants de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge.....	<b>62</b>
<b>Figure III-33</b> : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent en charge .....	<b>62</b>
<b>Figure III-34</b> : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.....	<b>63</b>
<b>Figure III-35</b> : Couple électromagnétique à vide, puis en charge .....	<b>63</b>

## Liste des figures

---

**Figure III-36** : Vitesse de rotation à vide puis en charge ..... **63**

**Figure III-37** : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent en charge ..... **64**

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau I-1</b> : Défauts des machines électriques selon leurs origines .....	11
<b>Tableau I-2</b> : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles .....	25
<b>Tableau II-1</b> : Machines multiphasées de Type 1 .....	31
<b>Tableau II-2</b> : Machines multiphasées de Type 2.....	32

# *Sommaire*

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>.01</b>
<b>CHAPITRE I : État de l'art sur les défauts dans la machine asynchrone</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>.03</b>
I-1 Constitution de la machine asynchrone .....	.03
I-1-1 Le stator .....	03
I-1-2 Le rotor .....	04
I-1-3 Les paliers .....	05
I-2 Principe de fonctionnement .....	06
I-2-1 Le champ tournant .....	07
I-2-2 La vitesse de synchronisme .....	08
I-2-3 Le glissement .....	08
I-3 Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone .....	09
I-4 Défauts internes et externes .....	11
I-4-1 Défaillances d'ordre mécanique .....	12
I-4-1-1 Défaillance des roulements .....	12
I-4-1-2 Défaillance de l'arbre .....	13
I-4-1-3 Excentricité rotorique .....	13
I-4-2 Défaillances d'ordre électrique .....	15
I-4-2-1 Défaillances électriques rotoriques .....	15
I-4-2-1-a Défauts de barres .....	15
I-4-2-1-b Rupture d'anneaux .....	17
I-4-2-2 Défaillances électriques statoriques .....	18
I-4-2-2-a Le court-circuit entre spires .....	19

## Sommaire

---

I-4-2-2-b Le court-circuit entre phases.....	19
I-4-2-2-c Le court-circuit phase bâti .....	19
I-5 Différentes techniques de diagnostic des machines électriques .....	20
I-5-1 Méthodes à base de modèle.....	20
I-5-1-1 La méthode du modèle .....	20
I-5-1-2 La méthode de diagnostic par identification des paramètres .....	20
I-5-1-3 La méthode de diagnostic par estimation du vecteur d'état.....	20
I-5-2 Les méthodes s'appuyant sur une base de connaissance (méthodes externes).....	21
I-5-2-1 Les réseaux de neurones .....	21
I-5-2-2 La reconnaissance de formes .....	21
I-5-2-3 Approche signal .....	22
I-5-2-3-a Diagnostic par l'analyse du courant statorique .....	22
I-5-2-3-b Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park .....	22
I-5-2-3-c Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite .....	23
I-5-2-3-d Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.....	23
I-5-2-3-e Diagnostic par l'analyse vibratoire de la machine .....	24
I-5-2-3-f Diagnostic par l'analyse fréquentielle de puissance instantanée .....	25
I-5-2-3-g Diagnostic par l'analyse de la tension du neutre.....	26
I-6 Techniques de traitement du signal utilisées dans l'approche signal .....	26
I-7 Méthodes de modélisation de la machine asynchrone.....	27
I-7-1 Approche numérique .....	27
I-7-1-1 La méthode des réseaux de perméances .....	27
I-7-1-2 La méthode des éléments finis .....	28

## Sommaire

---

I-7-2 Approche analytique .....	28
<b>Conclusion</b> .....	29
<b>CHAPITRE II : Machines polyphasées et modélisation de la machine asynchrone double étoile</b>	
<b>Introduction</b> .....	30
II.1 caractéristiques des machines multiphasées .....	30
II-1-1 Machines multiphasées de type 1 .....	30
II-1-2 Machines multiphasées de type 2 .....	32
II-2 Applications des machines multiphasées .....	33
II-3 Avantages des machines multiphasées.....	33
II-3-1 Élimination d’harmoniques d’espace.....	33
II-3-2 Segmentation de puissance .....	34
II-3-3 La fiabilité.....	34
II-3-4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques .....	34
II-4 Inconvénients des machines multiphasées .....	35
II-5 Modélisation de la machine asynchrone double étoile.....	35
II-6 Modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC) .....	36
II-7 description de la machine asynchrone double étoile.....	36
II-8 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile.....	37
II-9 Modèle de la machine asynchrone double étoile à cage d’écureuil .....	38
II-10 Équations du système .....	38
II-10-1 Équations des tensions statoriques.....	39
II-10-2 Équations des flux statoriques .....	39

## Sommaire

---

II-10-3 Équations des tensions rotoriques .....	43
II-10-4 Équation du flux .....	44
II-10-5 Équations mécaniques .....	45
<b>Conclusion</b> .....	46
 <b>CHAPITRE III : Simulation des modèles sains et défailants de la machine asynchrone double étoile</b>	
<b>Introduction</b> .....	47
III-1 Régime sain.....	47
III-1-1 Interprétation des résultats .....	50
III-2 Régime dégradé .....	51
III-2-1 Perte d'une phase dans une étoile .....	51
III-2-1-1 Interprétation des résultats .....	54
III-2-2 Perte de deux phases dans une étoile .....	55
III-2-2-1 interprétation des résultats .....	57
III-2-3 perte d'une étoile .....	58
III-2-3-1 interprétation des résultats .....	60
III-2-4 Perte de deux phases dans deux étoiles différentes .....	61
III-2-4-1 Interprétation des résultats .....	64
<b>Conclusion</b> .....	65
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	66
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	
<b>ANNEXE</b>	

# *Introduction générale*

### Introduction générale

En 1888 Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a eu un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique. La première machine asynchrone triphasée fut réalisée par l'Allemand Michael Dolivo-Dobrowolski en 1889. Cette dernière domine assez largement le domaine des machines électriques, grâce à plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types. Elle est la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, la moins exigeante en termes d'entretien, présente un taux de défaillance très peu élevé, fabriquée en grande quantité et dans une très large gamme de puissance. Elle conserve presque sans modification ses parties constitutives essentielles et elle a aussi l'avantage d'être standardisée etc [1].

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines multiphasées ont par la suite fait un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. En effet, les variateurs multiphasés présentent plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées, telles que la segmentation de puissance, la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, la grande fiabilité et les fortes puissances etc [2], [3], [7]. La constitution des machines multiphasées ne diffère par rapport à celle des machines triphasées qu'au niveau statorique, la structure du rotor reste identique bobiné ou à cage d'écureuil.

Les machines multiphasées peuvent être siège de défauts. Comme tout système électrique, la machine asynchrone n'est pas infaillible, elle n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement ou d'une panne intempestive. Elle peut subir diverses contraintes internes ou externes d'origine mécanique, électrique et/ou magnétique (surcharge, défauts d'alimentation, excentricité du rotor, usure des roulements à billes...) altérant la machine, et pouvant causer des détériorations, des chutes de performances, affectant sa durée de vie [7].

Dans le souci d'assurer la sécurité du personnel et des installations associées à la machine asynchrone, mais aussi pour optimiser les performances et réduire le coût de réparation, les systèmes de surveillance et de diagnostic sont devenus un objectif et une nécessité pour les industriels. Ces systèmes ont pour premier objectif de prévenir l'utilisateur d'un possible risque de problème pouvant apparaître en un point particulier du dispositif, en d'autres termes la

détection et la localisation des défauts [2]. La détection des défauts dans les machines électriques nécessite une parfaite connaissance de leurs comportements.

L'objectif de notre travail est l'élaboration de modèle réel par l'approche des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC) de la machine asynchrone double étoile à rotor à cage d'écureuil dans le cas sain et défaillant. Les différents modèles sont programmés et simulés sous Matlab. Nous nous sommes intéressés aux défauts statoriques, perte d'une ou plusieurs phases.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera une entrée en la matière du diagnostic, commençant par un bref rappel sur la constitution technologique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, puis une exposition de classification des différents défauts pouvant affecter chaque élément de cette machine (causes, effets, études statistiques). Une synthèse des méthodes et techniques utilisées pour la détection des défauts.

Dans le second chapitre nous décrivons la machine polyphasée, domaines d'application, ses avantages et ses inconvénients. Après on va passer à la modélisation de la machine asynchrone double étoile à rotor à cage par la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC). La mise en équation des différents calculs nous permet de trouver l'ensemble des équations différentielles définissant le modèle de la machine, dans le but d'effectuer une simulation numérique sous Matlab.

Le troisième chapitre sera réservé à la simulation du modèle présenté. Les résultats obtenus seront étalés et interprétés, nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives.

# *Chapitre I*

*État de l'art sur les  
défauts dans la  
machine asynchrone*

## Introduction

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesse variable ont vu le jour dans divers domaines.

Malgré ses qualités, les machines asynchrones peuvent présenter une multitude de défauts électriques, mécaniques, environnementaux, ou magnétiques qui sont prévisibles ou inopportuns. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous présentons dans ce chapitre les divers défauts, leurs causes ainsi que leurs éventuels effets et les solutions possibles pour leurs détections. Puis nous énumérons les méthodes qui sont employées pour le diagnostic des machines.

### I-1- Constitution de la machine asynchrone

On se propose dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments constituant la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. La machine asynchrone triphasée peut se décomposer du point de vue mécanique en trois parties distinctes [6] :

- Le stator : partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- Le rotor : partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- Les paliers : parties mécaniques qui permettent la mise en rotation de l'arbre moteur.

#### I-1-1- Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans les quelles sont placés les bobinages statoriques, ces tôles sont pour les petites machines découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissances plus élevées découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault [11]. Au final elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide des boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manières imbriquées, ondulées ou concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé

lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. La (figure I-1) représente les différentes parties qui constituent le stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation qui assurent le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge [11].

### I-1-2- Le rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types, bobinés ou à cage d'écureuil. Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine. En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dits "de court-circuit" eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépendent principalement de la taille du moteur et de son application.

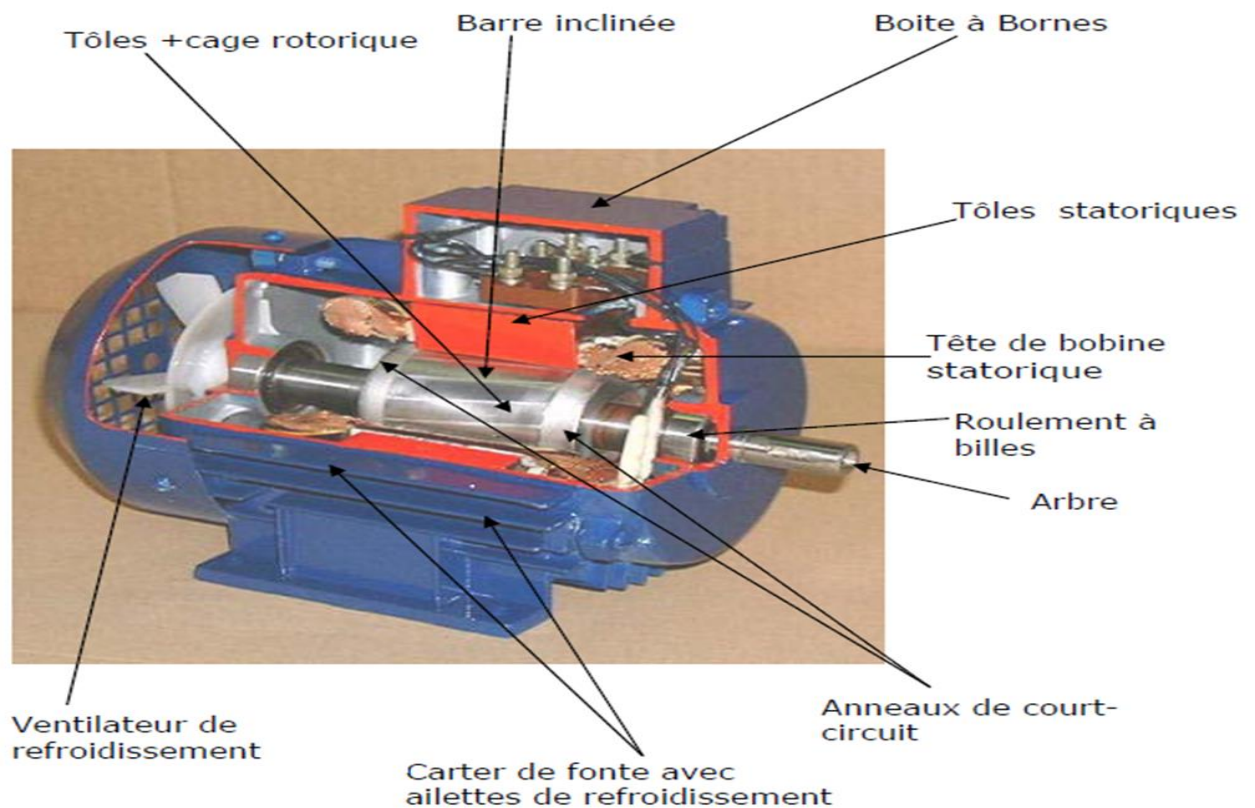
Nous donnons à la (figure I-1) ci-dessus les différents éléments de constitution d'un rotor à cage d'écureuil. Nous pouvons visualiser l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Très souvent ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de

barre. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la (figure I-1) [5].

### I-1-3- Les 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 comme nous pouvons le voir sur la (figure I-1). L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil [5].

Effet de peau : L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait varier la quantité de matière nécessaire à la circulation des courants. En effet, lorsque la fréquence est élevée le courant circule en surface des conducteurs. Lorsque la fréquence du courant qui circule dans le conducteur se rapproche de la fréquence du courant d'induction le courant induit circule sur un maximum de matière du conducteur ce qui a également pour effet d'augmenter sa résistivité.



**Figure I-1** : Éléments constituant une machine asynchrone à cage d'écureuil.

## I-2- Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage est basé sur 3 principes de l'électrotechnique :

- Principe I : création d'un champ magnétique par un courant et qui est défini par la loi d'Ampère.
- Principe II : force exercée sur un conducteur placé dans un champ magnétique et qui est défini par la loi de Laplace.
- Principe III : déplacement d'un conducteur dans un champ magnétique, induction d'une tension et qui est défini par la loi de l'induction électromagnétique de Faraday.

Le principe des moteurs à courant alternatifs réside dans l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des tensions alternatives. La circulation d'un courant dans une bobine crée un champ magnétique. Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont en fonction du courant  $I$ .

Dans le cas du moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à  $120^\circ$  électrique les unes des autres, trois champs magnétiques sont aussi créés. Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés. Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant [20].

La figure ci-dessous montre le champ résultant :

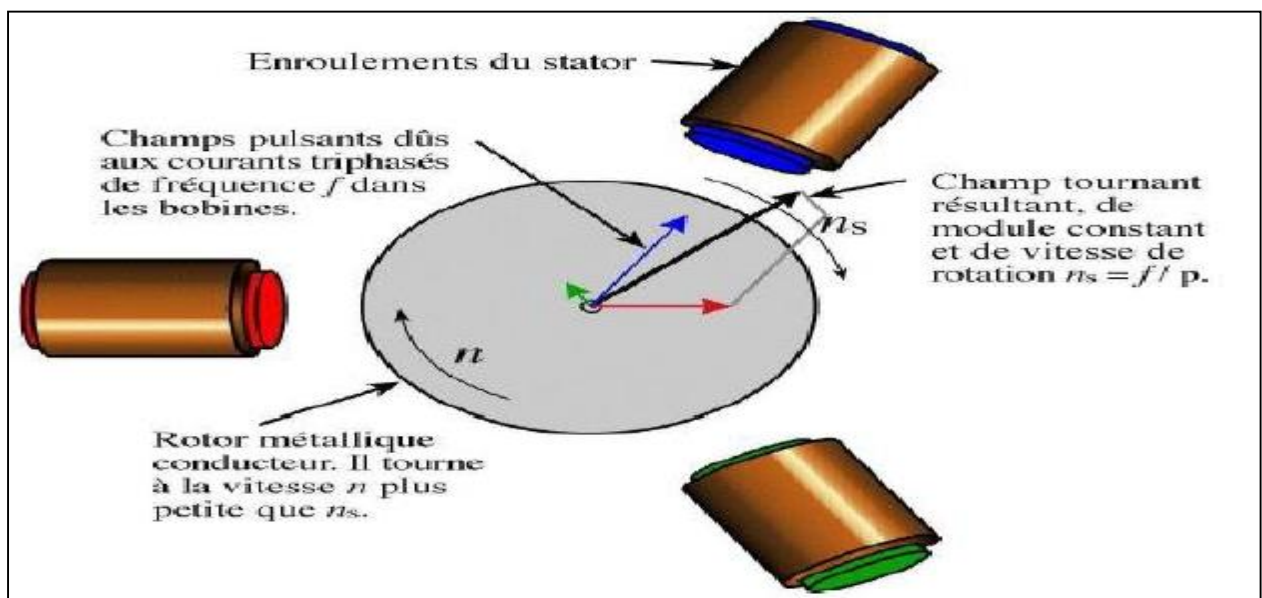


Figure I-2 : Champ magnétique résultant dans un MAS triphasé à cage.

Les trois enroulements statorique créent donc un champ magnétique tournant, sa fréquence de rotation est nommée fréquence de synchronisme. Si on place une boussole au centre, son aiguille va tourner à cette vitesse de synchronisme  $N_s$  [tr/min].

$$N_s = \frac{60f}{p}$$

Avec:

$N_s$  : La vitesse de synchronisme [tr/min].

$f$  : La fréquence des courants statoriques.

$p$  : Nombre de paires de pôles.

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants induits. Des courants circulent alors dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor.

D'après la loi de Lorenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier. Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, si non la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone [20].

### I-2-1- Le champ tournant

C'est la variation du flux magnétique créée par les courants statoriques, sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence des courants du stator. C'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique.

La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme  $\Omega_s$  [rad/s] [20].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

Ou :

$$\Omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$$

Avec :

$\Omega_s$  : La vitesse angulaire de synchronisme [rad/s].

$\omega_s$  : Pulsation électrique synchrone du champ tournant [rad/s].

$N_s$  : Vitesse de synchronisme en [tr/min].

$p$  : Nombre de paires de pôles.

### I-2-2- La vitesse de synchronisme

Pour les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles  $p$  constituant le stator [20] :

$$\Omega_s = \frac{60f}{p}$$

Avec :

$\Omega_s$ : Vitesse de synchronisme [rad/s].

$f$ : Fréquence [Hz].

$p$  : Nombre de paires de pôles.

### I-2-3- Le glissement

Il existe une différence de vitesse de rotation entre le champ tournant statorique et la vitesse mécanique du rotor. Cette différence s'appelle le glissement.

C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé « moteur asynchrone ». La différence entre la vitesse de synchronisme et celle du rotor est appelée "glissement" et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme [3].

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} * 100$$

Avec :

$g$  : glissement

$\Omega_s$  : La vitesse angulaire de synchronisme [rad/s]

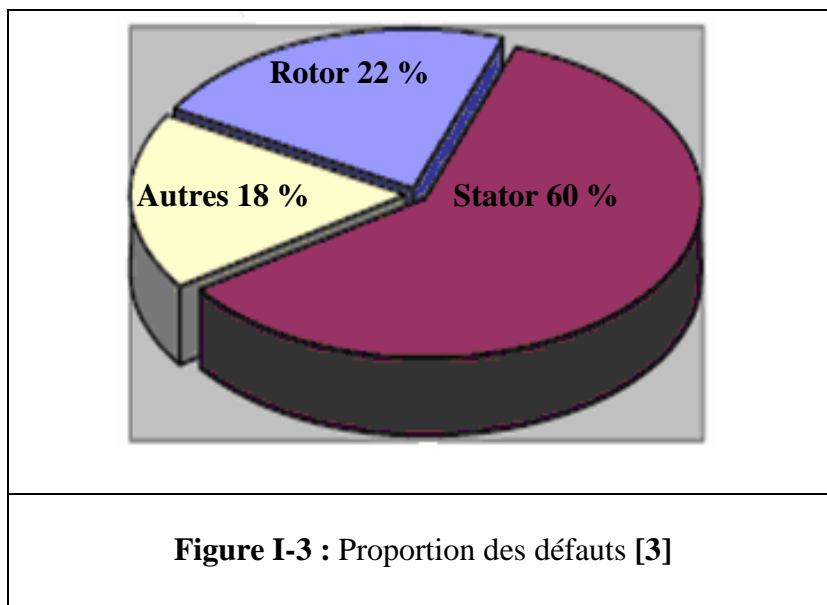
$\Omega$  : La vitesse angulaire de la rotation du rotor [rad/s]

### I-3- Étude statistique des défaillances de la machine asynchrone

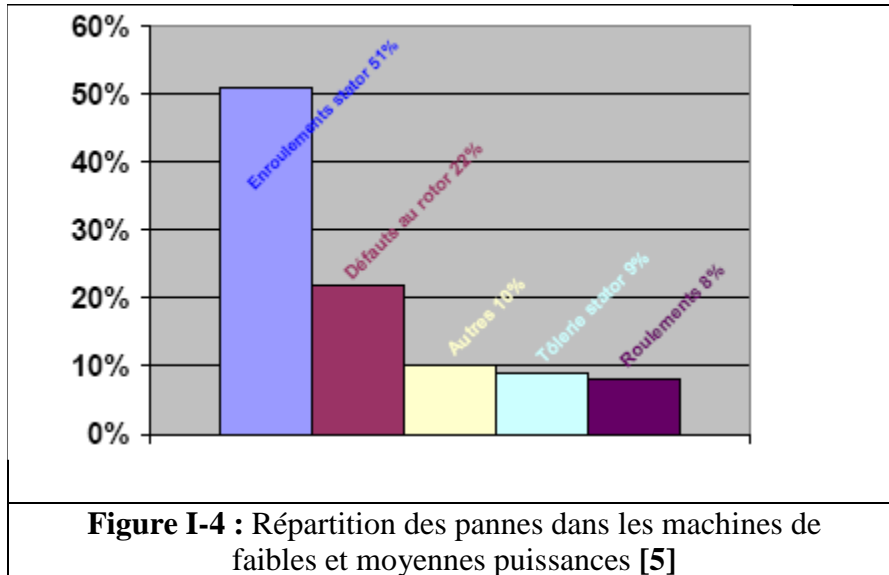
Les défaillances peuvent être d'origines diverses électriques, mécaniques, thermiques ou bien magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en 3 groupes [7] :

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

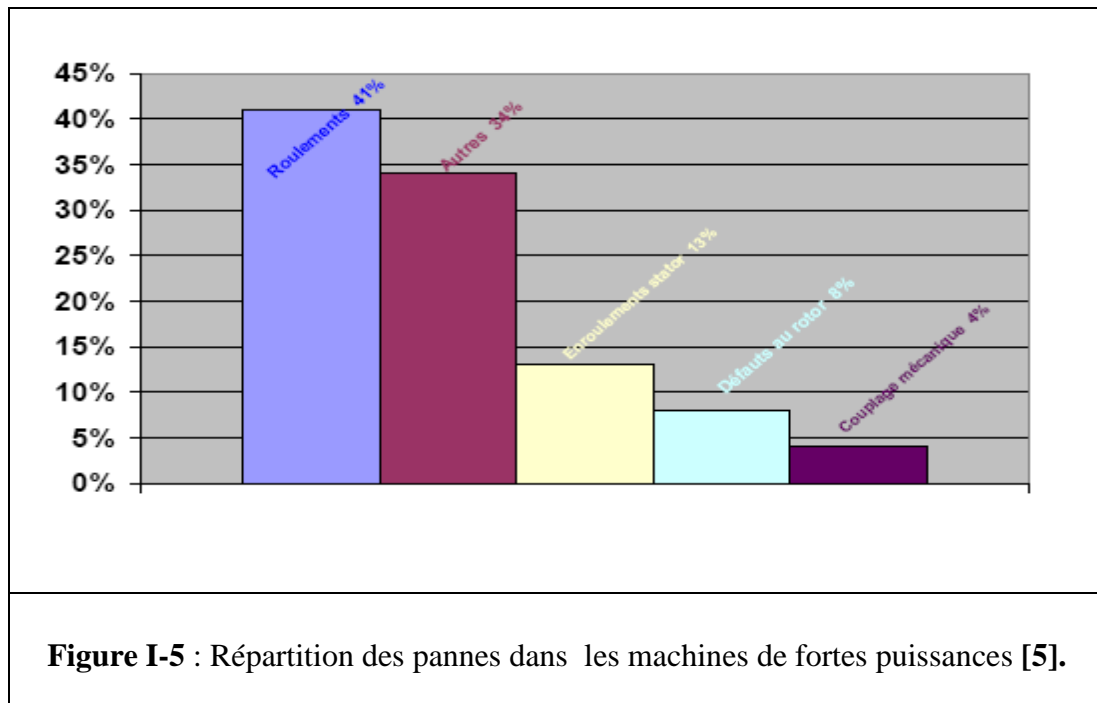
Une étude statistique effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 Kw à 200Kw a donné les résultats suivants (Figure I-3) [5], [13] :



La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est présentée sur la (figure I-4)



Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance de 100 [KW] à 1 [MW] donne des résultats qui sont présentés sur la (figure I-5) [5].



Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines, ceci explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ce qui exige une maintenance mécanique accrue.

#### I-4- Les défauts internes et externes

Il existe 2 types de défauts principaux internes et externes, les causes de ces défauts sont brièvement et respectivement décrites dans le tableau [19]. Nous pouvons ainsi remarquer que les défauts internes de la machine sont causés par les constituants de la machine (circuits magnétiques rotorique et statorique, bobinages statoriques, entrefer mécanique, cage rotorique..etc). Tandis que les défauts externes sont provoqués, soit par les tensions d'alimentation et la charge mécanique soit par l'environnement de l'utilisation de la machine.

**Tableau I-1** : Défauts des machines électriques selon leurs origines

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Déplacement des conducteurs	
		Électrique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Rupture de barre
	Défaillance au niveau de l'isolation (stator)		
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Propreté
			Température
		Électrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
Réseau bruité			

### I-4-1- Les défaillances d'ordre mécanique

Ces défaillances peuvent se produire au niveau des roulements à billes, des flasques ou de l'arbre moteur. Elles sont en général les plus rencontrées parmi l'ensemble des défauts que compte la machine [17].

#### I-4-1-1 Défaillance des roulements

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

Statistiquement c'est le défaut le plus répandu dans les moteurs asynchrone, Surtout pour les machines de grande puissance car les contraintes mécaniques sont plus importantes, celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication et aussi à un mauvais graissage ne permettant pas une bonne lubrification et la bonne rotation des roulements qui deviennent rigides, donc cause une résistance à la rotation et par la suite ils s'abîment (se fissurent, s'écaillent).

Classiquement il est diagnostiqué à partir du spectre d'une mesure acoustique vibratoire. La relation entre les vibrations des roulements à billes et le spectre des courants statorique est telle que toutes les excentricités résultantes interfèrent sur le champ d'entrefer de la machine asynchrone [12].

Puisque les éléments roulants du roulement supportent le rotor, quelque soient les défauts dans les roulements, ils vont produire des mouvements radiales entre le rotor et le stator dans la machine. Par conséquent des variations d'entrefer génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquence [12].

$$f_{\text{exc(enroulement)}} = | \mathbf{f} \pm \mathbf{k}f_v | \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$f_v$ : C'est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations mécaniques.

Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres physiques du roulement.

Les fréquences de vibration qui caractérisent les défauts des roulements à bille Sont [8] :

Défaut au niveau d'une bille :  $f_b = \frac{D_c}{D_b} f_r [1 - (\frac{D_b}{D_c} \cos B)^2]$

Défaut sur la bague intérieure :  $f_{bint} = \frac{n_{bi}}{2} f_r [1 + \frac{D_b}{D_c} \cos B]$

Défaut sur la bague extérieure :  $f_{bext} = \frac{n_{bi}}{2} f_r [1 - \frac{D_b}{D_c} \cos B]$

Avec :

$n_{bi}$ : Le nombre de billes ou d'éléments roulants.

$D_b$ : Le diamètre des billes.

$D_c$ : La distance entre les centres des billes diamétralement opposées.

$B$  : L'angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

$f_r$ : La fréquence de rotation mécanique (du rotor).

#### I-4-1-2- Défaillance de l'arbre

L'emploi d'un mauvais matériau pour la construction de la machine peut engendrer des fissures sur l'arbre et à court ou à long terme une fissure devient une cassure qui provoque l'arrêt de la machine. Les milieux dans lesquels sont utilisées les machines exercent une influence sur l'état des éléments constitutifs tel que la corrosion qui affaiblit la robustesse de l'arbre et l'humidité qui cause des microfissures pouvant détruire complètement la machine. On peut détecter ce type de défaillances par analyse vibratoire ou par analyse fréquentielle des courants absorbés.

#### I-4-1-3- Excentricité rotorique

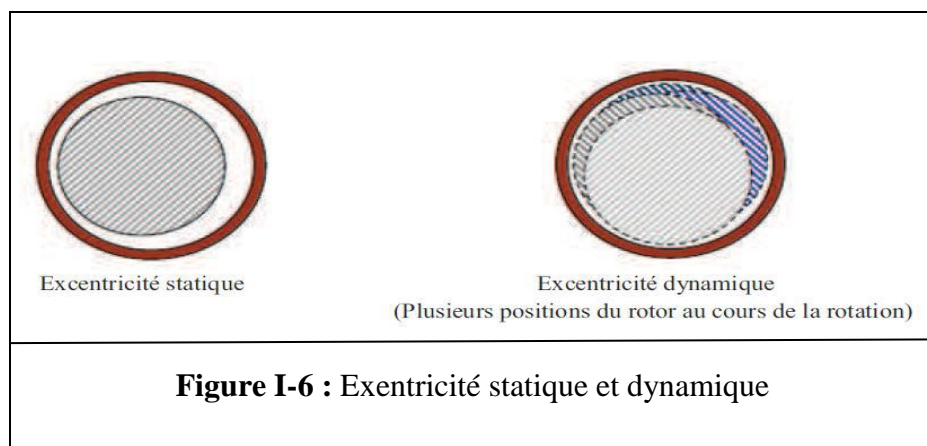
L'excentricité est un phénomène qui fait l'objet de nombreuses publications car elle est responsable de multiples dommages sur les machines électriques surtout lorsqu'il s'agit de la machine asynchrone où l'entrefer est volontairement d'épaisseur très faible.

L'excentricité est le résultat de la non uniformité de ce dernier, ce qui signifie l'existence de longueurs radiales différentes entre le stator et le rotor, donc une asymétrie d'entrefer. Cette asymétrie précédemment citée va décaler les axes des deux armatures l'un par rapport à l'autre d'une épaisseur qui dépend du degré d'excentricité et de la longueur moyenne de l'entrefer.

Les causes d'une excentricité sont multiples, elles peuvent être dues à la flexion de l'arbre à un phénomène d'usure ou au désalignement des roulements, à un positionnement incorrect du rotor ou du stator au moment de l'assemblage ou à un fonctionnement du moteur au-delà d'une vitesse limite qui provoque des résonances. Dans la référence [16], les auteurs utilisent des méthodes d'intelligence artificielle pour le diagnostic du défaut, mais le plus important est l'identification du type d'excentricité qui est possible par la visualisation dans le spectre des courants de phase.

Trois cas d'excentricité sont généralement, distingués [14] :

- **Excentricité statique** : le rotor tourne au tour de son centre géométrique et la longueur de l'entrefer reste constante dans le temps pour chaque position angulaire
- **Excentricité dynamique** : Dans laquelle l'axe du rotor tourne au tour de l'axe du stator.
- **Excentricité mixte** : Elle caractérise les 2 cas, précédemment cités.



La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences ( $f_d$ ) données par l'expression ci-dessous :

$$f_d = f \left[ \frac{(kn_b \pm n_d)}{p} (1-g) \pm v \right]$$

$n_b$  : C'est le nombre de barres rotoriques.

$n_d$  : Le nombre d'ordre d'excentricité,  $n_d=0$  pour l'excentricité statique et  $n_d = 1,2,3 \dots$  pour l'excentricité dynamique.

$v$ : l'ordre des harmoniques de temps de la FMM ( $v = \pm 1, v = \pm 3, v \pm = 5, v = \pm 7 \dots$ )

La présence de l'excentricité mixte crée des harmoniques de basses fréquences données par la relation :

$$f_m = f \pm k f_r$$

$$f_r = f(1-g)/p$$

$f_m$  : La fréquence caractéristique du défaut d'excentricité mixte.

$f_r$  : La fréquence rotorique et  $k = 1, 2, 3, \dots$

Les excentricités d'entrefer peuvent être aussi détectées, en surveillant les raies latérales fondamentales de la fréquence d'alimentation [09], [13] :

$$f_{exc} = f \left[ 1 \pm k \frac{(1-g)}{p} \right] \quad k=1, 2, 3, \dots$$

Ce défaut d'excentricité modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant [13]. Ceci engendre une dégradation de son isolation.

D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibrations considérables dans les enroulements [4].

#### I-4-2- Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'ordre électrique se répartissent en deux catégories : celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques, et celles qui apparaissent au sein des circuits électriques statoriques. Au même titre que les défauts mécaniques, elles peuvent causer un arrêt irrémédiable de la machine.

##### I-4-2-1- Défaillances électriques rotoriques

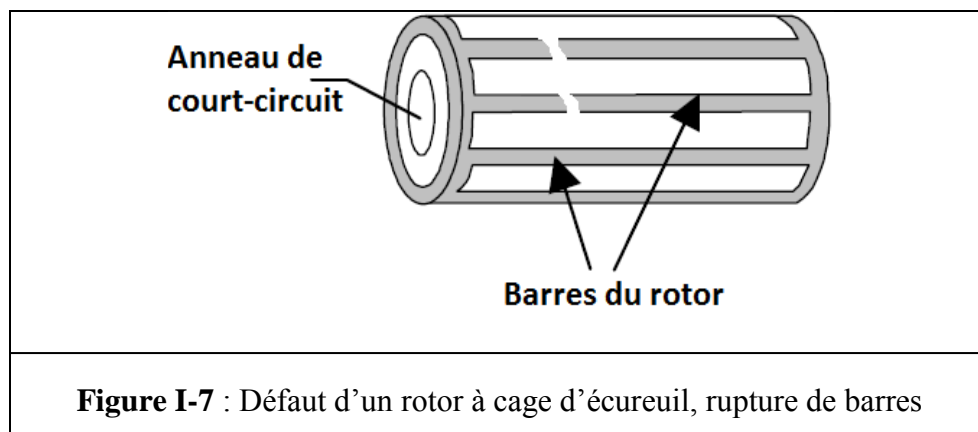
Pour les moteurs asynchrones à cage la rupture partielle ou totale d'une barre rotorique ainsi que la rupture d'une portion d'anneau représente la panne la plus probable et la plus répondu au niveau du rotor.

##### I-4-2-1-a- Défauts de barres

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique.

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique par l'augmentation de l'amplitude des oscillations [2], qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ceci engendre des vibrations mécaniques et donc un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine.

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



Le rotor avec ce défaut crée en plus du champ rotorique direct qui tourne à la vitesse  $g \cdot \omega_s$  par rapport au rotor ( $g$  le glissement de la machine) un champ inverse qui lui tourne à une vitesse  $-g \cdot \omega_s$ . L'interaction de ces champs avec celui issu du bobinage statorique donne naissance à des composantes de fréquence  $2g \cdot \omega_s$  dans le couple électromagnétique. Ces composantes seront la cause d'oscillations de la vitesse. Cette dernière donne naissance à des f.e.m aux pulsations  $\omega_s$ ,  $(1-2g) \omega_s$ ,  $(1+2g) \omega_s$  et  $(1-4g) \omega_s$ , qui créent à leur tour des courants aux mêmes pulsations [10]. Les champs créés 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 [15], [8].

$$f_b = (1 \pm kg) f$$

$K$  : C'est un entier.

$g$  : C'est le glissement.

$f$ : Fréquence d'alimentation.

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

$\omega_s$ : Représente la vitesse de synchronisme,  $p$  est le nombre de paires de pôles de la machine.

$w_r = (1-g) w_s$  : La vitesse de rotation.

$w = w_s - w_r$  : La vitesse du glissement.

$g = \frac{w_s - w_r}{w_s}$  : C'est le glissement.

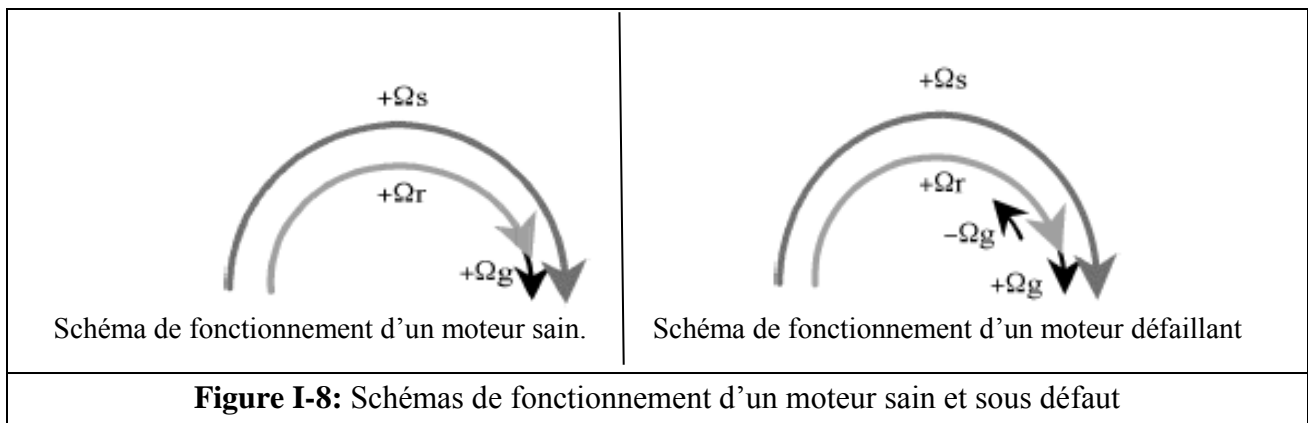
Alors :

$$w_{\text{defaut}} = w_r - gw_s = (1-g)w_s - gw_s$$

$$w_{\text{defaut}} = (1 - 2g)w_s$$

D'où la fréquence du défaut :

$$f_b = (1-g)f - gf = (1-2g)f$$

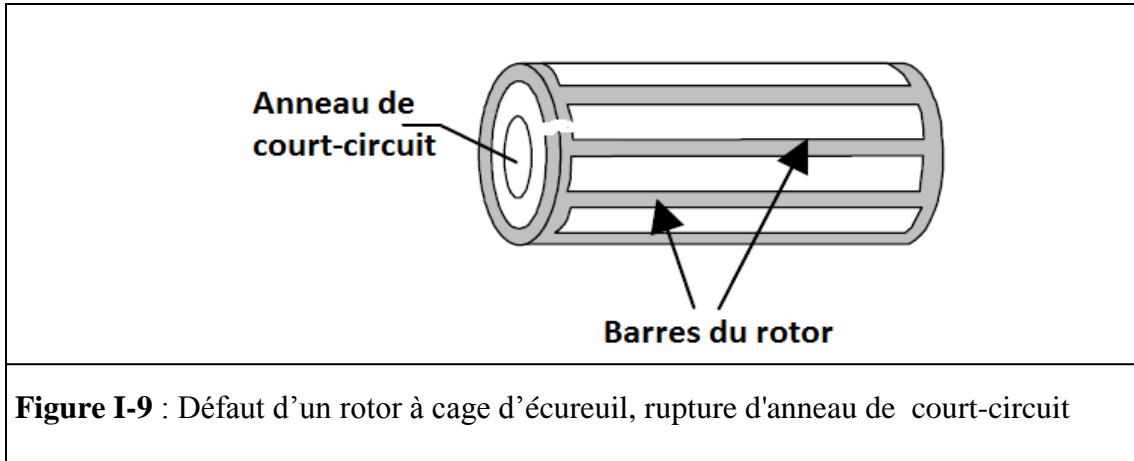


L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [13],[10]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leurs rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine.

#### I-4-2-1-b- Rupture d'anneaux

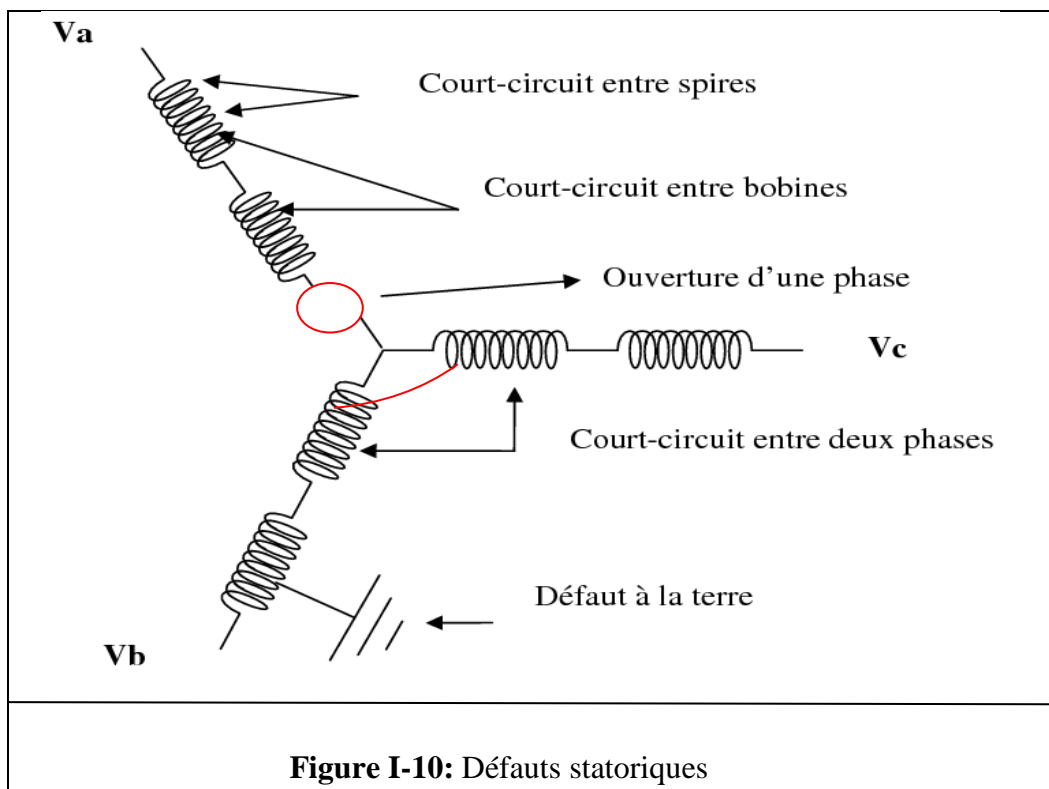
La rupture d'une portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [7]. Comme il est difficile de le détecter ce défaut est généralement groupé voir confondu avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait un mauvais dimensionnement des anneaux ou une surcharge du couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure [11].

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



**I-4-2-2- Défaillances électriques statoriques**

La majeure partie de défauts statoriques est attribuée à la dégradation d'isolants qui se manifestent sous la forme d'un court-circuit entre spires, d'un court-circuit entre deux phases ou d'un court-circuit entre une phase et la carcasse.



**I-4-2-2-a- Le court-circuit entre spires**

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique [8], [20], [12]. La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires.

**I-4-2-2-b- Le court-circuit entre phases**

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage [6], [1] mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient. L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation entre phases, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un faible risque de fusion des conducteurs.

L'apparition de ce type de défaut dans le cas des machines asynchrones provoque une augmentation des courants dans les barres ainsi que dans les anneaux du rotor à cage [2].

**I-4-2-2-c- Le Court-circuit phase/bâti**

Le bâti est souvent relié à la masse. Lorsqu'un court-circuit se produit entre l'enroulement et le bâti, ce dernier prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. La tension de la phase concernée ne change pas, cependant le courant qui circule dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. Ce type de défaut n'a pas d'importance du point de vue matériel mais il peut être très dangereux sur le personnel, d'où la nécessité de mettre en place des dispositifs de protection sûrs (disjoncteurs différentiels) [9].

## **I-5- Différentes techniques de diagnostic des machines électriques**

Dans l'objectif d'établir un dispositif de sûreté de fonctionnement il est important de bien connaître les signatures des défauts à surveiller. Il est évident dans les différents travaux publiés que les indices de défaut se diffèrent selon la technique appliquée parmi ces techniques on distingue :

- Les méthodes à base de modèle (les méthodes internes).
- Les méthodes s'appuyant sur une base de connaissance (Les méthodes externes).

### **I-5-1- Méthodes à base de modèle**

Les méthodes à base de modèle sont issues principalement de l'automatique et supposent une connaissance a priori du système, elles prennent en compte les équations régissant les phénomènes internes du système et qui expriment les connaissances profondes sous la forme d'un modèle mathématique, les méthodes proposées dans ce contexte peuvent être regroupées en 3 catégories.

#### **I-5-1-1- La méthode du modèle**

La méthode de diagnostic de défaillance par la méthode du modèle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement des différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel [9].

#### **I-5-1-2- La méthode de diagnostic par identification des paramètres**

Cette méthode s'applique au cas très particulier où l'on souhaite suivre l'évolution de certains paramètres physiques critiques pour le fonctionnement d'un processus et qui ne sont pas mesurables directement [11].

#### **I-5-1-3- La méthode de diagnostic par estimation du vecteur d'état**

La généralisation du principe de diagnostic de défaillance par la méthode de l'identification des paramètres a été rendue possible en considérant les modèles physiques d'un processus sous la forme d'équation d'état.

Bien que ces approches soient différentes, leur but est le même; il consiste à générer un vecteur caractéristique: le résidu (Signal conçu comme indicateur d'anomalies). L'objectif du résidu est d'être sensible aux défauts, en l'absence de défaut, le résidu doit avoir une valeur

nulle, en présence d'un défaut, le résidu aura une valeur non nulle. De ce fait, le problème de diagnostic des défauts par ces méthodes peut se reformuler sous la forme d'un problème de génération de résidus [10].

### **I-5-2- Les méthodes s'appuyant sur une base de connaissance (Les méthodes externes)**

Ces méthodes ont la particularité de ne pas nécessiter la connaissance d'un modèle mathématique ou structurel du procédé contrairement aux méthodes à base de modèle.

Seulement la disponibilité de grande quantité de données historiques du processus (signatures déjà observées) est nécessaire. Il y a diverse façon de traiter ces données et de les présenter en tant que connaissance a priori pour le diagnostic.

Les signatures de défauts obtenues par modélisation ou par mesure sur maquette sont généralement classées dans une base de données. On peut citer [6]:

- Les réseaux de neurones.
- La reconnaissance de formes.
- Approche signal.

#### **I-5-2-1- Les réseaux de neurones**

Basés sur des mécanismes d'apprentissage et de reconnaissance sont très performants mais nécessitent un nombre important d'exemples de fonctionnement du système pour constituer la base d'apprentissage, cela peut être coûteux [5] [9] [13] utilisent un (RN) pour le diagnostic en temps réel des défauts de la machine à induction à partir de l'analyse spectrale des vibrations ou des bruits.

#### **I-5-2-2- La reconnaissance de formes**

Classifie et discrimine les états d'un système en constituant des classes, chaque classe étant représentative d'un mode de fonctionnement du système.

Il existe deux types de reconnaissance des formes [14] :

Le premier appelé reconnaissance des formes structurelle utilise la grammaire. Les formes sont essentiellement caractérisées par des propriétés grammaticales.

Le second type de reconnaissance des formes couramment qualifié de reconnaissance des formes statistique se base sur des propriétés numériques des formes étudiées.

### I-5-2-3- Approche signal

Les caractéristiques des signaux fournis par des capteurs sont des données disponibles contenant des informations essentielles pour le diagnostic. Dans les caractéristiques d'un signal relatif à un défaut, généralement, on extrait l'amplitude ou les densités d'amplitude. Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'un défaut. Il faut également citer les méthodes temps-fréquence qui peuvent être, dans certain configuration, plus riches que l'analyse spectrale, citons comme exemple les ondelettes [14], [19]. Cette approche consiste à effectuer une simple transformée de Fourier

#### I-5-2-3-a- Diagnostic par l'analyse du courant statorique

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 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.

C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique [1], [8]. 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'encochage rotorique comme dans le cas d'un moteur à cage.

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  $(1+2g)f$  [7],[16],[21].

#### I-5-2-3-b- Diagnostic par l'analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir:

La première utilise les grandeurs biphasées  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous :

$i_q = f(i_d)$ . Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut.

La deuxième est appelée vecteur de Park étendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park.

### I-5-2-3-c- 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 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 telles 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 (Fem) induite qui est liée aux flux de fuites axiaux.

La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial et pour cela on peut utiliser cette méthode comme une technique de diagnostic dans la machine asynchrone.

### I-5-2-3-d- Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Certains défauts mécaniques peuvent être détectés par la recherche d'harmonique dans le spectre du couple électromagnétique mesuré résultant d'une interaction entre le flux et le courant [11]. Ce couple peut être reconstruit soit à partir de deux ou de trois courants statoriques.

L'utilisation de ce signal peut s'avérer un bon choix pour la détection des défauts de charge. En effet, les variations du couple de charge vont induire des variations du flux et du courant dans la machine. De même la torsion de l'arbre entraîne l'apparition d'harmoniques dans le spectre du couple. Dans un repère  $d_q$  lié au stator le couple électromagnétique a pour expression :

$$C_{em} = p (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd})$$

Si on considère les courants et les flux dans un repère triphasé :

$$C_{em} = \Phi_{s2} I_{s1} - I_{s1} \Phi_{s1} + \Phi_{s3} I_{s2} + \Phi_{s1} I_{s3} + \Phi_{s2} I_{s3}$$

$\Phi_{s1}, \Phi_{s2}$  et  $\Phi_{s3}$  : Sont les flux embrassés sous les pôles pour les phases 1, 2 et 3 respectivement.

$I_{s1}, I_{s2}$  et  $I_{s3}$  : Sont les courants de phase statorique.

Avec une alimentation triphasée sans neutre on a :

$$I_{s1} = -I_{s2} - I_{s3} \text{ Et par conséquent : } \Phi_{s1} = -\Phi_{s2} - \Phi_{s3}$$

$$\text{Ceci permet d'obtenir : } C_{em} = p\sqrt{3}(\Phi_{s3}I_{s2} - \Phi_{s2}I_{s3})$$

La dissymétrie électrique du rotor fait apparaître des harmoniques de dentures rotoriques, ce qui modifie le champ d'entrefer. Le problème peut alors être détecté en analysant les fréquences d'encoches présentes dans le spectre du couple estimé

$$f_{sb} = f \left[ \frac{N_r(1-g)}{p} \pm 2g \right]$$

Avec :

$f_{sb}$  : Fréquence d'encoche au rotor.

$f$  : Fréquence d'alimentation (fréquence des courant statorique)

$N_r$  : Nombre d'encoche au rotor.

### I-5-2-3-e- Diagnostic par l'analyse vibratoire de la machine

L'analyse spectrale des vibrations a été utilisée dans les machines tournantes pour le diagnostic pendant des décennies. Il est affirmé que la surveillance des vibrations est la méthode la plus fiable pour évaluer la nature globale d'un système. Cette analyse peut être réalisée à partir de capteurs, généralement des accéléromètres placés sur des paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.

Les vibrations de la machines fournissent des informations sur pratiquement tous les défauts mécaniques fréquemment rencontrés, le tableau suivant résume les caractéristiques de l'analyse vibratoire de ces défauts [4], [12], [18].

Tableau I-2 : Analyses vibratoires, signatures fréquentielles [17]

Type de défaut	Analyse vibratoire	Observations
Rupture de barres Rupture de portions d'anneaux	$f_r \pm 2gf_s$	Les vibrations augmentent dans l'axe du rotor
Excentricité Statique  Excentricité Dynamique	Exc. Statique : $2f_s$ ou des composantes à $kf_r \pm f_s$  Exc. Dynamique : $f_r \pm 2gf_s$ ou $f_r$	L'excentricité dynamique est fonction du temps et de l'espace L'excentricité statique est fonction de l'espace seulement
Désalignement	$f_r$ et $2f_r$  Principalement	On parle de désalignement : Parallèle et/ou angulaire Des paliers De l'arbre (torsion)
Déséquilibre mécanique	$f_r$	Au niveau de la charge notamment Vibrations plus importantes dans la direction radiale
Défaillance des paliers	$n f_e$  $f_i \pm k f_r$	Bagues externes Bagues internes Ces composantes fréquentielles sont modulées par la vitesse

#### I-5-2-3-f- Diagnostic par l'analyse fréquentielle de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones a fait l'objet de nombreux travaux [2], [15]. La puissance instantanée est le produit de la tension d'alimentation et le courant absorbé par le moteur. Donc la quantité d'informations apportée par cette grandeur, est plus grande que celle apportée par le courant. Le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de défauts comme le montre la relation suivante [15].

### I-5-2-3-g- Diagnostic par l'analyse de la tension du neutre

Comme pour le courant statorique, la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone a condition que la machine soit couplée en étoile sur l'alimentation Peut être utilisée pour la détection des défauts de la machine [2]. Cette technique a tout d'abord été appliquée dans le diagnostic des défauts d'enroulements statoriques, l'auteur a additionné les trois tensions présentes aux bornes de la machine asynchrone pour obtenir une tension résiduelle et il a basé son diagnostic de défauts de courts circuits entre spires sur la valeur efficace de celle-ci [3].

Les auteurs qui ont utilisé cette méthode pour la détection des défauts de barres montrent que l'information la plus significative pour permettre un diagnostic fiable de la cage rotorique se situe au niveau des composantes harmoniques de fréquence

$$f_b = [3(1 - g) \pm g] f_s [3].$$

Le même résultat a été trouvé par un auteur [12] qui a proposé une comparaison entre l'analyse des signatures des courants statoriques et celles de la tension du neutre. Les résultats présentés dans son article montrent que l'analyse de la tension du neutre donne des résultats plus pertinents que ceux obtenus avec l'analyse habituelle du courant absorbé.

### I-6- Techniques de traitement du signal utilisé dans l'approche signal

Puisque les signatures ont une amplitude faible par rapport à l'harmonique fondamental d'alimentation, les allures temporelles ne permettent pas de détecter la présence d'un défaut, on est obligé d'aller vers les techniques de traitement de signal. Plusieurs techniques ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux que nous avons suscité, parmi les méthodes de traitements de signal on cite :

- Transformée de Fourier rapide (FFT).
- Transformée de Hilbert (TH).
- Transformée de Fourier à fenêtre glissante(TFFG).
- Transformée en ondelettes (TO).

## I-7- Méthodes de modélisation de la machine asynchrone

À ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la MAS à cage d'écuréuil jouent un rôle primordial en matière du diagnostic. Ils permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, ils apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est nécessaire donc de créer un modèle adapté au problème à traiter, offrant une image claire sur les phénomènes qui se déroulent à l'intérieur de la machine décrivant le comportement de la machine non pas d'une façon approximative comme pour la commande, mais d'une façon la plus réelle possible [8].

Les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage peuvent être décomposés en deux parties bien distinctes:

- Les modèles dits : physiques.
- Les modèles dits : comportementaux.

En ce qui nous concerne, les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la MAS [6].

Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les deux approches les plus populaires [10].

### I-7-1- Approche numérique

#### I-7-1-1- La méthode des réseaux de perméances

Pour respecter un bon compromis précision-temps de calcul, on utilise cette méthode de modélisation électromagnétique basée sur l'introduction de perméances variables en fonction du flux, formant ainsi, un circuit magnétique équivalent, nommé, réseau de perméances. Le circuit magnétique de la machine est discrétisé et présenté par un ensemble de perméances. Les perméances peuvent être constantes ou dépendent de la géométrie ou encore du flux magnétique. Le circuit magnétique est couplé avec le circuit électrique de la machine. Cette méthode est moins complexe que celle des éléments finis [16], [15].

**I-7-2- Approche numérique****I-7-2-1- La méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est une méthode de simulation des dispositifs électromagnétiques qui permet de résoudre numériquement les équations de Maxwell. Pour appliquer cette méthode, il faut décrire convenablement toute la géométrie du dispositif. Il est possible de prendre en compte les propriétés physiques des différents matériaux. Parfois, il est possible de réduire le domaine d'études grâce à la symétrie du champ électromagnétique. Cette méthode est très précise, mais elle présente deux inconvénients majeurs, un temps de calcul grand, obligation de faire rentrer toute la géométrie de la machine, le modèle obtenu est très complexe [17], [19].

**I-7-3- Approche analytique**

Elle est basée sur la modélisation du moteur sous forme de circuits électriques équivalents. Elle repose sur le concept d'inductance, notion qui caractérise une relation flux courant linéaire. Cette approche permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine et par conséquent de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. 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 court-circuit entre spires statoriques, rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique [17].

Ces modèles mathématiques de complexités différentes, du modèle triphasé au stator et rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multi-phasés au rotor (modèle multi enroulement) ont été l'objet de nombreuses recherches et plusieurs publications. En ce qui nous concerne, notre travail va se baser sur le modèle multi enroulement de la machine asynchrone double étoile a cage d'écureuil.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons pu donner une vision globale sur les différentes parties constituant la machine asynchrone, après on a mis l'accent sur les défauts qui affectent fréquemment cette dernière, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les différentes méthodes de diagnostic. L'objectif de notre mémoire est de trouver un moyen optimal afin de pouvoir diagnostiquer au mieux la machine, pour cela, il faut disposer de bons modèles mathématiques décrivant le comportement de la machine dans l'état sain et sous défaut, ceci fera l'objet du chapitre qui va suivre.

# *Chapitre II*

## *Machines polyphasées et modélisation de la machine asynchrone double étoile*

### Introduction

Les machines triphasées à courant alternatif dominant assez largement le domaine des machines électriques, mais depuis longtemps déjà on s'intéresse aux machines ayant un nombre de phases supérieur à trois. Ces machines sont souvent appelées "machines à grand nombre de phases" ou "machines polyphasées".

Dès la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour accroître la puissance des alternateurs synchrones de très forte puissance. Les machines polyphasées ont par la suite fait l'objet d'un grand intérêt. Elles peuvent être classées en deux types, le premier type représente les machines poly-étoile, le deuxième type où les machines ont un nombre impair de phases reliées à un seul neutre décalé d'un angle régulier entre phases adjacentes [penta-phasée (5)- hepta-phasée (7)...] [12].

La modélisation des machines électriques est une étape très importante, elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part l'élaboration d'un diagnostic.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord présenter la modélisation de la machine asynchrone double étoile à cage en modèle multi enroulements dédié au traitement et détection des différentes pannes, après nous allons décrire une démarche de modélisation d'une MASDE basée sur la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC).

### II-1- Caractéristiques des machines multiphasées

On distingue habituellement deux types de machines multiphasées suivant le nombre de phases qu'on peut avoir dans le stator qui est ou non un multiple de trois. On peut ainsi les classer en deux groupes, machines multiphasées de type 1 et machines multiphasées de type 2.

#### II-1-1- Machines multiphasées de type 1

Dans ce type de machines qui sont appelées aussi machines multi-étoile le nombre de phases statoriques  $q$  est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en  $\eta$  étoiles triphasées.

$$q = 3 n \text{ où } (n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots).$$

Pour un nombre donné de phases il est possible d'avoir plusieurs configurations suivant le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes.

En effet, une machine double étoile dont le nombre de phases statoriques  $q=6$  et les étoiles sont décalées de  $a = \frac{\pi}{6}$  des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de  $a = \frac{\pi}{3}$ .

Pour différencier les configurations possibles on peut introduire un nombre équivalent de phases, noté  $q_a$ , dont la définition est comme suit :

$$q_a = \frac{\pi}{a}$$

Le Tableau II-1 donne les détails de quelques exemples des machines multi-étoile :

**Tableau II-1- Machines multiphasées de Type 1 [1].**

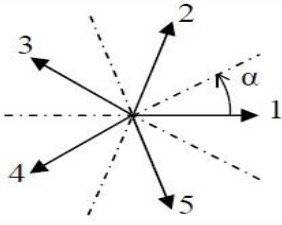
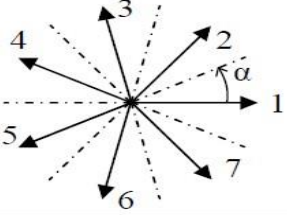
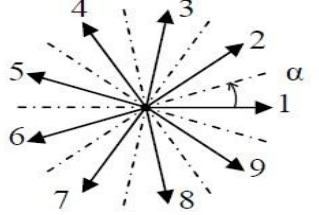
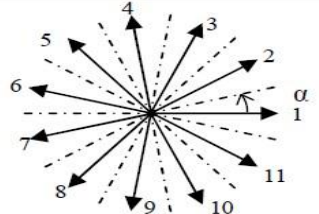
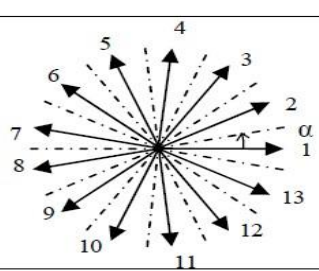
Nombre de Phases ( $q$ )	Nombre équivalent de phase ( $q_a$ )	Décalage angulaire ( $\alpha$ ) degré	Représentation des axes des bobines
3	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	3	$\frac{\pi}{3}$	
6	6	$\frac{\pi}{6}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
12	6	$\frac{\pi}{6}$	

II-1-2- Machines multiphasées de type 2

Les machines multiphasées de type 2 sont des machines dont le nombre de phase statoriques  $q$  est un nombre impair si  $\alpha$  désigne le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes les  $q$  phases sont régulièrement décalées de  $\frac{2\pi}{q} = 2\alpha$ . Donc on a toujours  $q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$ .

Le Tableau II-2 donne le détail de quelques exemples de la machine type 2

Tableau II-2- Machines multiphasées de Type 2 [1].

Nombre de Phases ( $q$ )	Nombre équivalent de phase ( $q_\alpha$ )	Décalage angulaire ( $\alpha$ ) degré	Représentation des axes des bobines
5	5	$\frac{\pi}{5}$	
7	7	$\frac{\pi}{7}$	
9	9	$\frac{\pi}{9}$	
11	11	$\frac{\pi}{11}$	
13	13	$\frac{\pi}{13}$	

## II-2- Applications des machines multiphasées

Les machines multiphasées sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées. Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs et les moulins à ciments... etc [8].

Une autre application concerne l'utilisation des machines multiphasées dans les systèmes de production de l'énergie éolienne, la machine double étoile génère de l'énergie à travers deux systèmes triphasés connectés à un transformateur pour adapter les tensions des six phases aux tensions des réseaux (Figure II-1).

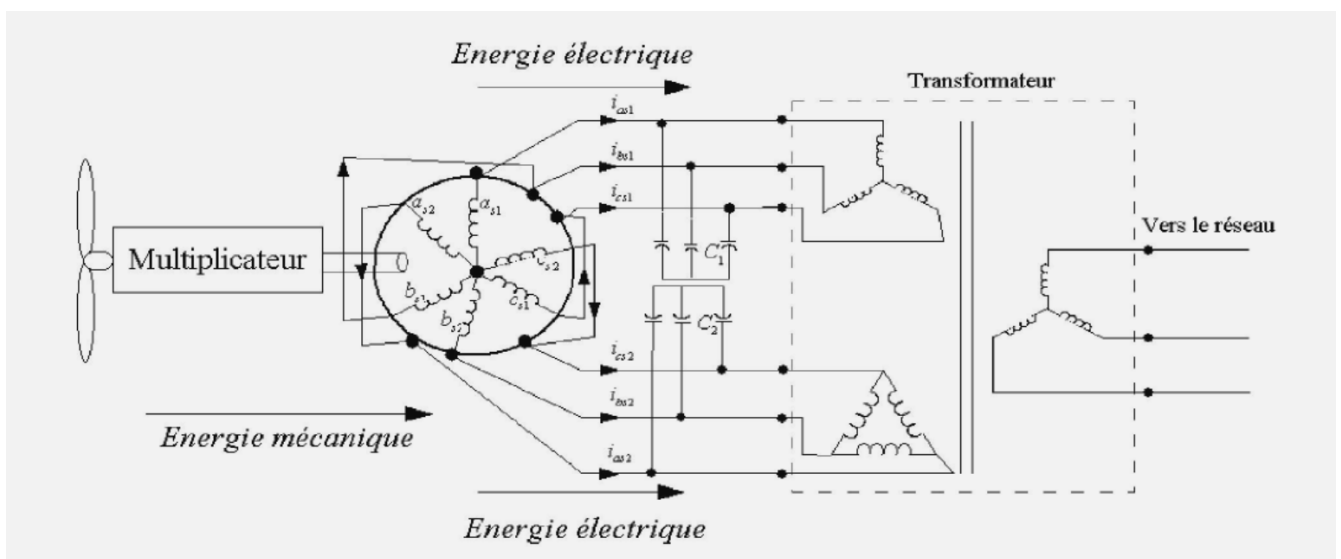


Figure II-1 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.

## II-3- Avantages des machines multiphasées

Les machines multiphasées sont plus avantageuses que les machines conventionnelles parmi ces avantages on peut citer la segmentation de puissance, la fiabilité, la minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

### II-3-1- Élimination d'harmoniques d'espace

La possibilité d'éliminer des harmoniques d'espace est un réel avantage des machines multiphasées, ainsi à un nombre d'encoche donné, plus le nombre de phases augmente plus le nombre d'encoche par pôle et par phase diminue. Ceci augmente le facteur de distribution pour le fondamental, à courant donné on augmente donc l'amplitude du fondamental de la Fmm comparé au cas de la machine triphasée [19].

### II-3-2- Segmentation de puissance

Par l'augmentation du nombre de phases, la puissance est automatiquement augmentée. L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations est d'augmenter le nombre de phases statoriques. La puissance totale demandée par une machine est alors réduite dans chaque phase. Avec cette puissance on peut alimenter la machine par un onduleur dont les composants semi-conducteurs de calibre inférieur pouvant fonctionner à des fréquences de commutations plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations des courants et du couple. La segmentation de puissance est l'avantage principal des machines multiphasées [19].

### II-3-3-La fiabilité

Le régime dégradé (par la perte d'une ou plusieurs phases de la machine) engendre une perte de contrôle de la machine, des ondulations du couple de fortes amplitudes ainsi qu'une diminution de la puissance mécanique. L'une des solutions pour pouvoir commandé la machine dans ce régime consiste à relier le neutre de la machine au point milieu de la source de tension continue.

Dans les machines multiphasées, cette contrainte peut être évitée tant qu'au moins trois phases restent actives, on peut avoir jusqu'à  $(n_{ph} - 3)$  phases ouvertes et cette solution concerne la connexion du neutre au point milieu de la source de tension continue peut être appliquée, plus le nombre de phases augmente, plus on a de degrés de liberté pour commander la machine [13].

### II-3-4- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

L'ondulation du couple électromagnétique dont la fréquence est six fois celle du fondamentale est principalement créée par les harmoniques cinq et sept de temps. Ces harmoniques existent dans la machine triphasée, par contre dans la machine double étoile, ils sont naturellement éliminés.

De manière générale, les couples harmoniques existants dans une machine multiphasée sont ceux de rang  $= 2 n_{ph} \cdot i \pm 1$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$  : le nombre de phases), cette propriété des machines multiphasées à éliminer les harmoniques de couple de rang faible est aussi un avantage certain.

Pratiquement, une machine multiphasée aura moins de pertes rotoriques qu'une machine triphasée [19].

### II-4- Inconvénients des machines multiphasées

Le coût, le nombre d'éléments semi-conducteurs dont est constitué le convertisseur statique augmente avec l'augmentation du nombre de phases statoriques de la machine, ce qui augmente le coût de l'ensemble convertisseur-machine

La multiplication du nombre de semi-conducteurs complique évidemment le système de commande. Il est donc nécessaire de développer des techniques de commande rapprochée (contrôle du convertisseur statique) spécifiques et adaptées.

Certains harmoniques de temps (harmoniques des courants statoriques) ne contribuent pas à la création d'onde de f.m.m. Ces harmoniques de courants ne circulent donc qu'au stator. Dans le cas d'une alimentation par onduleur de tension, l'impédance vue par ces harmoniques peut donc être faible, ce qui provoque des harmoniques de courants d'amplitude importante. Cette apparition de courants harmoniques de circulation constitue l'inconvénient majeur des machines polyphasées alimentées par un onduleur de tension [12].

La machine double étoile est la machine multiphasée la plus courante, sans doute parce qu'elle constitue un bon compromis entre la segmentation de puissance suffisante et un ensemble convertisseur-machine pas trop compliqué et avec un prix acceptable.

### II-5- Modélisation de la machine asynchrone double étoile

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale pour le diagnostic de défauts. Elle est d'un apport précieux dans le domaine de l'étude de défauts, car elle permet de restituer une image du fonctionnement de la machine de ce que l'on peut observer expérimentalement et de prévoir son comportement pour des différentes conditions de fonctionnements. Dans ce chapitre, nous développerons un model basé sur le couplage magnétique des circuits électriques que nous validerons par simulations numériques sous Matlab dans différents régimes de fonctionnement.

## II-6- Modélisation par les équations des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC)

Dans l'approche de modélisation par les équations électriques magnétiquement couplés (CEMC), les inductances propres et mutuelles des différents bobinages ont une place importante dans la mesure où elles contiennent tous les spectres des signatures des différents phénomènes ayant lieu dans la machine. Cette approche offre un bon compromis en terme de précision, de temps de calcul et d'adaptation à la modélisation de la plupart des défauts d'origine électromagnétique de la machine asynchrone [19]. Nous avons favorisé l'approche analytique afin de disposer d'un modèle mathématique ne nécessitant pas d'outils de calculs complexe [10].

## II-7- Description de la machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique  $\alpha$  (dans cette modélisation on prend  $(\alpha = 30^\circ)$ ) et un rotor soit bobiné soit à cage d'écureuil. Pour simplifier l'étude, nous considérons les circuits électriques du rotor comme équivalents à un enroulement triphasé en court-circuit. La figure II-1 donne la position des axes d'enroulements des neuf phases constituant la machine, six phases pour le stator et trois phases pour le rotor.

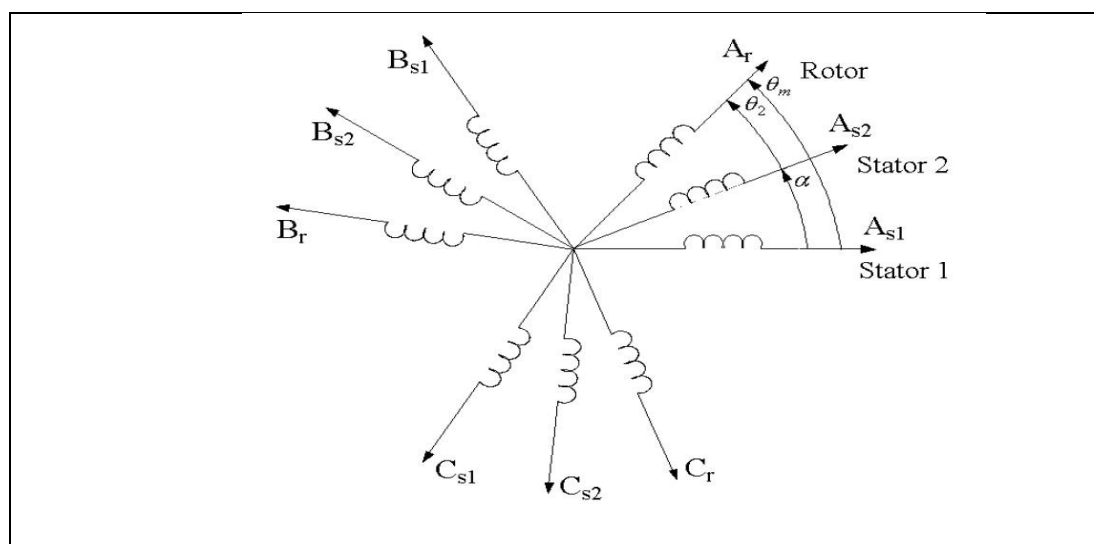


Figure II-2 : Représentation des enroulements de la MASDE.

On notera par l'indice s1 les grandeurs relatives à la première étoile (stator1) et par l'indice s2 celles relatives à la deuxième étoile (stator 2). Les phases de la première étoile  $A_{s1}$ ,  $B_{s1}$ ,  $C_{s1}$  et les phases de la deuxième étoile prennent  $A_{s2}$ ,  $B_{s2}$ ,  $C_{s2}$ , les phases

rotoriques sont notées par  $A_r$ ,  $B_r$ ,  $C_r$ . L'angle de décalage entre les deux étoiles est  $\alpha = \frac{\pi}{6}$

$\theta_m$  : Exprime la position du rotor (phase  $A_r$ ) par rapport à l'étoile 1 (phase  $A_{s1}$ ).

$\theta_2$  : La position du rotor par rapport à l'étoile 2, ces angles sont définis par les équations suivantes :

$$\theta_m = \Omega_m t + \theta_0$$

$$\theta_2 = \theta_m + \alpha$$

$\Omega_m$  [rad/s] : la vitesse mécanique du rotor.

$\theta_0$  : La position du rotor par rapport à l'étoile 1.

### II-8- Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile

Les courants triphasés de fréquence  $f_s$  alimentent l'enroulement 1 du stator de la machine, donnent naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme  $w_s$ , tel que :

$$w_s = \frac{f_s}{p} \text{ [tr/s]}$$

Avec:

$P$  : le nombre de paire de pôles.

Les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle  $\alpha = \frac{\pi}{6}$  alimentent l'enroulement 2 du même stator donnent eux aussi naissance à un autre champ tournant à la même vitesse de synchronisme  $w_s$ . Ces deux champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor, générant ainsi des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse  $w_r$  [tr/s] inférieure à celle du synchronisme ( $w_r < w_s$ ), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. On dit alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport [13] :

$$g = \frac{w_s - w_r}{w_s}$$

$w_s$  : la pulsation fondamentale des courants statorique

La pulsation des courants rotoriques fondamentaux et alors :

$$w_r = (1-g) * w_s$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement.

### II-9- Modèle de la machine asynchrone double étoile à cage d'écureuil

Le modèle multi enroulement définit dans le but de mieux se rapprocher de la structure réelle du rotor à cage, suppose que celui-ci regroupe un nombre de mailles formants un enroulement polyphasé, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et les deux portions d'anneaux de court-circuit qui les relient. Une telle structure a été fréquemment utilisée dans le diagnostic de la machine asynchrone. Plusieurs démarches ont été menées dans cet axe et ont permis de dévoiler quelques phénomènes découlant d'un défaut, tel que l'apparition des raies de fréquences supérieures ou inférieures à la fréquence statorique dans l'analyse spectrale des courants, couple, vitesse et puissance [11].

### II-10- Équations du système

Notre modélisation a été basée sur une machine asynchrone double étoile ayant ( $n_b$ ) barres rotoriques en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La perméabilité du fer est infinie.
- La construction de la machine est supposée homogène c'est-à-dire la longueur de l'entrefer est constante.
- Les enroulements statoriques sont identiques par rapport à l'axe de symétrie.
- On admettra que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques.
- Les  $n_b$  barres rotoriques sont uniformément distribuées.
- Les courants de Foucault, les frottements, et les pertes d'enroulements sont négligés.

La cage rotorique peut être représentée comme  $n$  mailles identiques et équidistantes sur la circonférence du rotor.

Par exemple, la première maille peut comprendre la 1<sup>ère</sup> barre et la  $(k+1)$ <sup>ème</sup> barres et les segments des deux anneaux de court-circuits qui les connectent. Où  $k$  est un nombre entier choisi arbitrairement entre  $(1 \leq k \leq n_b)$ . La deuxième boucle comprend la 2<sup>ème</sup> barre, la  $(k+2)$ <sup>ème</sup> barres et les segments des deux anneaux de court-circuits, qui les connectent aux deux extrémités et ainsi de suite.

### II-10-1- Équations des tensions statoriques

$$\text{➤ Pour l'étoile 1 : } \begin{cases} [V_{s1}] = [V_{sa1} V_{sb1} V_{sc1}]^T \\ [I_{s1}] = [I_{sa1} I_{sb1} I_{sc1}]^T \\ [\Phi_{s1}] = [\Phi_{sa1} \Phi_{sb1} \Phi_{sc1}]^T \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

$$\text{➤ Pour l'étoile 2 : } \begin{cases} [V_{s2}] = [V_{sa2} V_{sb2} V_{sc2}]^T \\ [I_{s2}] = [I_{sa2} I_{sb2} I_{sc2}]^T \\ [\Phi_{s2}] = [\Phi_{sa2} \Phi_{sb2} \Phi_{sc2}]^T \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

La combinaison de la loi d'Ohm et de la loi de Lenz permet d'écrire les relations suivantes :

$$[V_{s1}] = [R_{s1}] [I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s1}] \quad (\text{II-3})$$

$$[V_{s2}] = [R_{s2}] [I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s2}] \quad (\text{II-4})$$

Nous désignons par :

$V_{sa1}, V_{sb1}$  et  $V_{sc1}$  : Les tensions appliquées au premier enroulement triphasé statorique.

$V_{sa2}, V_{sb2}$  et  $V_{sc2}$  : Les tensions appliquées au deuxième enroulement triphasé statorique.

$I_{sa1}, I_{sb1}$  et  $I_{sc1}$  : Les courants statoriques de la première étoile.

$I_{sa2}, I_{sb2}$  et  $I_{sc2}$  : Les courants statoriques de la deuxième étoile.

$\Phi_{sa1}, \Phi_{sb1}$  et  $\Phi_{sc1}$  : Les flux totaux à travers les enroulements statoriques de l'étoile 1.

$\Phi_{sa2}, \Phi_{sb2}$  et  $\Phi_{sc2}$  : Les flux totaux à travers les enroulements statoriques de l'étoile 2.

### II-10-2- Équations des flux statoriques

Les flux statoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles sont exprimés par les équations suivantes :

$$[\Phi_{s1}] = [L_{s1,s1}] [I_{s1}] + [M_{s1,s2}] [I_{s2}] + [M_{s1,r}] [I_r] \quad (\text{II-5})$$

$$[\Phi_{s2}] = [L_{s2,s2}] [I_{s2}] + [M_{s2,s1}] [I_{s1}] + [M_{s2,r}] [I_r] \quad (\text{II-6})$$

$[I_r]$  : Est le vecteur des courants rotoriques avec :

$$[I_r] = [I_{r1} I_{r2} I_{r3} \dots \dots \dots I_{rn_b} I_{re}]^T$$

$[R_{s1}]$ ,  $[R_{s2}]$  : Les matrices des résistances statoriques (étoile 1 et 2) respectivement :

$$[R_{s1}] = R_{s1} [ID]_{3 \times 3}$$

$$[R_{s2}] = R_{s2} [ID]_{3 \times 3}$$

Avec :

$[ID]_{3 \times 3}$  : La matrice identité d'ordre 3.

$[R_{s1}]$  : La résistance d'une phase de la 1<sup>ère</sup> étoile.

$[R_{s2}]$  : La résistance d'une phase de la 2<sup>ème</sup> étoile.

Les sous matrices des inductances dans les équations (II-5), et (II-6) sont exprimées comme suite :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_f + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_f + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_f + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (II-7)$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_f + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L_f + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L_f + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (II-8)$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(a) & \cos(a + \frac{2\pi}{3}) & \cos(a + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(a + \frac{4\pi}{3}) & \cos(a) & \cos(a + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(a + \frac{2\pi}{3}) & \cos(a + \frac{4\pi}{3}) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (II-9)$$

$$[M_{s1,s2}] = [M_{s2,s1}]^T$$

L'inductance mutuelle entre les phases statoriques est calculée par :

$$M_{s1s1} = L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{L_{ms}}{2} \quad (II-10)$$

L'inductance de magnétisation d'une boucle statorique (pour chaque bobine du stator) :

$$L_{ms} = \frac{4\mu_0(n_s)^2 r_e l}{l_{em} \pi p^2}$$

$l$  : Longueur du rotor

$l_{em}$  : Longueur moyenne de l'entrefer.

$r_e$  : Rayon moyenne au niveau de l'entrefer.

$p$  : C'est le nombre de paires de pôles.

$n_s$  : Nombre d'encoches statoriques.

L'inductance totale de la bobine du stator est la somme de l'inductance magnétisante  $L_{ms}$  et l'inductance de fuite  $L_f$ .

Cependant, on peut écrire pour un enroulement statorique symétrique :

$$L_{s1}=L_{as1}=L_{bs1}=L_{cs1} = L_f + L_{ms} \text{ : l'inductance propre de 1}^{ere} \text{ étoile.}$$

$$L_{s2}=L_{as2}=L_{bs2}=L_{cs2} = L_f + L_{ms} \text{ : l'inductance propre de 2}^{eme} \text{ étoile.}$$

Les inductances mutuelles  $M_{s1,r}$  et  $M_{s2,r}$  sont des matrices  $3*(nb + 1)$  composées des inductances mutuelles entre les bobines du stator (étoile 1 et 2) et des boucles rotoriques.

$$[M_{s1,r}] = \begin{bmatrix} M_{sa1r1} & M_{sa1r2} & M_{sa1r3} & \dots & M_{sa1r(nb-1)} & M_{sa1rnb} & 0 \\ M_{sb1r1} & M_{sb1r2} & M_{sb1r3} & \dots & M_{sb1r(nb-1)} & M_{sb1rnb} & 0 \\ M_{sc1r1} & M_{sc1r2} & M_{sc1r3} & \dots & M_{sc1r(nb-1)} & M_{sc1rnb} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II -11})$$

$$[M_{s2,r}] = \begin{bmatrix} M_{sa2r1} & M_{sa2r2} & M_{sa2r3} & \dots & M_{sa2r(nb-1)} & M_{sa2rnb} & 0 \\ M_{sb2r1} & M_{sb2r2} & M_{sb2r3} & \dots & M_{sb2r(nb-1)} & M_{sb2rnb} & 0 \\ M_{sc2r1} & M_{sc2r2} & M_{sc2r3} & \dots & M_{sc2r(nb-1)} & M_{sc2rnb} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II -12})$$

Les inductances mutuelles entre les phases statoriques et les segments de l'anneau de court circuit sont négligées, ceci est représenté par un zéro dans les dernières colonnes de la matrice.

Où  $M_{sairj}$  représente l'inductance mutuelle entre la phase "i" et la  $j^{eme}$  maille rotorique. De même pour les autres phases.

$$[M_{s1,r}] = [M_{r,s1}]^T$$

$$[M_{s2,r}] = [M_{r,s2}]^T$$

Inductance mutuelle stator rotor :

$$\text{Pour l'étoile 1 :} \quad M_{s1,r} = \frac{4\mu_0 n_s r_e l}{l_{em} \pi p^2} \sin\left(\frac{a_b^r}{2} p\right) \quad (\text{II-13})$$

$$\text{Pour l'étoile 2 :} \quad M_{s2,r} = \frac{4\mu_0 n_s r_e l}{l_{em} \pi p^2} \sin\left(\frac{a_b^r}{2} p + a\right) \quad (\text{II-14})$$

$a$  : L'angle de décalage entre les deux étoiles  $a = \frac{\pi}{6}$  et  $a_b^r = \frac{2\pi}{n_b}$

$n_b$ : C'est le nombre de barres rotoriques.

En remplaçant les équations (II-5) et (II-6) dans (II-1) et (II-2)

$$V_{s1} = [R_{s1}] [I_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + [M_{s1,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + \left[ \frac{d[M_{s1,r}]}{dt} \right] [I_r] \quad (\text{II-15})$$

$$V_{s2} = [R_{s2}] [I_{s2}] + [L_{s2,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + [M_{s2,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + \left[ \frac{d[M_{s2,r}]}{dt} \right] [I_r] \quad (\text{II-16})$$

Le dernier terme de l'équation (II-15) peut être écrit comme suit :

$$\frac{d[M_{s1,r}]}{dt} [I_r] = \frac{d[M_{s1,r}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_r] \quad (\text{II-17})$$

Et le dernier terme de l'équation (II-16) peut être écrit comme suit :

$$\frac{d[M_{s2,r}]}{dt} [I_r] = \frac{d[M_{s2,r}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_r] \quad (\text{II-18})$$

Où,  $\theta_r$  est l'angle qui définit la position du rotor par rapport au stator.

$$\text{Avec : } \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II-19})$$

$\omega_r$ : Est la vitesse mécanique du rotor.

Par substitution (II-17) et (II-18) dans (II-15) et (II-16), les équations deviennent :

$$V_{s1} = [R_{s1}] [I_{s1}] + [L_{s1,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + [M_{s1,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + [M_{s1,r}] \frac{d[I_r]}{dt} + \omega_r \frac{d[M_{s1,r}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{II-20})$$

$$V_{s2} = [R_{s2}] [I_{s2}] + [L_{s2,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + [M_{s2,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + [M_{s2,r}] \frac{d[I_r]}{dt} + \omega_r \frac{d[M_{s2,r}]}{d\theta_r} [I_r] \quad (\text{II-21})$$

II-10-3- Équations des tensions rotoriques

La figure (II-3) illustre le schéma équivalent du rotor à cage où sont représentés les courants circulant dans les mailles et les anneaux de court-circuit.

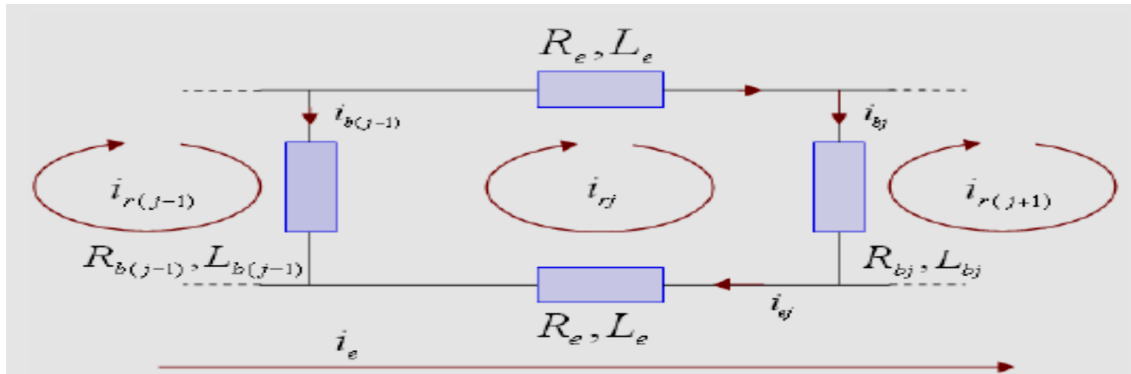


Figure II-3 : Circuit équivalent du rotor à cage d'écureuil.

Avec:

$i_{rj}$  : Les courants qui circulent dans la  $j^{\text{ème}}$  barre.

$i_{re}$  : Les courants qui circulent dans l'anneau de court-circuit.

La combinaison de la loi d'Ohm et de la loi de Lenz permet d'écrire les relations suivantes :

$$[V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \tag{II-22}$$

$$[V_r] = [V_{r1} V_{r2} V_{r3} \dots V_{rnb} V_e]^T \tag{II-23}$$

La tension de l'anneau de court-circuit  $V_e=0$ , et la tension des mailles rotoriques  $V_{rj}=0$ ;

Avec :  $j=1,2,\dots,n_b$ .

$[\Phi_r]$  : Le vecteur des flux rotoriques.

$[I_r]$  : Le vecteur des courants rotoriques.

$$\text{Avec : } [\Phi_r] = [\Phi_{r1} \Phi_{r2} \Phi_{r3} \dots \Phi_{rnb} \Phi_e]^T \tag{II-24}$$

$$[I_r] = [I_{r1} I_{r2} I_{r3} \dots I_{rnb} I_{re}]^T \tag{II-25}$$

$[R_r]$ : Est une matrice symétrique de dimensions  $(n_b + 1) \times (n_b + 1)$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} 2(R_b + R_e) & -R_b & 0 & \dots & 0 & -R_b & -R_e \\ -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_b & \dots & 0 & 0 & -R_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 2(R_b + R_e) & -R_b & -R_e \\ -R_b & 0 & 0 & \dots & -R_b & 2(R_b + R_e) & -R_e \\ -R_e & -R_e & -R_e & \dots & -R_e & -R_e & n_b * R_e \end{bmatrix} \quad (II-26)$$

$R_b$ : La résistance d'une barre rotorique.

$R_e$ : La résistance d'un segment de l'anneau de court-circuit.

#### II-10-4- Équation du flux rotorique

Le flux rotorique est donné par :

$$[\Phi_r] = [L_r] [I_r] + [M_{r,s1}] [I_{s1}] + [M_{r,s2}] [I_{s2}] \quad (II-27)$$

$$[L_r] = \text{La matrice des inductances rotoriques de dimension } (n_b + 1) \times (n_b + 1). \quad (II-28)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{rr} & M_{r1r2} - L_b & M_{r1r3} & \dots & M_{r1rn_b-1} & M_{r1rn_b-1} - L_b & -L_e \\ M_{r2r1} - L_b & L_{rr} & M_{r2r3} - L_b & \dots & M_{r2rn_b-1} & M_{r2rn_b} & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & -L_e \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & -L_e \\ M_{rn_b-1r1} & M_{rn_b-1r2} & M_{rn_b-1r3} & \dots & L_{rr} & M_{rn_b-1rn_b} - L_b & -L_e \\ M_{rn_br1} - L_b & M_{rn_br2} & M_{rn_br3} & \dots & M_{rn_brn_b-1} - L_b & L_{rr} & -L_e \\ -L_e & -L_e & -L_e & \dots & -L_e & -L_e & n_b L_e \end{bmatrix}$$

L'inductance totale d'une maille rotorique :  $L_{rr} = L_{mr} + 2(L_b + L_e)$

$L_{mr}$  : Inductance de magnétisation rotorique.

$L_b$  : Inductance de fuite d'une barre rotorique.

$L_e$  : Inductance d'un segment de l'anneau du court-circuit.

$M_{rirj}$  : Inductance mutuelle entre la  $i^{eme}$  et la  $j^{eme}$  maille rotorique.

L'inductance mutuelle entre deux boucles rotoriques :  $M_{rr} = -\frac{2 \pi l r_e}{n_b^2 l_{em}}$

Où :  $L_{rr} = L_{mr} + 2(L_b + L_e)$ .

$L_{mr}$  : Inductance de magnétisation de chaque maille rotorique.

$L_b$  : Inductance de fuite d'une barre rotorique.

$L_e$  : Inductance de fuite d'un segment de l'anneau de court-circuit.

En remplaçant l'équation (II-27) dans (II-22), on obtient :

$$V_r = [R_r] [I_r] + [L_r] \frac{d[I_r]}{dt} + [M_{r,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + \frac{d[M_{r,s1}]}{dt} [I_{s1}] + [M_{r,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + \frac{d[M_{r,s2}]}{dt} [I_{s2}] \quad (\text{II-29})$$

Sachant que :

$$\frac{d[M_{r,s1}]}{dt} [I_{s1}] = \frac{d[M_{r,s1}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_{s1}] \quad (\text{II-30})$$

$$\frac{d[M_{r,s2}]}{dt} [I_{s2}] = \frac{d[M_{r,s2}]}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I_{s2}] \quad (\text{II-31})$$

Par substitution (II-30) et (II-31) dans (II-29), l'équation (II-29) devient :

$$V_r = [R_r] [I_r] + [L_r] \frac{d[I_r]}{dt} + [M_{r,s1}] \frac{d[I_{s1}]}{dt} + [M_{r,s2}] \frac{d[I_{s2}]}{dt} + W_r \left( \frac{d[M_{r,s1}]}{d\theta_r} [I_{s1}] + \frac{d[M_{r,s2}]}{d\theta_r} [I_{s2}] \right) \quad (\text{II-32})$$

### II-10-5- Équations mécanique

Nous allons ajouter les équations mécaniques du mouvement au système d'équations électriques et ceci dans le but de faire une étude électromécanique du fonctionnement de la machine.

L'équation mécanique du mouvement dépend des caractéristiques de la charge qui diffèrent largement d'une application à une autre.

$$J \frac{dW_r}{dt} = C_{em} - C_r - k_f W_r \quad (\text{II-33})$$

$$W_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II-34})$$

J: Moment d'inertie total sur l'arbre du moteur.

$C_r$ : Couple de charge.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique produit par la machine.

$k_f$ : Coefficient de frottement.

Le couple électromagnétique est tiré à partir de la co-énergie magnétique  $W_{co}$  comme suit :

$$C_{em} = \left[ \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right] (i_s, i_r \text{ constants}) \quad (\text{II-35})$$

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left( \begin{bmatrix} [I_{s1}]^T & [I_{s2}]^T & [I_r]^T \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta_r} \begin{bmatrix} [L_{s1,s1}] & [M_{s1,s2}] & [M_{s1,r}] \\ [M_{s2,s1}] & [L_{s2,s2}] & [M_{s2,r}] \\ [M_{r,s1}] & [M_{r,s2}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{s1}] \\ [I_{s2}] \\ [I_r] \end{bmatrix} \right) \quad (II-36)$$

Avec  $p$  : Nombre de paires de pôles de la machine.

Comme toutes les matrices d'inductance mutuelle stator /rotor dépendent de  $\theta_r$ , l'équation du couple peut être simplifiée comme suit :

$$C_{em} = p \left( [I_{s1}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [M_{s1,r}] + [I_{s2}]^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [M_{s2,r}] \right) [I_r] \quad (II-37)$$

## Conclusion

Dans ce chapitre, la première partie a été consacrée aux machines multiphasées, leurs avantages et leurs inconvénients .La machine double étoile est la machine multiphasée la plus courante.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté explicitement les étapes de construction du modèle mathématique de la machine asynchrone double étoile à cage d'écureuil, en utilisant la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés (CEMC).

Nous avons tout d'abord abordé les hypothèses simplificatrices sur lesquelles repose le modèle multi enroulement, puis vient le calcul des différentes inductances et mutuelles statoriques rotoriques.

La mise en équation des calculs précédents a permis de trouver l'ensemble des équations différentielles définissant le modèle de la machine, dans le but d'effectuer une simulation numérique sous Matlab, ceci fera l'objet du prochain chapitre.

# *Chapitre III*

## *Simulation des modèles sains et défaillants de la machine asynchrone double étoile*

## Introduction

Après avoir défini le modèle multi enroulement de la machine asynchrone double étoile un programme écrit sous Matlab permet de simuler le comportement de la MASDE dans les différentes conditions de fonctionnements.

Les paramètres de la machine sont tirés de la référence [21] la résolution des équations différentielles obtenues est réalisée par la méthode Runge Kutta d'ordre 4.

Dans cette partie on va présenter et étudier l'évolution des différentes grandeurs électriques et électromagnétiques de la machine alimentée directement par un réseau triphasé avec deux enroulements statoriques connectés en étoile, l'interprétation des courbes sera donnée pour différentes conditions de fonctionnement de la machine saine ou défaillante. Cette étude a pour objectif d'analyser et d'interpréter les phénomènes observés, tels que les oscillations du couple et de la vitesse ainsi que la modulation du courant statorique et rotorique pour analyser l'effet de la perte d'une ou plusieurs phases sur ces grandeurs.

Pour la première étoile :  $V_{sa1} = 220 \cos(\omega_s t)$

$$V_{sb1} = 220 \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{sc1} = 220 \cos(\omega_s t + \frac{4\pi}{3})$$

Pour la deuxième étoile :  $V_{sa2} = 220 \cos(\omega_s t + \frac{\pi}{6})$

$$V_{sb2} = 220 \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6})$$

$$V_{sc2} = 220 \cos(\omega_s t + \frac{4\pi}{3} + \frac{\pi}{6})$$

### III-1- Régime sain

La simulation de ce mode de fonctionnement dit sain est primordiale pour un traitement juste et rigoureux, en effet le spectre issu de ce mode de fonctionnement sera considéré comme le spectre de référence. Nous allons donc simuler un démarrage à vide de la machine saine, puis ce dernier sera soumis à une charge de 13.5 Nm à l'instant  $t=1.5$  s.

Dans cette partie nous pouvons étudier l'évolution des grandeurs temporelles tels que les courants statoriques et rotoriques, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation, lorsque la machine ne présente aucune défaillance.

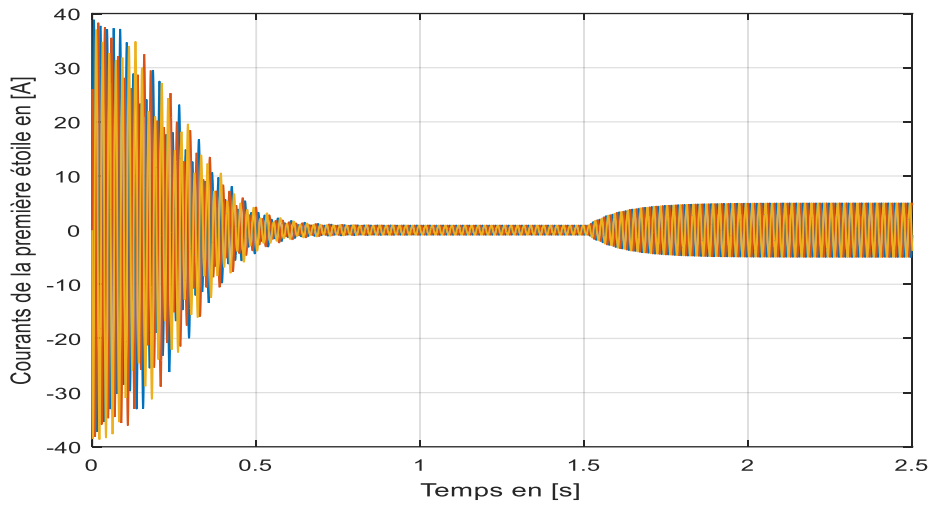


Figure III-1: Courant des phases statoriques de la première étoile au démarrage, puis en charge.

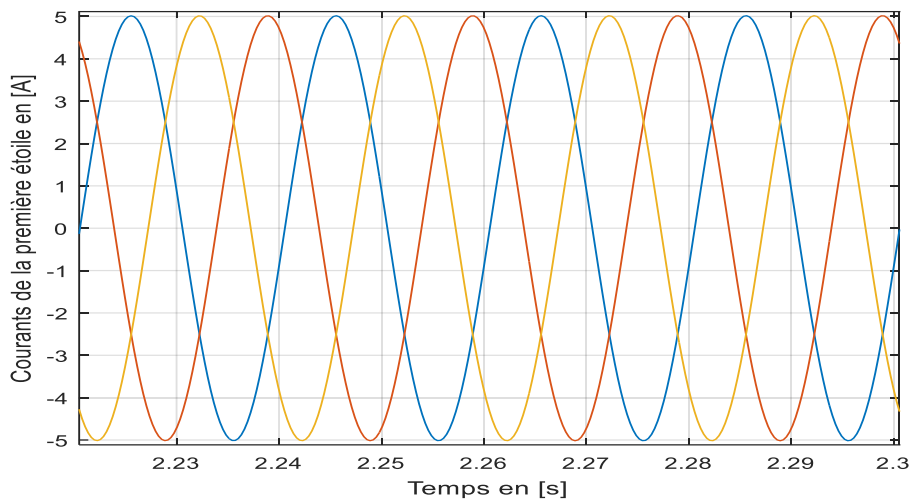


Figure III-2 : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent en charge

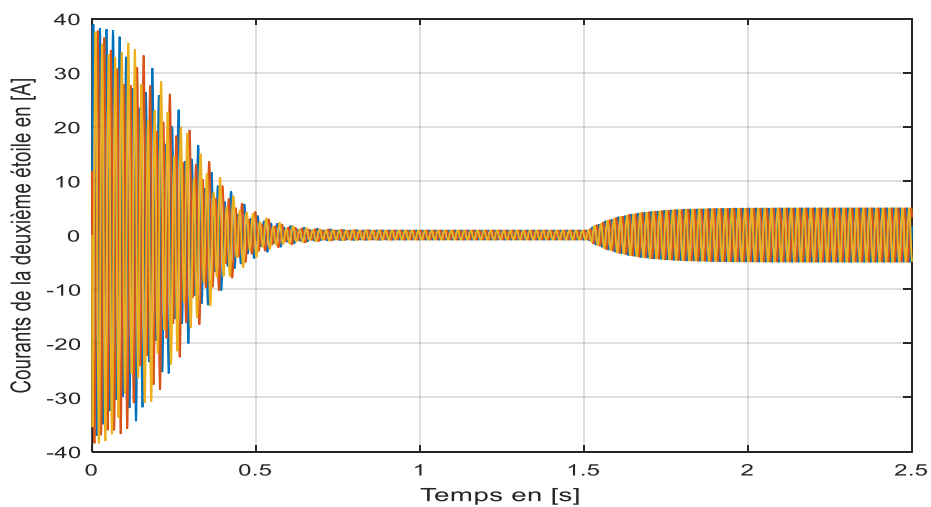


Figure III-3 : Courant des phases statoriques de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge.

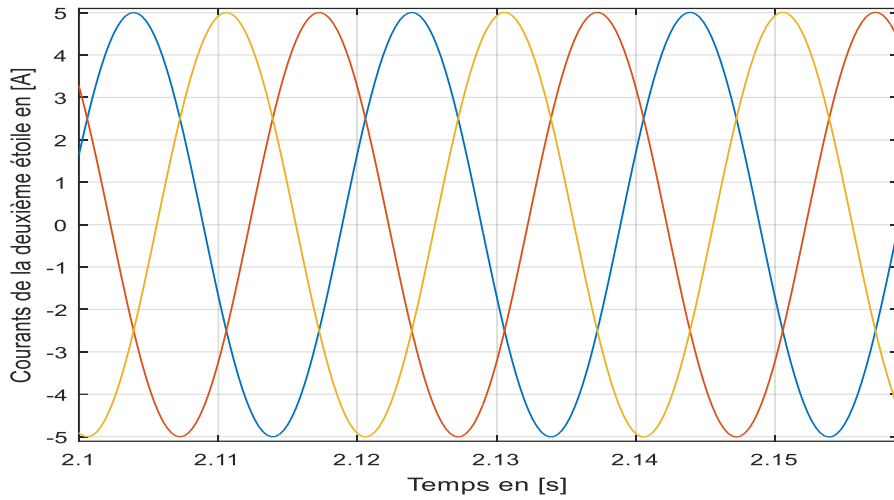


Figure III-4 : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent

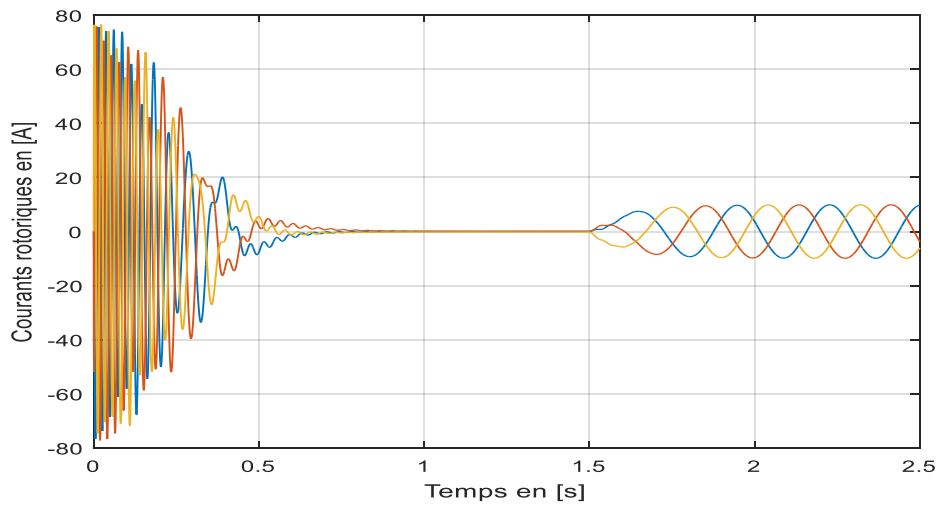


Figure III-5 : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.

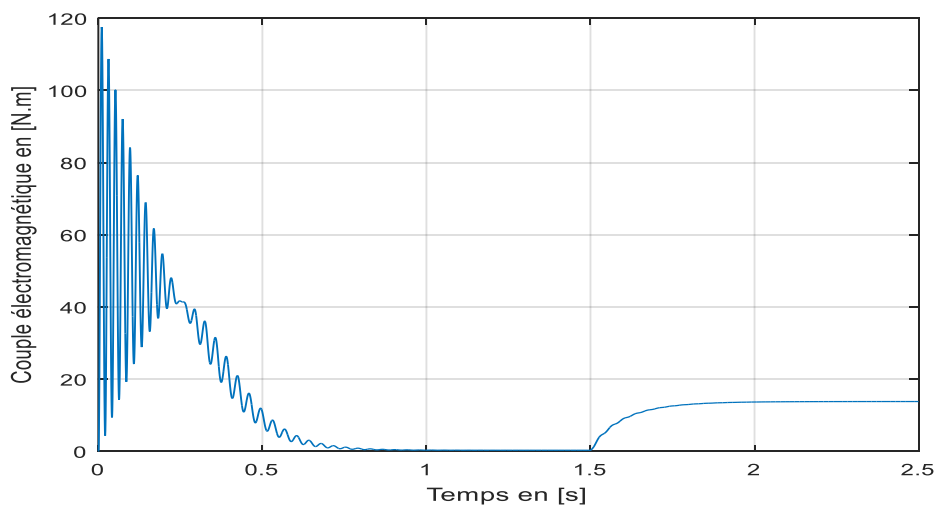


Figure III-6 : Couple électromagnétique à vide puis en charge.

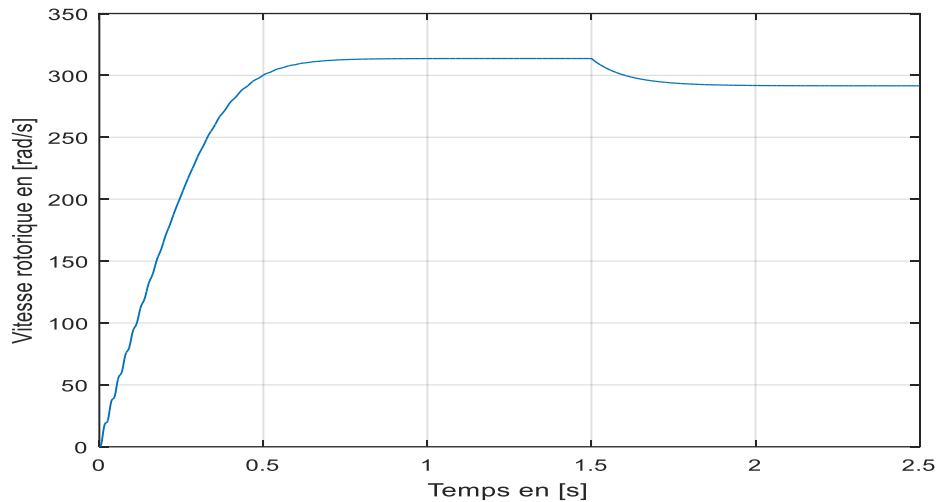


Figure III-7 : Vitesse de rotation à vide puis en charge.

### III-1-1 Interprétation des résultats

Les figures III-1 et III-3 montrent l'évolution des courants statoriques de la première et de la deuxième étoile respectivement en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide puis en charge sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

Étant donné que le rotor est initialement à l'arrêt, on remarque de grandes oscillations au niveau des courants statoriques dans les deux étoiles, ces dernières durent approximativement 0.6 secondes, ce régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courant qui atteignent des valeurs d'environ 6 ou 7 fois le courant nominal, leurs valeurs sont de l'ordre de 40 A pour permettre au couple électromagnétique de faire tourner l'inertie du moteur, puis ces courants baissent pour atteindre une valeur de 2 Ampère et qui représente le fonctionnement à vide.

A l'instant  $t=1.5s$  on applique une charge de 13.5 N.m et on remarque une augmentation de l'amplitude des courants statoriques et cela est dû à l'appel de courant imposé par la machine pour vaincre le couple résistant.

Les figures III-2 et III-4 représentent le zoom d'une portion des courants de la première et de la deuxième étoile en régime permanent en charge, les courants de chaque étoile sont déphasés entre eux de  $120^\circ$  et équilibrés, leurs amplitudes sont constantes dans le temps, les courants des deux étoiles sont décalés entre eux d'un angle de  $\pi/6$ .

La figure III-5 représente l'évolution du courant dans les enroulements rotoriques en fonction du temps, aux premiers instants du démarrage, le rotor se trouve balayé par un flux qui varie rapidement dans le temps, d'où l'apparition des courants induits de grandes amplitudes, le rotor accélère, au même temps la vitesse du rotor s'approche de celle du champ tournant statorique (vitesse de synchronisme), ce qui explique la chute des courants rotoriques à des valeurs presque nulles dans le régime permanent à vide, à  $t=1.5s$  on impose à la machine un couple résistant de  $13.5N.m$ , ainsi le rotor décélère, donc la vitesse du glissement augmente et provoque une légère augmentation des courants rotoriques atteignant une valeur de  $10A$ .

La figure III-6 représente l'évolution du couple électromagnétique, au démarrage le couple est fortement pulsatoire, il atteint une valeur maximale de  $120 N.m$ . Après la disparition du régime transitoire le couple chute rapidement pour atteindre une valeur qui égale à celle du couple de frottement  $C_{em}=f*w_r$ , à  $t=1.5 s$  nous appliquons un couple résistant de  $13.5 N.m$  et évidemment le couple électromagnétique réagit d'une manière inverse de sorte à vaincre le couple résistant, donc il augmente à une valeur légèrement supérieure.

La figure III-7 montre l'évolution de la vitesse de rotation du rotor, aux premiers instants du démarrage, la vitesse augmente d'une façon presque linéaire de  $0$  à  $310rad/s$  dans un intervalle de temps de  $0.7s$ , atteignant ainsi le régime permanent, par la suite, à l'instant  $t=1.5s$ , on applique un couple résistant de  $13.5 N.m$  qui a tendance à freiner l'arbre moteur d'où la diminution de la vitesse à une valeur de  $290rad/s$ .

## III-2- Régime dégradé

### III-2-1- Perte d'une phase dans une étoile

Dans ce cas, on simule le cas de l'ouverture d'une phase dans la 1<sup>ère</sup> étoile.

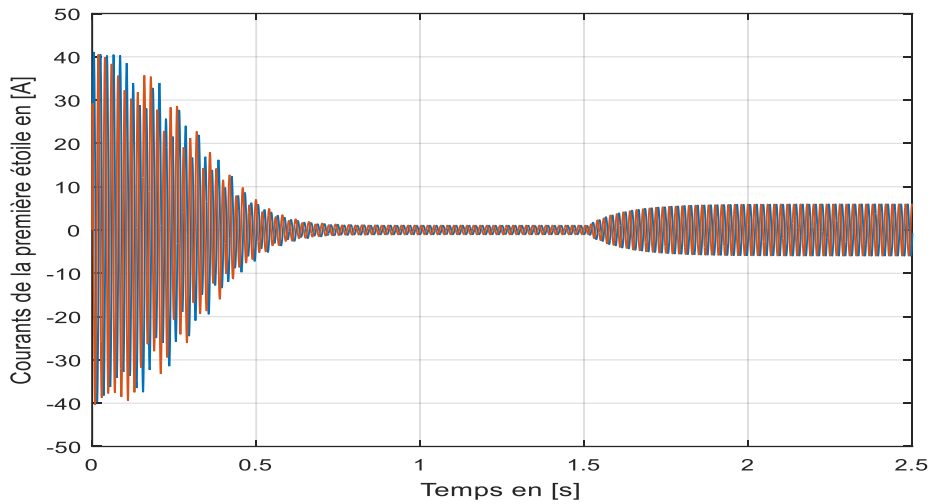


Figure III-8 : Courants des phases statoriques de la première étoile au démarrage, puis en charge.

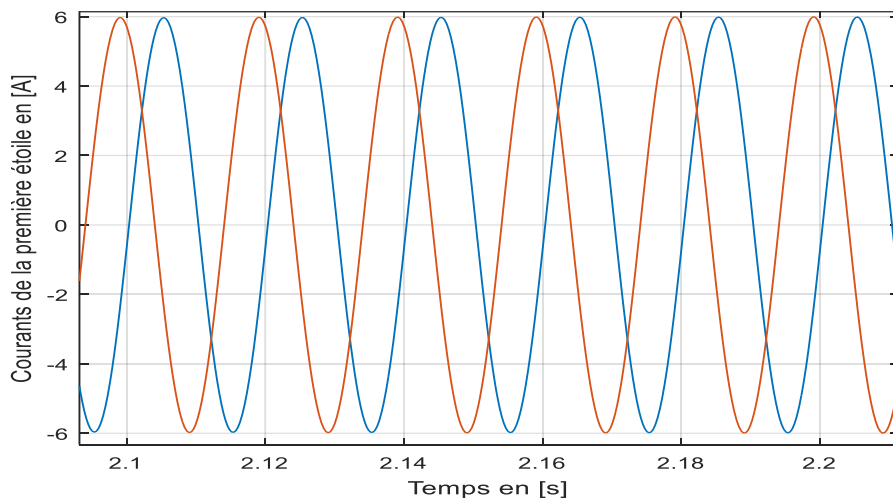


Figure III-9 : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent.

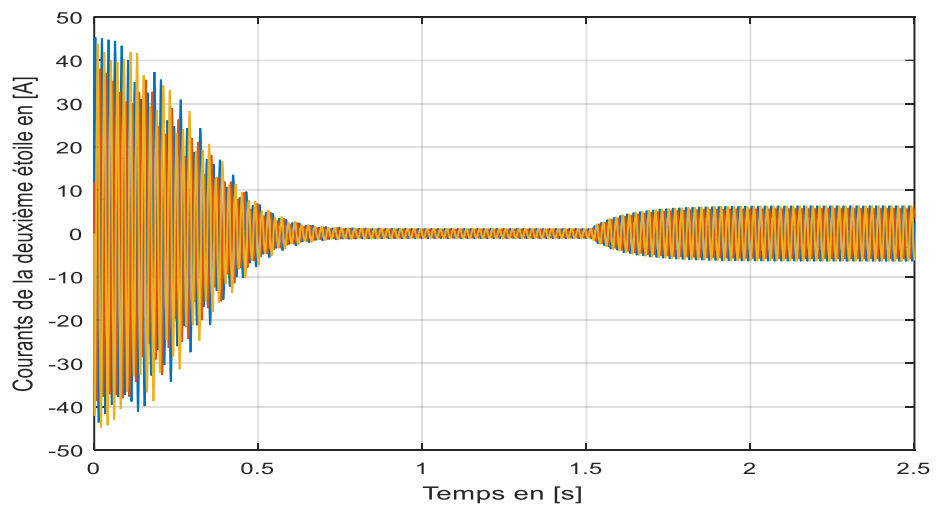


Figure III-10 : Courants des phases statoriques de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge.

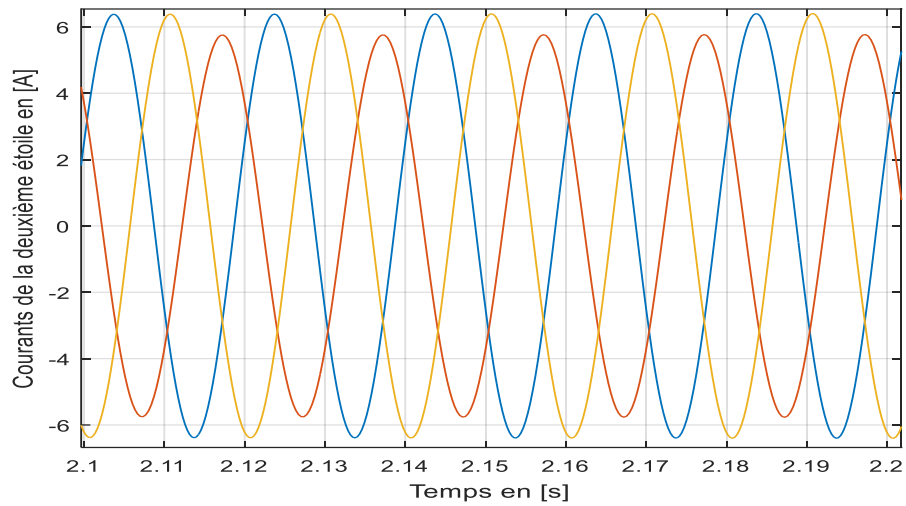


Figure III-11 : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent.

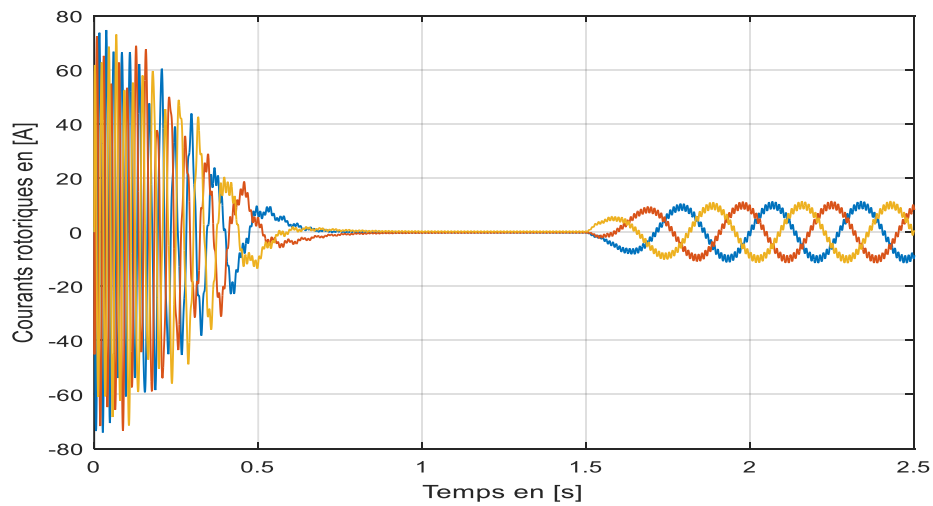


Figure III-12 : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.

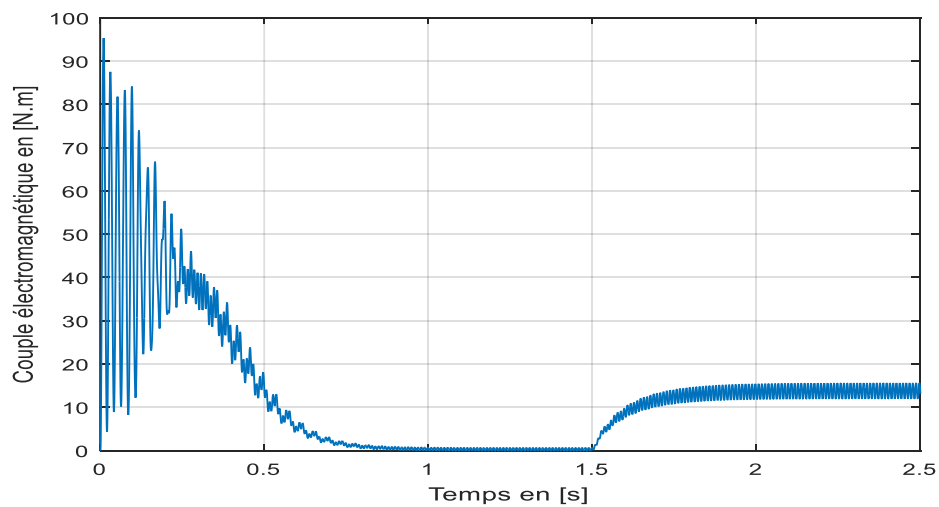


Figure III-13 : Couple électromagnétique à vide puis en charge.

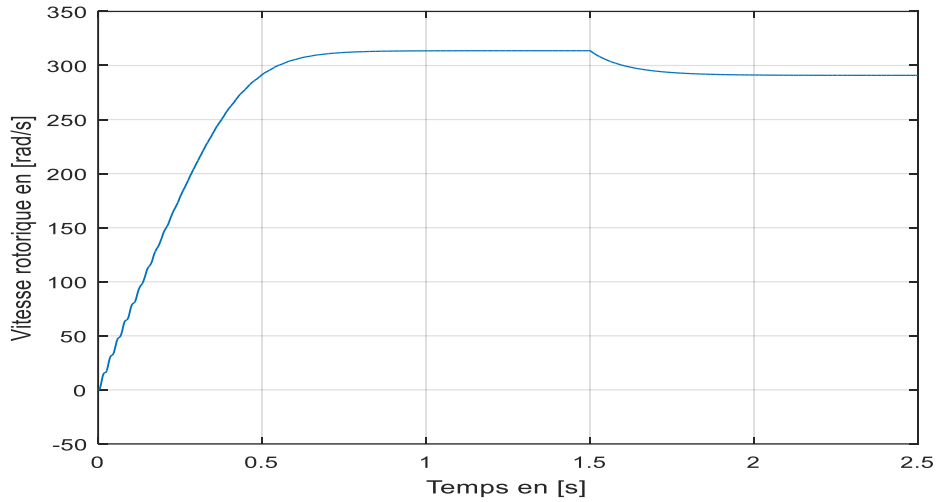


Figure III-14 : Vitesse de rotation à vide puis en charge.

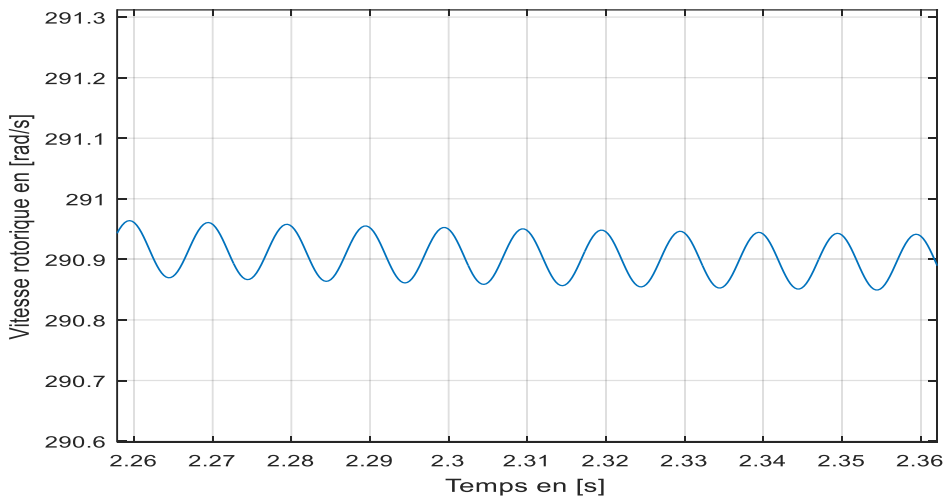


Figure III-15 : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent.

### III-2-1-1- Interprétation des résultats

Les figures III-8 et III-10 montrent l'évolution des courants statoriques dans les deux étoiles en fonction du temps, on remarque de grandes oscillations au régime transitoire et une légère augmentation dans l'amplitude des courant qui traversent les enroulements statoriques des deux étoiles au régime permanent ,et à partir de la figure III-11 on constate que les courants de la deuxième étoile sont déséquilibrés, on aura alors au niveau du rotor des courants induits déséquilibrés donc un flux rotorique pulsatoire ce dernier va influencer sur le comportement électrique et mécanique de la machine.

La figure III-13 montre l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps, on constat de fortes pulsations au démarrage avec une petite diminution dans la valeur du couple

développé par la machine comparé à sa valeur en mode sain. Au régime permanent en charge on remarque une légère ondulation, cette dernière va influencer sur le comportement de la vitesse mécanique du rotor.

La figure III-14 l'évolution de la vitesse rotorique en fonction du temps, au régime transitoire on remarque la même allure de la vitesse qu'au régime sain sans défaut et après l'introduction du couple résistant le rotor décélère et la vitesse diminue. On remarque de fortes ondulations avec de faibles amplitudes de cette dernière au régime permanent en charge (figure III-15).

#### III-2-2- Perte de deux phases dans une étoile

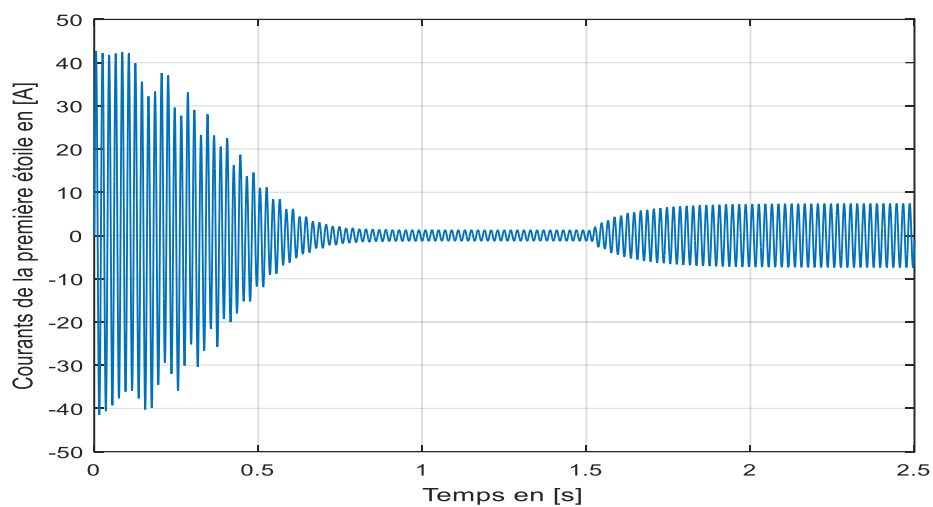


Figure III-16 : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge.

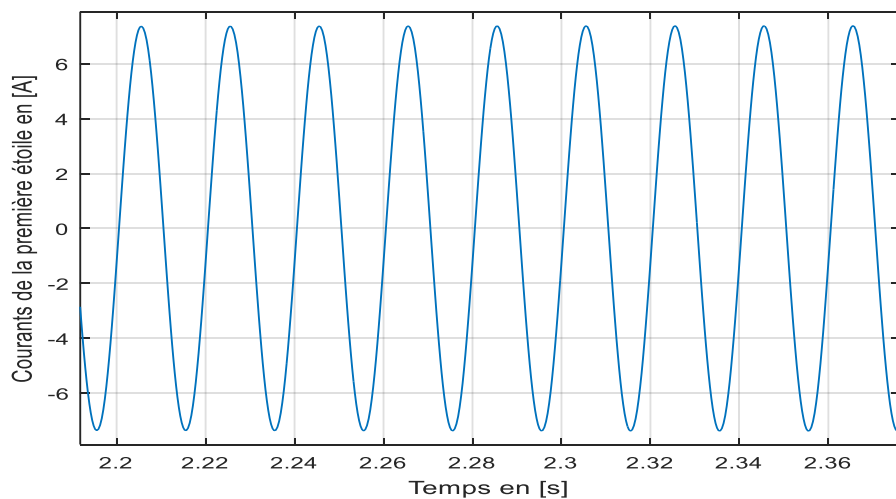


Figure III-17 : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent.

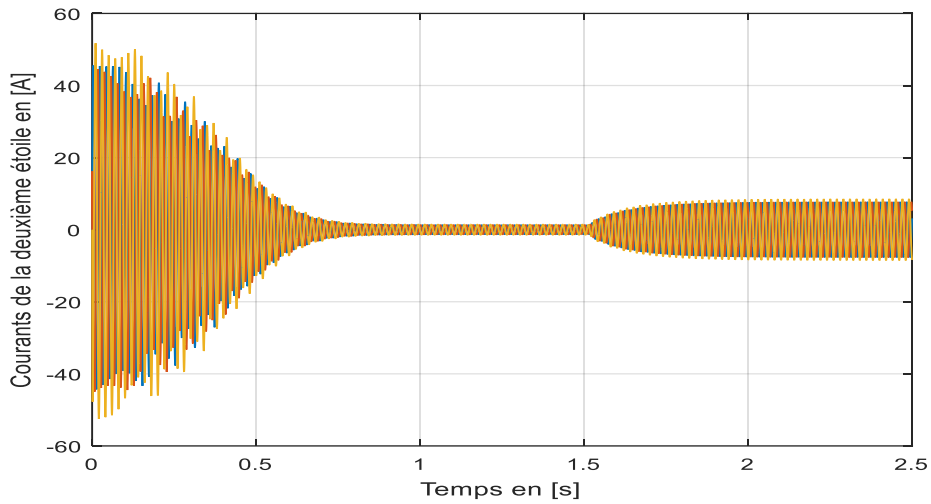


Figure III-18 : Courants de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge.

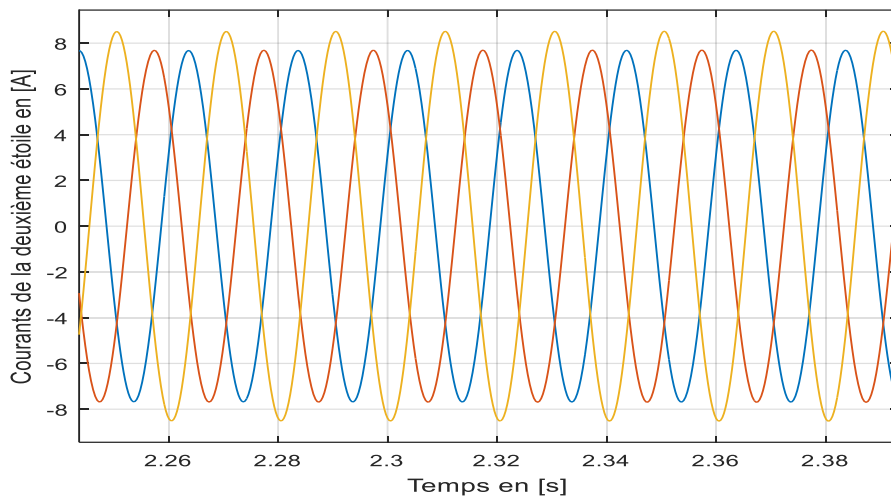


Figure III-19 : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile, en régime permanent.

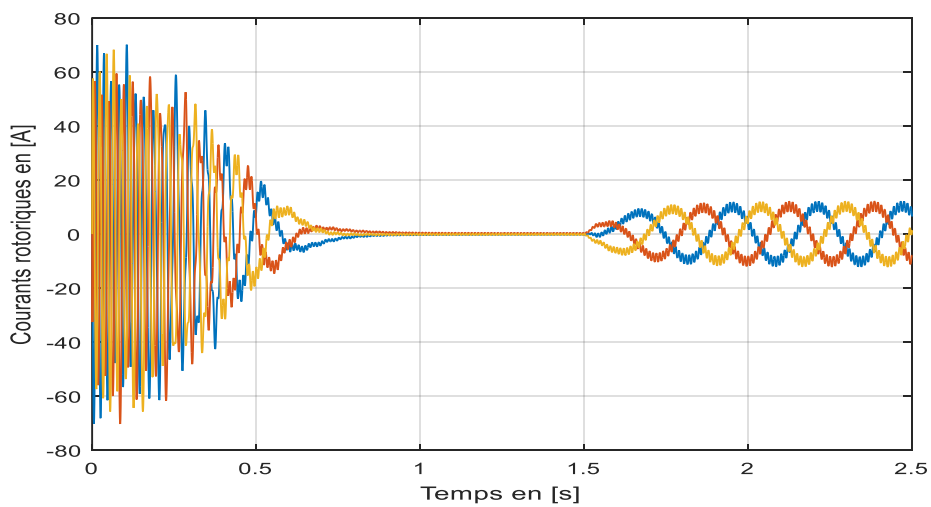


Figure III-20 : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.

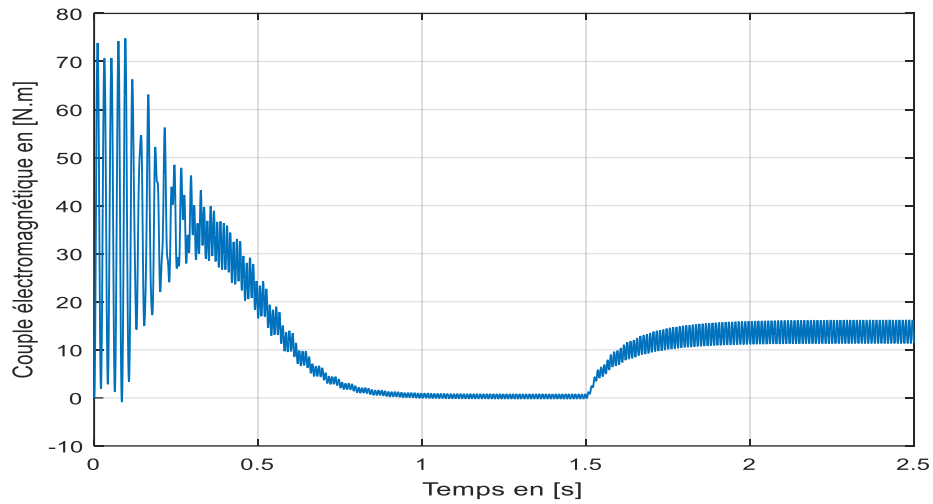


Figure III-21 : Couple électromagnétique à vide, puis en charge.

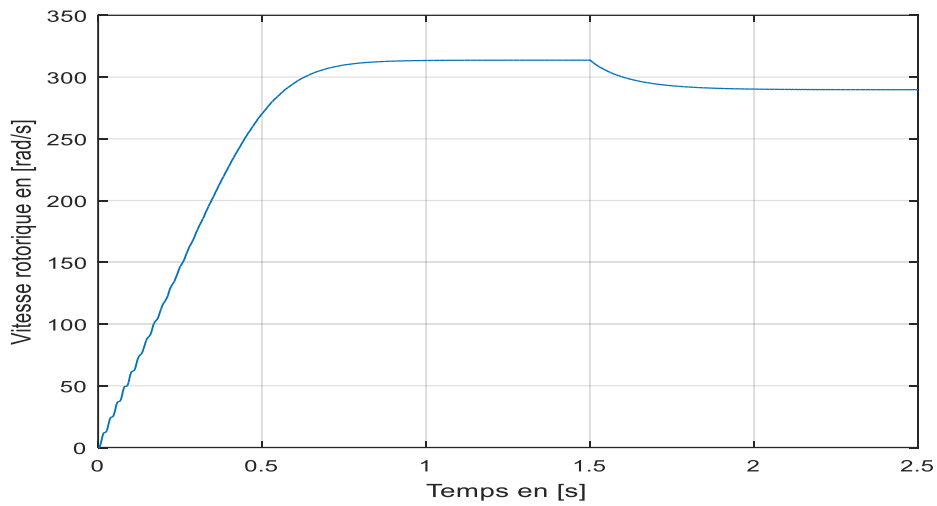


Figure III-22 : Vitesse de rotation à vide puis en charge.

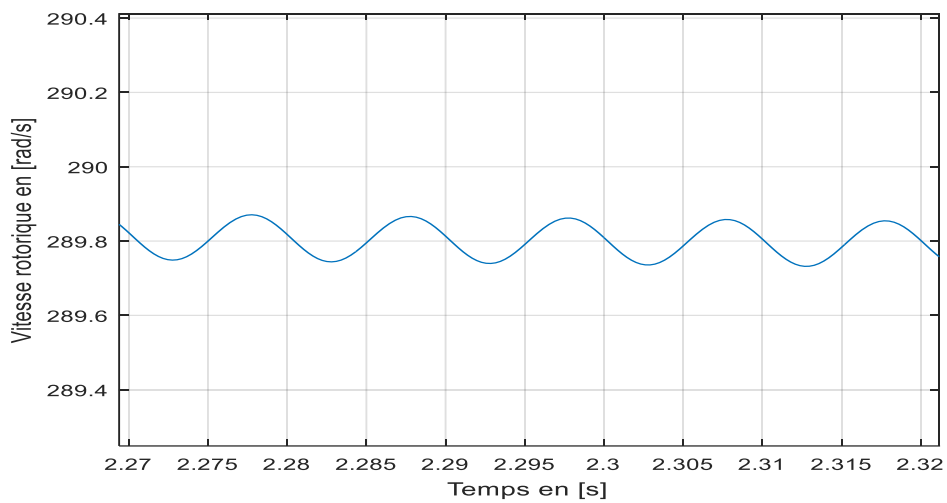


Figure III-23 : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent.

### III-2-2-1- Interprétation des résultats

Les figures III-16 et III-18 montrent l'évolution des courants statoriques dans les deux étoiles en fonction du temps, on remarque de fortes oscillations au démarrage démarrage et après l'introduction du couple résistant de 13,5 N.m a  $t=1.5s$  on constate une augmentation dans l'amplitude des courants qui traversent l'enroulement de la première étoile figure III-17 et à partir de la figure III-19, on voit que les courants de la deuxième étoile sont déséquilibrés avec de fortes amplitudes, donc des courants déséquilibrés induits au niveau du rotor figure III-20, ce qui engendre des ondulations en niveau du couple électromagnétique et on remarque aussi que la valeur du couple maximale a diminué de 120 N.m a 75 N.m et c'est ce que nous pouvons voir sur la figure III-21.

Après la visualisation de la courbe de vitesse figure III-22 le régime transitoire est le même comparé au cas précédent, après l'application de la charge a  $t=1.5s$  on voit que la vitesse a diminuée et d'après la figure III-23 on remarque de faibles pulsations avec de légères amplitudes au régime permanent en charge

### III-2-3 Perte d'une étoile

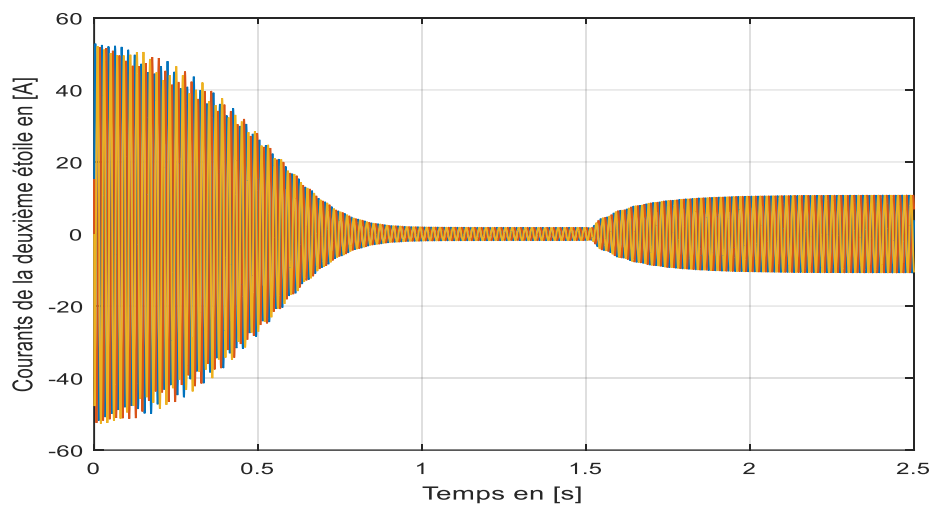


Figure III-24 : Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge.

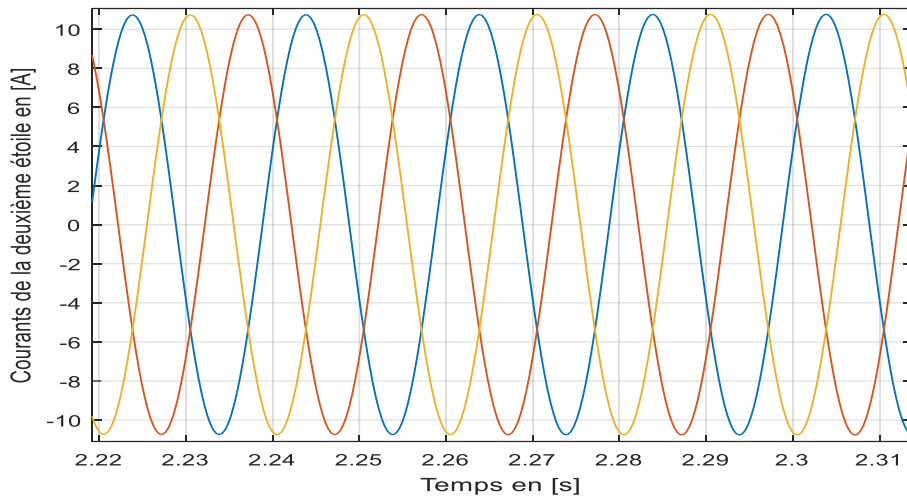


Figure III-25 : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent.

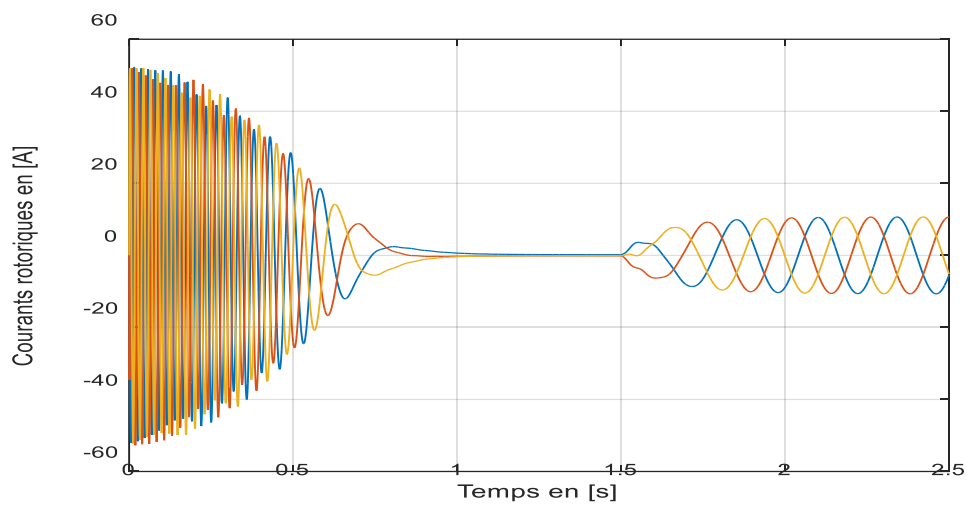


Figure III-26 : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.

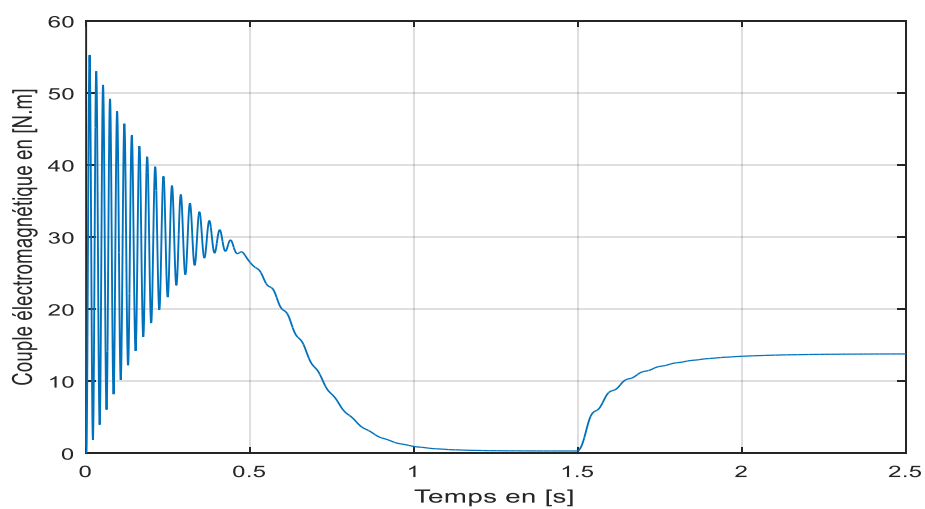


Figure III-27 : Couple électromagnétique à vide, puis en charge.

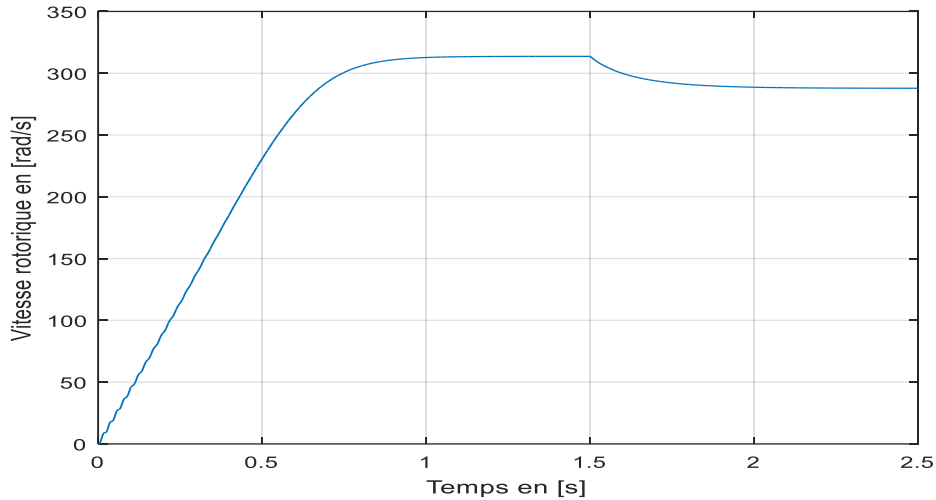


Figure III-28 : Vitesse de rotation à vide puis en charge.

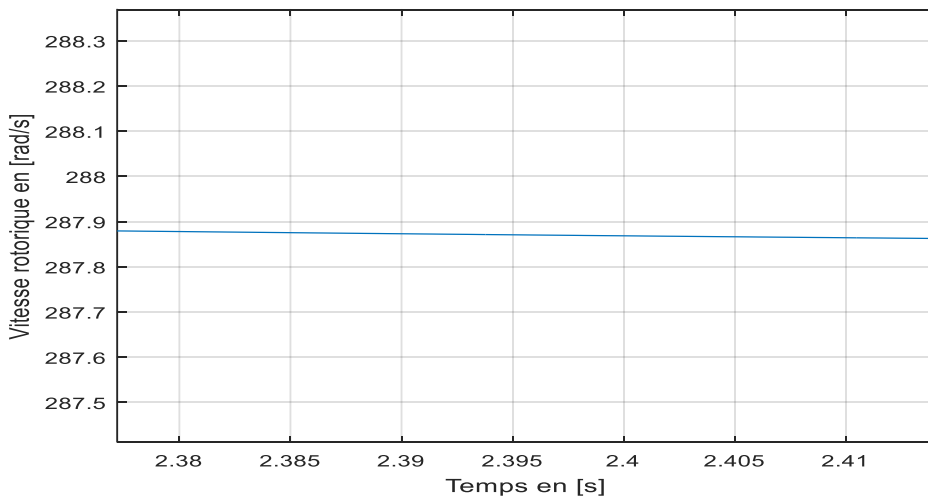


Figure III-29 : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent.

### III-2-3-1- Interprétation de résultats

Les figures III-24 et III-25 montrent l'évolution des courants statoriques de la deuxième étoile en fonction du temps, lors d'un démarrage à vide sous une tension nominale avec une alimentation sinusoïdale équilibrée.

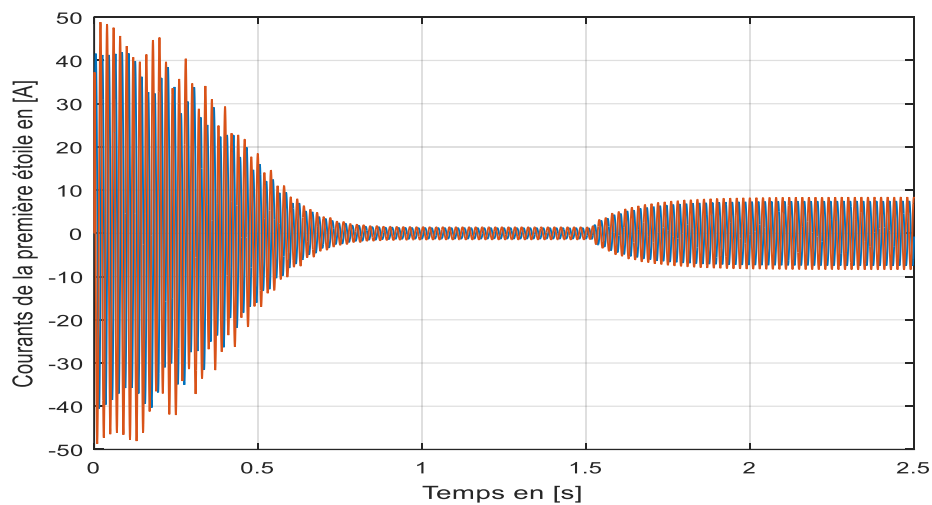
Dans ce cas la première étoile est annulée (perte d'une étoile), on remarque de grandes oscillations au niveau des courants statoriques, ces derniers durent approximativement 0.9s ce régime transitoire se manifeste par des amplitudes de courant qui atteignent des valeurs d'environ 7 ou 8 fois le courant nominal, leurs valeurs sont de l'ordre de 50 A , puis ces courants baissent pour atteindre une valeur de 3 A et qui représente le fonctionnement à vide, on remarque aussi dans ce

cas l'augmentation dans l'amplitude des courants qui traversent les enroulements de la deuxième étoile au régime permanent en charge, figure III-25, cette augmentation engendre des pertes Joules supplémentaires qui nuisent au rendement de la machine, on voit aussi que le régime transitoire est un peu long comparé au fonctionnement sain avec deux étoiles au stator.

La figure III-26 montre l'évolution des courants rotoriques en fonction du temps, au démarrage en remarque une diminution de l'amplitude des courants induits au rotor de 80A à 50A, et dans le régime permanent l'évolution des courants rotoriques est presque la même qu'au mode sain avec deux étoiles.

On remarque d'après la figure III-27 la diminution du couple électromagnétique développé par la machine de 120 N.m à 55 N.m et l'augmentation de temps du régime transitoire d'environ 0.9s qui est due au manque d'énergie fournie au démarrage par la source (perte d'une étoile) et pour ce qui est de la vitesse, une fois qu'elle atteint son régime permanent elle se stabilise à une valeur de 287.88 rd/s.

#### III-2-4- Perte de deux phases dans deux étoiles différentes



**Figure III-30:** Courants de la première étoile au démarrage, puis en charge.

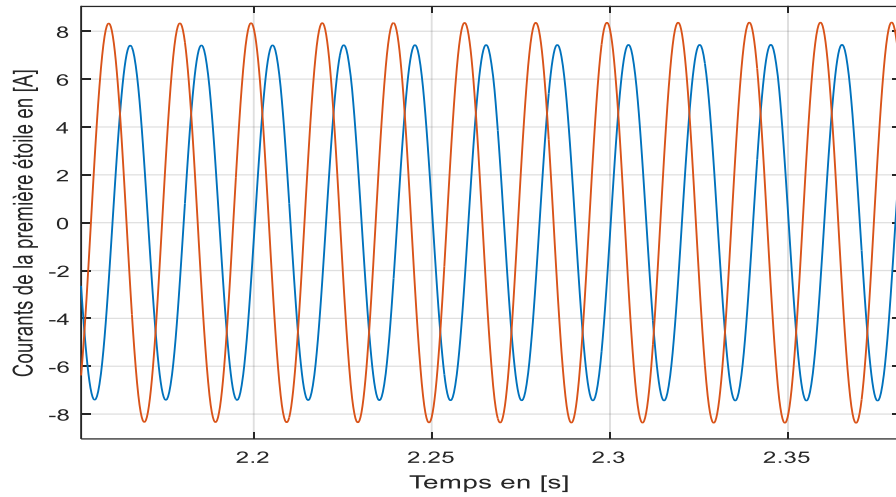


Figure III-31 : Zoom sur les courants statoriques de la première étoile en régime permanent.

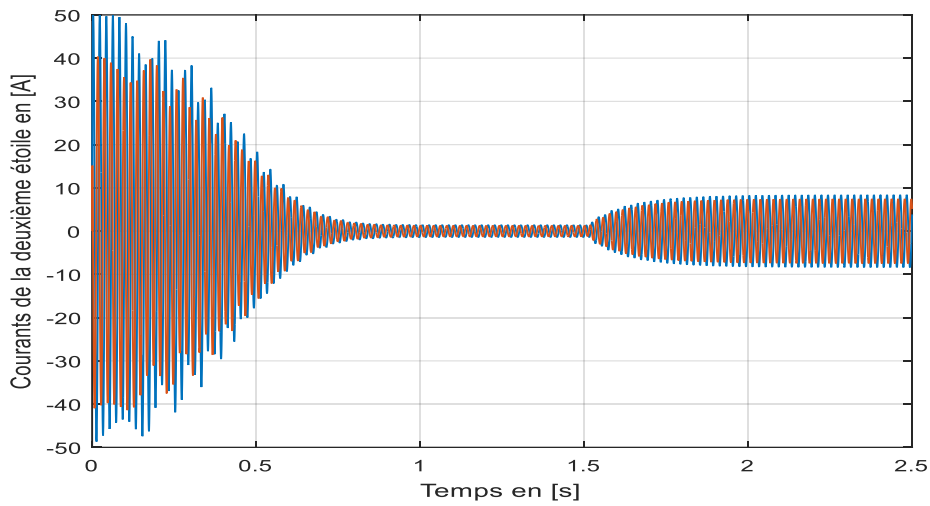


Figure III-32 : Courants de la deuxième étoile au démarrage, puis en charge.

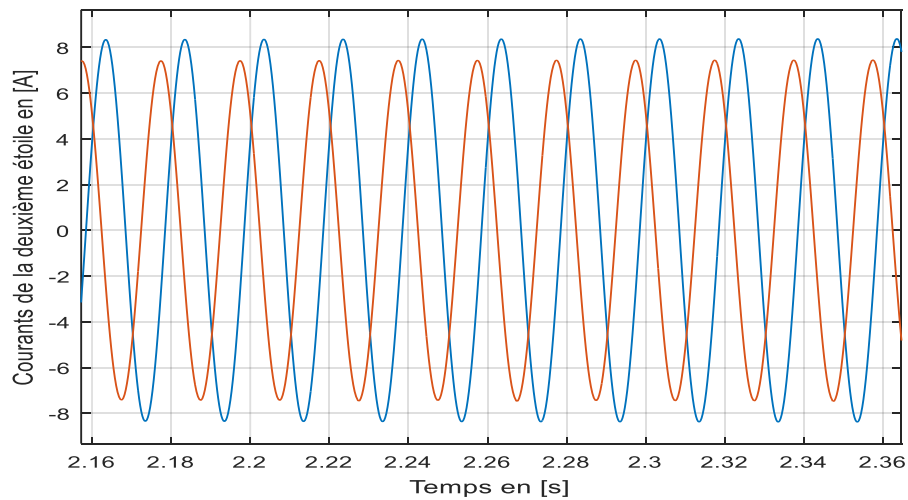


Figure III-33 : Zoom sur les courants statoriques de la deuxième étoile en régime permanent.

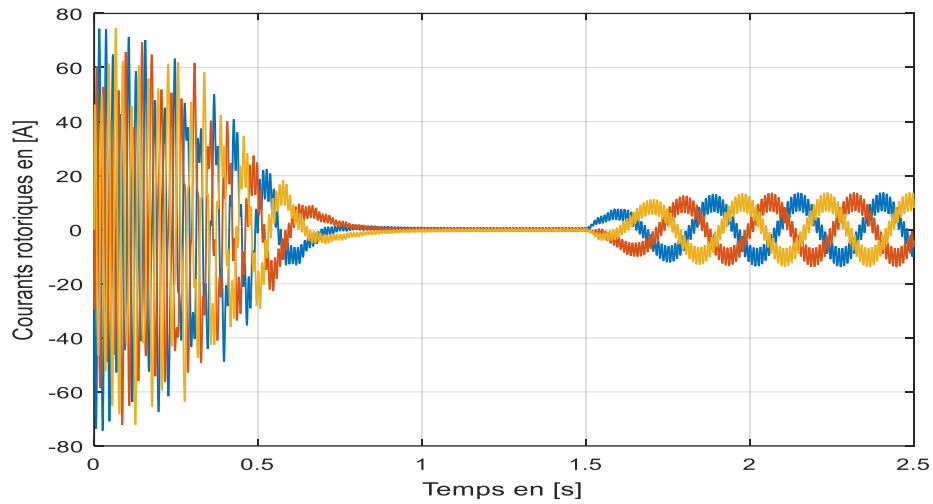


Figure III-34 : Courants rotoriques au démarrage puis en charge.

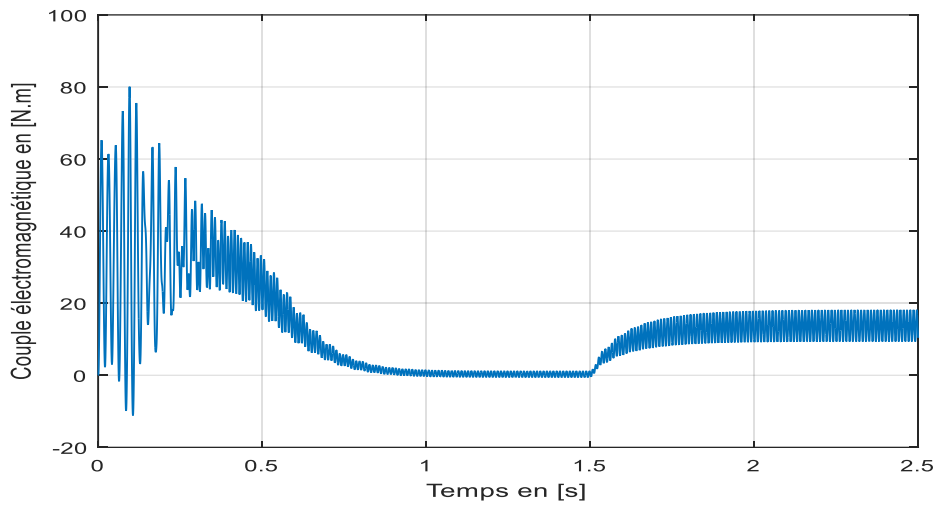


Figure III-35 : Couple électromagnétique à vide, puis en charge.

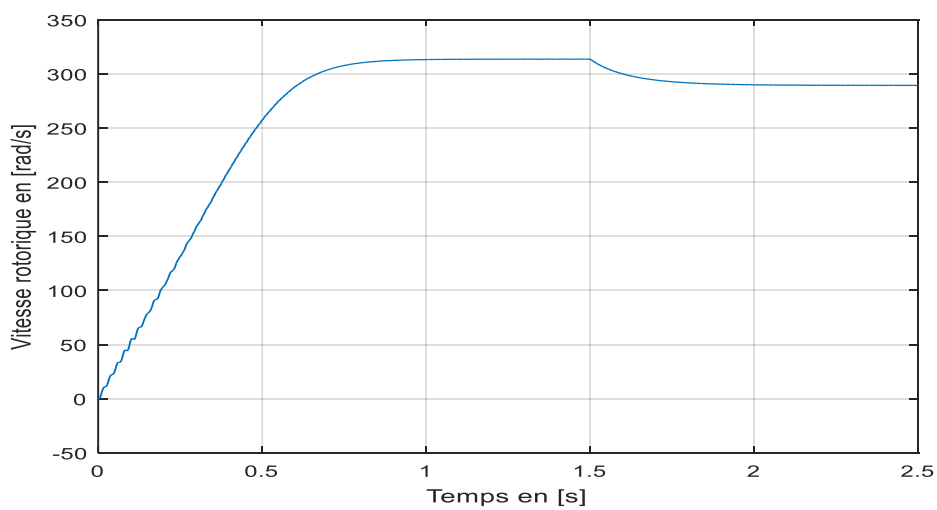


Figure III-36 : Vitesse de rotation à vide puis en charge.

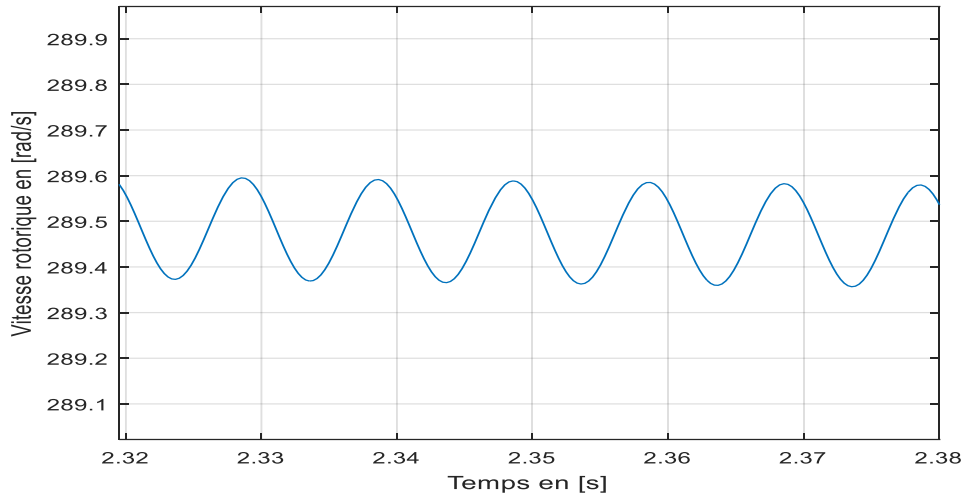


Figure III-37 : Zoom sur la courbe de la vitesse en régime permanent.

#### III-2-4-1- Interprétation des résultats

Dans ce cas de défauts on remarque une augmentation considérable dans l'amplitude des courants des deux étoiles au démarrage figures III-30 et III-32 qui atteint une valeur de 50A et aussi de forts courants déséquilibrés qui traversent les enroulements de ces dernières au régime permanent jusqu'à 8A figures III-31 et III-33 d'où l'apparition des courants induits pulsatoires de grande amplitude au niveau du rotor figure III-34.

La figure III-35 montre l'évolution du couple électromagnétique, on remarque une diminution de la valeur du couple développé par la machine jusqu'à 80 N.m au démarrage avec des pulsations importantes ce qui influe aussi sur la vitesse mécanique est traduit par des ondulations de grande amplitude au régime permanent figure III-37.

Après la visualisation des courbes des courants statoriques, rotoriques, vitesse et du couple électromagnétique de la machine à l'état sain et en défaut on peut ajouter à partir des cas précédemment cités que la perte d'une ou de deux phase dans la machine influe négativement sur les performances de cette dernière, en effet un seul défaut dans les phases statoriques engendre non seulement des pertes joules importantes à cause des grands courants qui traversent les enroulements, mais aussi des champs statoriques déséquilibrés, donc au niveau du rotor on aura un champ rotorique pulsatoire. La diminution du nombre de phases est traduite par une diminution du couple électromagnétique développée par la machine, un déséquilibre au niveau des champs statoriques et rotoriques et la diminution du couple électromagnétique, ce cas est forcément suivi par des ondulations de la vitesse mécanique et des vibrations importantes au niveau de la machine.

L'état de la machine après la perte d'une étoile est semblable à une machine triphasée à l'état sain surchargée, les courants statoriques ont une forme sinusoïdale équilibrée avec de grandes amplitudes, ainsi les courants rotoriques. Le couple électromagnétique développé par la machine a diminué presque de moitié de 120 N.m à 55 N.m avec un régime transitoire fortement pulsatoire et pour ce qui est de la vitesse de rotation on remarque que cette dernière a augmenté d'une façon moins linéaire comparée au mode sain avec deux étoiles au stator.

### **Conclusion**

À partir des figures et les résultats de simulation obtenues lors d'une étude de la machine asynchrone double étoile en régime sain et dégradé et si on fait une comparaison sur le comportement et l'évolutions des différentes grandeurs de la machine face à ces quatre cas de défauts on peut conclure que la perte de deux phases dans deux étoiles différentes est le défaut le plus sévère, contrairement aux machines triphasées la MASDE est une machine tolérante aux pannes, elle peut continuer son fonctionnement avec une ou deux phases et même avec une étoile en défaut.

# *Conclusion générale*

### Conclusion générale

La machine asynchrone tient une place très importante dans le monde industriel d'aujourd'hui grâce à sa robustesse et à sa simplicité de construction. Actuellement la structure polyphasée intéresse aussi bien le monde de la recherche que celui de l'industrie car bien qu'elle est plus couteuse que la structure triphasée elle présente plus de fiabilité et offre plus d'options pour la réalisation d'une commande tolérante aux défauts.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans la machine asynchrone double étoile à cage d'écureuil où nous avons choisi cette machine qui présente un bon compromis technico-économique.

Le premier chapitre a tout d'abord permis de positionner notre étude en dressant un état de l'art des principaux défauts pouvant intervenir dans la machine asynchrone où nous avons montré les causes de leurs apparitions ainsi que leurs impacts sur le comportement de la machine. Dans un second temps, nous avons décrit les méthodes utilisées dans la littérature pour la détection des défauts où nous nous sommes alors penchés plus particulièrement sur les méthodes basées sur l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables.

Le deuxième chapitre nous a permis d'améliorer et d'enrichir nos connaissances sur l'origine et l'intérêt de l'utilisation des machines multiphasées dans le domaine de grande puissance. Après nos efforts ont été consacrés à la modélisation de la MASDE, sachant qu'il existe plusieurs approches nous avons opté pour celle des circuits électriques magnétiques couplés (CEMC) car elle offre un compromis entre la précision et le temps de calcul. Les résultats trouvés confirment cette propriété comparativement à ceux obtenus par d'autres méthodes telle que l'approche par éléments finis. [10] La particularité de notre travail lors de la modélisation était de ne faire appel à aucun changement de variable, des modèles en régime sain ou en présence de défauts sont établis séparément pour la machine. Ces modèles sont mis en œuvre sous forme de programme sur le logiciel MATLAB.

Nous avons clôturé ce manuscrit par le troisième chapitre avec l'étude d'un système d'entraînement en envisageant les différents défauts pouvant surgir. Un modèle en vue de la simulation de la machine asynchrone double étoile avec des pertes de phases a été développé, les résultats obtenus se rapprochent du cas réel. L'introduction d'un défaut sur un point

## Conclusion générale

---

quelconque de la machine peut lui être fatale, la perte d'une ou plusieurs phases mène à des oscillations du couple et de la vitesse qui conduisent à des vibrations importantes au niveau de la machine, aussi l'augmentation des amplitudes des courants pouvant dépasser les valeurs de la plaque signalétique capables de déclencher la destruction en cascade des enroulements.

Nous avons aussi attesté les avantages procurés par la machine asynchrone double étoile par les diverses simulations en régime dégradé tel que la minimisation des ondulations, la diminution des amplitudes des courant et l'amélioration de la fiabilité en assurant un fonctionnement en mode dégradé.

Nous sommes conscients de n'avoir étudié que certains points d'un sujet très vaste, qui nécessitera une investigation plus poussée et une meilleure compréhension physique des phénomènes mis en jeu et l'utilisation d'outils appropriés. L'étude de la machine asynchrone double étoile est une introduction à l'étude des machines à plusieurs étoiles, il serait donc intéressant de se pencher sur le cas de la machine multi étoiles.

Ceci met terme à notre travail, espérant bien qu'il sera un début à d'autres travaux et servira de référence pour tous ceux qui veulent entamer des projets dans ce sens, afin d'en apporter des améliorations et contribuer à étendre ce sujet sur d'autres domaines.

# *Bibliographie*

- [1]. Allal. A « Grandeurs Non Invasives Pour Le Diagnostic Des Machines Asynchrones » Magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, année 2010.
- [2]. Gaouaoui. M «Diagnostic par reconnaissance des formes : application à la machine asynchrone » Mémoire de magister en automatique, UMMTO, année 2012.
- [3]. Kaikaa. M.Y « Modélisation de la machine asynchrone avec prise en compte de la non uniformité de l'entrefer. Application au diagnostic » Doctorat en électrotechnique, Université Mentouri Constantine, année 2010.
- [4]. Merabet. E et Belayali. A « Commande par la logique floue d'une machine asynchrone double stator » Mémoire d'ingénieur, Université Mohamed Boudiaf de M'sila, Juin 2005.
- [5]. Yahdou. A « Commande et observation par modes glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique » Magister en électrotechnique, UHBC Chlef, année 2011.
- [6]. Merad. R « outils de diagnostic appliqués à la machine asynchrone à cage d'écureuil, magister en électrotechnique option machine électrique » Université de Constantine, année 2005/2006.
- [7]. Lebaroud. A « Modélisation et techniques orientées vers le diagnostic de la machine asynchrone associée à des sources variables » Thèse de Doctorat, Université de Constantine Alegria, année 2006.
- [8]. Metatla A. Bahi T. Hadjadj I and Medoued. A « Failure detection of eccentricity in asynchronous machine International Conference of System and Computer » Cairo. Egypt 2008.
- [9]. D. Toumi « Détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone (cassure des barres et excentricité) » Mémoire de Magistère, Université Mohamed Boudiaf, Oran Avril 2002.
- [10]. Djouadi. A « Alimentation et commande d'une machine synchrone polyphasée en régime dégradé : application à la machine synchrone double étoile » Thèse magister en électrotechnique, UHBBC, année 2014.

- [11]. Rouaibla. R « Détection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrones » Magister en électronique, UBMA Annaba, année 2009.
- [12]. Amimeur. H « Contribution à la commande de la machine asynchrone double étoile par mode de glissement » Magister en électrotechnique, Université El Hadj Lakhdar Batna, année 2008.
- [13]. Lakhdari. M « Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénérateur » Magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, année 2014.
- [14]. Maouche. Y « Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : Application a la sureté de fonctionnement » Doctorat en électrotechnique, Université Mentouri Constantine, année 2015.
- [15]. Ben Sedrine. E « Machines à commutation de flux à grand nombre de phases : Modèles comportementaux en mode dégradé et élaboration d'une stratégie de commande en vue de l'amélioration de la tolérance aux pannes » Thèse de doctorat, l'école normale supérieure de Cachan, année 2014.
- [16]. Belhamdi. S « Prise en Compte D'un Défaut Rotorique Dans la Commande d'un Moteur Asynchrone » Thèse de Magister, Université Mohamed Khider Biskra, année 2005.
- [17]. Hamssas. K. E « Développement d'un nouveau modèle de la machine asynchrone pour la commande et la surveillance » Thèse de doctorat, Université Farhat Abbas Sétif, année 2006.
- [18]. Ghoggal. A « Diagnostic de machine asynchrone triphasée dédié à la détection des defaults » Mémoire de magister, Université de Batna, année 2005.
- [19]. Nekkrouche .M et Moussaoui.B « Modélisation des moteurs asynchrone polyphasées, dédiée au diagnostic de court-circuit inter-spires. Application aux pentaphasé et double étoile » Diplôme de docteur d'état, UMMTO, année 2008.
- [20]. Hellal .M et Ramdane .S, « Analyse des performances de la machine asynchrone sous défauts » Mémoire de fin d'étude Master, UMMTO, année 2017.

[21]. Iffouzar .K, « Étude et contrôle des machines asynchrones polyphasées en mode normal et dégradé. Application dans un système embarqué » Doctorat en électrotechnique, Université de Bejaia, année 2016.

# *Annexe*

### Paramètres de la machine asynchrone double étoile [21].

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	4.5 KW
Tension nominale	220 V
Vitesse nominale (synchronisme)	3000 tr/min
Fréquence nominale	50 Hz
Résistance d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	3.72 $\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	2.12 $\Omega$
Inductance de fuite d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	0.0022 H
Inductance de fuite d'une phase rotorique	0.0006 H
Inductance mutuelle cyclique stator-rotor	0.3672 H
Moment d'inertie	0.0625 Kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	0.001 N.m.s/rd
Nombre de paires de pôles	1 paire de pôles