

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique.
Option : Commande électrique.

Réf :

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Construction d'une base de données de
simulation sur le fonctionnement d'un MAS
avec défaut de court-circuit entre spires et
déséquilibre de tension**

Présenté par :
Zohir MESTOUR
Soutenu le : 03 Juillet 2019

Devant le jury compose de :

Mr. Hamid DERGHAL
Mr .Mohamed SAHRAOUI
Mr. Khaled YAHIA

MAA
MCA
Pr

Président
Encadreur
Examinateur

Année universitaire : 2018 / 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique.
Option : Commande électrique.

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Construction d'une base de données de
simulation sur le fonctionnement d'un MAS
avec défaut de court-circuit entre spires et
déséquilibre de tension**

Présenté par :

Zohir MESTOUR

Avis favorable del'encadreur :

Dr .Mohamed SAHRAOUI signature

Avis favorable du Président du Jur

Dr. Hamid DERGHAL

signature

Cachet et signature

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. La machine asynchrone à cage devient actuellement l'élément clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa robustesse et son faible coût. Malgré ces avantages, un certains nombres de contraintes de natures très différentes peuvent affecter la durée de vie de cette machine, en occasionnant des pertes économiques considérables.

L'objectif du présent travail est l'élaboration d'un modèle par la méthode des éléments finis. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous l'environnement du Logiciel Flux2D®. Ceci nous a permis de construire une base de données de simulation sur le fonctionnement d'un MAS à l'état sain et avec défaut de court-circuit entre spires ainsi que le défaut de déséquilibre de tension d'alimentation. Cette base de données a une grande importance pour nos futurs travaux puisqu'elle va nous aider pour tester les algorithmes proposés et développés pour la détection de tels défauts.

Ce travail contient trois parties :

- dans la première partie : on a modélisé et simulé le fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage pendant son fonctionnement sain.
- dans la deuxième partie : on a modélisé et simulé le fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage pendant son fonctionnement avec défaut de court-circuit entre spires statoriques.
- dans la troisième partie : on a construit une base de données sur le fonctionnement de cette machine pendant : -l'état sain (à 0%,25%,50%,75%,100% de la charge nominale) -l'état avec différent nombre de spires en court-circuit (à 0%,25%,50%,75%,100% de la charge nominale)-l'état avec déséquilibre de tensions d'alimentation (à 0%,25%,50%,75%,100% de la charge nominale).

Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, base de données, diagnostic

ملخص:

هذا العمل جزء من تشخيص العيوب في المحركات غير المتزامنة ثلاث مراحل قفص. أصبحت آلة القفص غير المتزامن حاليًا العنصر الرئيسي لمعظم المعدات الصناعية بسبب متانتها وتكلفتها المنخفضة. على الرغم من هذه المزايا ، يمكن أن يؤثر عدد من القيود ذات الطبيعة المختلفة جدًا على عمر هذه الآلة ، مما يتسبب في خسائر اقتصادية كبيرة.

الهدف من هذا العمل هو تطوير نموذج من خلال طريقة العناصر المحددة. تم إجراء النمذجة والمحاكاة في بيئة برنامج حالة صحية ومع فشل دائرة قصر بين المنعطفات MAS هذا سمح لنا ببناء قاعدة بيانات محاكاة على تشغيل Flux2D®. وكذلك عدم وجود خلل في إمدادات التيار الكهربائي. تعد قاعدة البيانات هذه ذات أهمية كبيرة لعملنا المستقبلي لأنها ستساعدنا في اختبار الخوارزميات المقترحة والمطورة للكشف عن مثل هذه العيوب. يحتوي هذا العمل على ثلاثة أجزاء:

في الجزء الأول: قمنا بتصميم ومحاكاة تشغيل محرك قفص غير متزامن أثناء تشغيله بشكل صحي في الجزء الثاني: قمنا بنمذجة ومحاكاة تشغيل محرك قفص غير متزامن أثناء تشغيله مع خطأ في الدائرة القصيرة بين لفات الجزء الثابت .

في الجزء الثالث: تم بناء قاعدة بيانات على تشغيل هذا الجهاز خلال: - الحالة الصحية (عند 0 % ، 25 % ، 50 % ، 75 % ، 100 % من الحمل الاسمي) - الحالة مع عدد مختلف من المنعطفات ذات دائرة قصيرة (عند 0 % ، 25 % ، 50 % ، 75 % ، 100 % من الحمل المقتن) - الحالة مع الفولتية غير المتوازنة (عند 0 % ، 25 % ، 50 % ، 75 % ، 100 % من الحمل المقتن).

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة ، طريقة العناصر المحددة ، قاعدة البيانات ، التشخيص

Dédicace

A mes chers parents

A mes frères

A mes sœurs

A tout ma Famille et mes cher Amis



REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sien du département de Génie Electrique d'Université Mohamed Khider Biskra. J'adresse mes respectueux remerciements à :

- Monsieur SAHRAOUI Mohamed, mon encadreur qui nous avoir confié ce projet et dirigé dans son élaboration jusqu'au bout.*
- Monsieur Khaled Laadjel pour le soutien qui nous a apporté pendant la période de réalisation de ce modeste travail ainsi pour ses conseils précieux et surtout pour la totale confiance qui nous a accordée.*
- Tous les membres de jury qui nous ont l'honneur de juger notre travail.*

Et en fin nous tenons vivement à remercier tous nos ami(e)s, chacun à son nom.

CHAPITRE II Simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis

II.1. Introduction	12
II.2. la méthode des éléments finis	12
II.2.1. Equations de maxwell et lois de comportement	13
II.2.2. Le modèle employé	14
II.2.2.1. Le mode magnétostatique	14
II.2.2.2. Le mode magnétodynamique	15
II.2.2.3. Le mode magnétique transitoire.....	15
II.3. Principe de la méthode des éléments finis	16
II.4. Présentation du logiciel FLUX 2d	17
II.5. Application à la simulation de la machine asynchrone	19
II.5.1. Les données de la machine étudiée	19
II.5.2. Procédure de construction du modèle par FLUX 2D.....	21
II.6. Conclusion	26

CHAPITRE III Résultats de simulation de la MAS

III.1. Introduction	27
III.2. Résultats de simulation	27
III.2.1. Etat sain et déséquilibre de tension d'alimentation	27
III.2.2. Etat sain et court-circuit entre spires statoriques.....	29
III.3. Analyse Spectrale du Courant Statorique	32
III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide	32
III.4. Analyse et comparaison	35
III.5. Conclusion	36

Liste des tableaux

Chapitre II	Modélisation de la machine asynchrone triphasée à cage à l'état sain
Tableau. II.1.	Les paramètres et son valeurs la machine asynchrone étudiée.....20
Chapitre III	Résultats de simulation de la MAS
Tableau. III.1.	L'évaluation des raies 3kfs en fonction de la charge.....34

Liste des figures

Chapitre I	Etat de l'art de la machine asynchrone	
Fig. I.1	Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurueil.....	04
Fig. I.2	Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles.....	05
Fig. I.3	Rotor à cage d'écurueil.....	05
Fig. I.4	Pourcentage des défauts 2008.....	06
Fig. I.5	Géométrie du roulement à billes.....	08
Chapitre II	Simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis	
Fig. II.1	Fonction d'interpolation d'un élément	17
Fig. II.2	Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	18
Fig. II.3	les dimensions de la machine.....	19
Fig. II.4	Bobinage statorique.....	20
Fig. II.5	circuit magnétique de la MAS.....	21
Fig. II.6	répartition du maillage.....	23
Fig. II.7	la courbe d'aimantation B (H) du matériau ferromagnétique.....	24
Fig. II.8	le circuit électrique d'alimentation.....	24
Fig. II.9	Circuit équivalent de la cage rotorique.....	25
Chapitre III	Résultats de simulation de la MAS	
Fig. III.1	les courants statoriques en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5%.....	28
Fig. III.2	les tensions d'alimentation en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5%...28	
Fig. III.3	la vitesse de rotation en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5%	28
Fig. III.4	le couple en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5%.....	29
Fig. III.5	Représentation un court-circuit entre 6spires dans la phase B.....	29

Fig. III.6 : les courants statoriques en pleine charge.(a) état sain ;(b) crt-crct entre 6 spires..30

Fig. III.7 : les tensions en pleine charge.(a) état sain ;(b) crt-crct entre 6 spires.....30

Fig. III.8 : la vitesse en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires31

Fig. III.9 : le couple en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires.....31

Fig. III.10 : Représentation temporelle vers fréquentielle.....32

Fig. III.11 : Spectre du courant statorique en Mi-charge à l'état sain et avec déséquilibre 5%
6spires en court-circuit (visualisation la fréquence 50 Hz).....33

Fig. III.12 : Spectre du courant statorique en Mi-charge à l'état sain et avec déséquilibre 5%
6spires en court-circuit (visualisation l'harmonique 150 Hz).....33

Fig. III.13 : Evolution des amplitudes des 3kfs en fonction de la charge.....35

Liste des symboles

f_{he}	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
f_s	: Fréquence de tension d'alimentation.
f_{st}	: Fréquence des harmoniques d'encoches rotoriques.
N_b	: Nombre des barres rotoriques.
P	: Nombre de paires de pôles.
$n_{\omega s}$: Ordre des harmoniques de temps de la FMM.
g	: Glissement.
n	: Fonction de distribution.
ωs	: Pulsation statorique.
\vec{H}	: Champ magnétique.
\vec{E}	: Champ électrique.
\vec{B}	: Induction magnétique.
\vec{B}_r	: Induction rémanente des aimants.
\vec{D}	: Induction électrique.
\vec{A}	: Vecteur potentiel magnétique
\vec{J}_c	: Densité de courant de conduction.
\vec{J}	: Densité de courant totale.
μ	: Perméabilité magnétique.
ρ	: Charges électriques.
σ	: Conductibilité électrique
ν	: Réflectivité magnétique.
ϵ	: Permittivité électrique.
ω	: Pulsation électrique

*Introduction
générale*

Introduction Générale

La machine asynchrone spécialement le moteur asynchrone joue un rôle important dans le domaine de la conversion de l'énergie électromécanique. Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation, du temps minime d'entretien, de sa robustesse et de son faible coût d'achat. Cependant, cette machine est soumise de plus en plus à des contraintes sévères d'origine électrique, thermique et mécanique qui peuvent provoquer l'apparition des défauts conduisant à la défaillance de la machine et par conséquent à des arrêts imprévus.

Les défauts qui apparaissent dans la machine asynchrone ont des causes variées. Ils peuvent être dus au vieillissement des constituants du moteur ou bien aux conditions d'utilisation ou tout simplement à un défaut de fabrication dont l'effet serait imperceptible lors de la mise en service. Tous ces défauts (usure des paliers, engrenages, déséquilibre de tension, court circuit statorique, etc...) ont été largement traités dans la littérature et sont aujourd'hui bien connus. Malheureusement, la détection de certains défauts tels que le court-circuit entre spires statoriques reste un défi et un thème de recherche préféré pour les chercheurs électrotechniciens. Ceci est dû principalement au fait que ce défaut apparaît soudainement entre quelques spires puis il se développe rapidement conduisant à une destruction totale du bobinage statorique. De plus, les symptômes de ce défaut sont très similaires à ceux dus à un défaut de déséquilibre de tension d'alimentation. Donc, la distinction entre ces deux défauts reste aussi un grand problème posé à la recherche.

La première des choses pour trouver une solution à ce problème consiste à comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone pendant l'état sain et avec défaut de court-circuit entre spires ou déséquilibre de tension d'alimentation. Ceci ne peut être effectué qu'à partir d'une bonne modélisation de cette machine. En fait, la modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs méthodes de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres.

Dans ce travail on va utiliser la méthode de calcul par éléments finis sous l'environnement FLUX 2d. Ce logiciel permet de modélisation de la machine asynchrone par l'utilisation de la technique de circuits couplés, c'est-à-dire le couplage entre le circuit

magnétique et le circuit électrique. L'objectif est de construire une base de donnée sur le fonctionnement de cette machine à l'état sain puis avec défaut de court-circuit entre différent nombre de spires statoriques et enfin pendant un déséquilibre de tension. Cette base de donnée a une grande importance pour notre équipe de recherche, puisqu'elle permet de tester les algorithmes de détection des défauts sous différentes conditions de fonctionnement de la machine asynchrone.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone, leurs origines, ainsi que leurs signatures spectrales sur le courant statoriques. Nous présenterons par la suite, les différentes techniques utilisées pour la détection des défauts, ainsi que les approches utilisées pour la modélisation de la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel Flux 2D et la modélisation par de la méthode des éléments finis.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, à l'état sain et avec des défauts (court-circuit entre spire et déséquilibre de tension d'alimentation).et nous présenterons l'analyse spectral du courant statorique (à l'aide de la transformée de Fourier rapide) en suite nous allons étudier l'impact de ces défauts sur l'amplitude de l'harmonique 3fs sous différentes charges.

Chapitre I

**État de l'art
de la
MAS**

I.1 Introduction

Le diagnostic fait partie de la surveillance, qui a pour objectif de trouver la cause d'anomalie. Celui des machines électriques devient de plus en plus une exigence car les chaînes de production nécessitent un fonctionnement sûr. Ces dernières doivent être dotées de systèmes de production fiables parce que l'apparition d'un défaut conduit le plus souvent à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise, sans oublier la perte de production occasionnée et peut aussi mener à un dommage matériel ou corporel inévitable. C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, à l'échelle internationale, s'emploie à élaborer des méthodes efficaces de diagnostic.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements.

Le stator est fixe : on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux mêmes en permanence. On définit deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

Dans ce travail, nous nous intéressant à la machine asynchrone à cage [BOU 07]. Les éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil sont illustrés dans la figure (I.1).

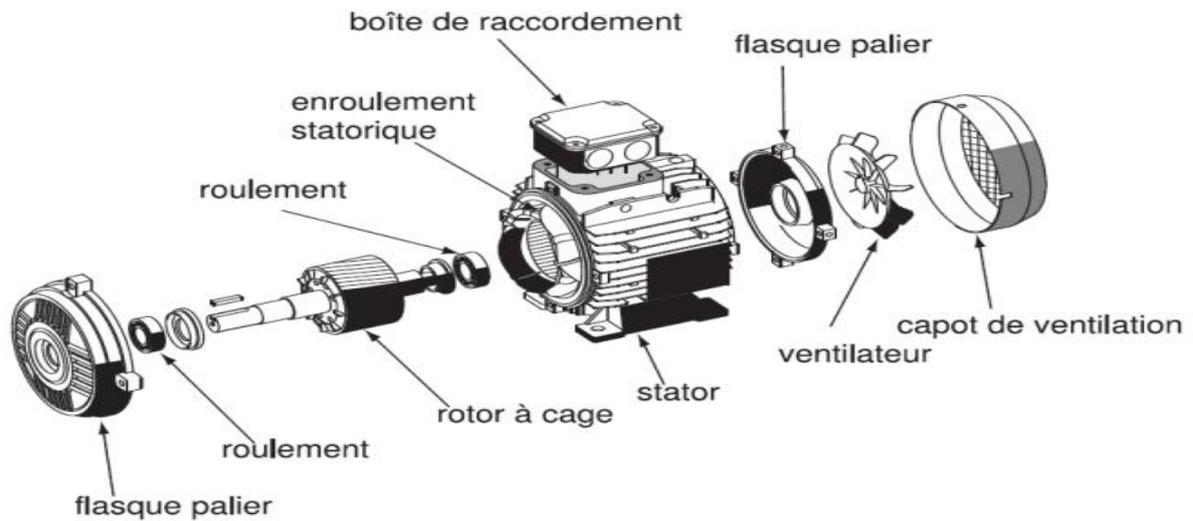


Figure .I.1 Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [BEN 03].

I.2.1 Le stator :

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine figure (I.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines [OND 06].

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

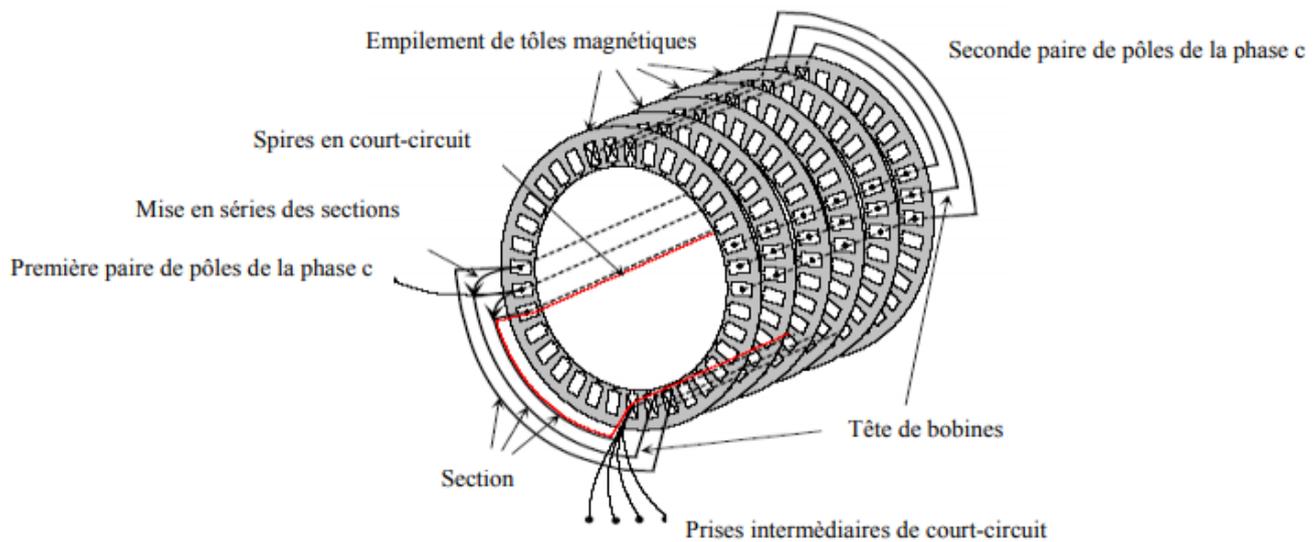


Figure .I.2 Enroulements statoriques d'une phase d'une machine à 4 pôles [SCH 99].

I.2.2 Le Rotor :

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches peuvent être semi-ouvertes ou fermées. Les enroulements sont constitués de barres court-circuitées par un anneau terminal placé à chaque extrémité du rotor. Les conducteurs sont généralement réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre ou d'aluminium (Figure I.3). Leur résistance est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [KHO 07].

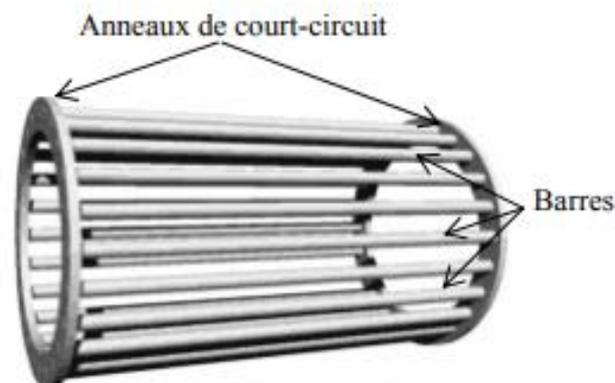


Figure .I.3 Rotor à cage d'écureuil [KHO 07]

I.2.3 Les organes mécaniques :

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance. [BOU 10]

I.3 Étude statistique des différents défauts de MAS:

De multiples études statistiques sur les défauts dans les machines asynchrones de moyenne et grande puissance ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à nos jours. Par exemple, une étude statistique effectuée en 2008 par A. H. Bonnette sur les défauts de la machine asynchrone a donné les résultats sur la figure 1.4.

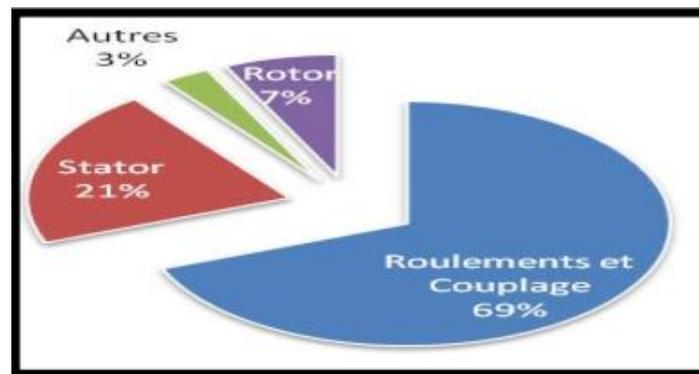


Figure 1.4 Pourcentage des défauts 2008 [DID 04]

D'après cette étude, il est clair que les défauts mécaniques sont les plus rencontrés. Ceci peut justifier le taux élevé des pannes suite aux dégradations des roulements. Par conséquent leur surveillance et leur maintenance s'avèrent indispensables.

I.4 Les défaillances dans la machine asynchrone

I.4.1 Les défauts statoriques :

Les plus récurrents sont : court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phase et armature, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique. La plupart des défauts statoriques sont dues à la dégradation d'isolants. Généralement, cette dégradation est provoquée par :

- Vieillissement naturel des isolants.
- Échauffement excessif du circuit magnétique.
- Surintensité à cause d'une surcharge ou défaut du convertisseur,
- Pic de tension supérieure à la limite de rigidité du matériau d'isolation.
- Fuites dans les systèmes de refroidissement.

I.4.2 Les défauts rotoriques :

Les défauts rotoriques les plus répétitifs sont : l'excentricité statique et/ou dynamique, la rupture de barres rotoriques et la rupture d'une portion d'anneau de court-circuit [CHA 17].

Ce type de défaut prend naissance à cause des contraintes :

- Thermique (surcharge, ...).
- Electromagnétique (force en $B^2(t)$...).
- Dynamique (arbre de transmission, ...).

I.4.3 Défauts de roulements :

Ce type de défaut est le plus fréquent, il est généralement dû à l'usure des bagues intérieure et extérieure ainsi que la dégradation des la cage à billes. Les causes possible de ces défauts sont : un mauvais montage, vibrations excessives, température de fonctionnement élevée... . (Figure I.5).

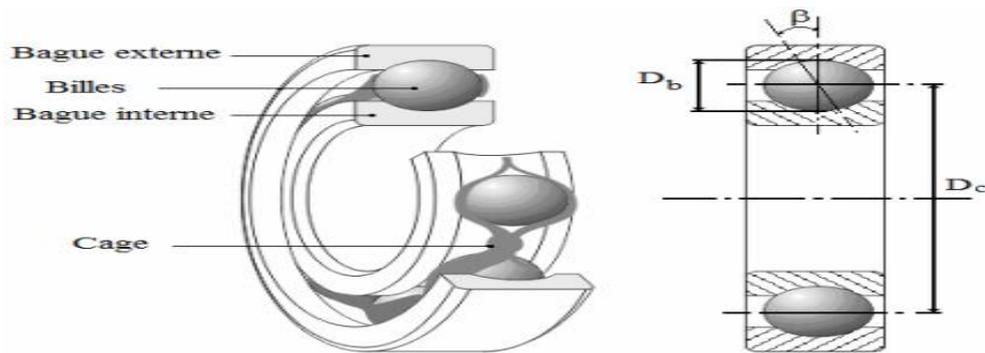


Figure .I.5 Géométrie du roulement à billes [CHA 17].

I.5 Présentation des différentes méthodes de diagnostic:

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses et variées car elles correspondent à la diversité des problèmes rencontrés. En effet, il existe deux approches : Approche Modèle et Approche Signal [SAH 10].

I.5.1 Approche modèle

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement. Dans le cas de la machine asynchrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire, [BAC 02]. L'analyse du résidu entre les états calculés et mesurés peut donner des informations pertinentes sur l'état de la machine. Selon cette approche, on distingue :

- Le diagnostic par les observateurs.
- Le diagnostic par estimation paramétrique.

I.5.2 Approche Signal

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. D'après la littérature, les principaux signaux utilisés sont les suivants :

- Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite.
- Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique.
- Diagnostic par l'analyse du courant statorique.
- Diagnostic par l'analyse vibratoire.

I.6 Méthode de modélisation de la machine asynchrone

Pour modéliser la machine asynchrone, on peut utiliser le modèle simple de Park. Cependant, les hypothèses simplificatrices par exemple : la tension d'alimentation est purement sinusoïdale, l'entrefer est lisse, la perméabilité du fer est infinie et la FMM (ou bien l'induction B) dans l'entrefer est sinusoïdale...etc. Ces hypothèses simplificatrices sont acceptées seulement pour étudier le principe de fonctionnement de la MAS mais, elles ne sont pas applicables pour les problèmes de diagnostic où se trouve une dissymétrie. Donc, on est besoin d'une méthode de modélisation fine qui prend en considération tous les propriétés géométriques et magnétiques de la machine asynchrone avec. Parmi ces méthodes, on peut citer : la méthode analytique multi-enroulement, la méthode des réseaux de perméances et la méthode des éléments finis.

I.6.1 Méthode des éléments finis [DID 04.BAZ 09]

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode des éléments finis pour modéliser un moteur asynchrone à cage. La modélisation et la simulation seront effectuées sous l'environnement FLUX 2D. Le modèle obtenu va permettre, d'une part, d'étudier le fonctionnement de cette machine à l'état sain, et d'une autre part, d'étudier l'impact des défauts de court-circuit entre spires statoriques et le déséquilibre des tensions d'alimentation sur les grandeurs électriques et magnétique de cette machine.

La modélisation par éléments finis est basée sur découpage du circuit magnétique de la machine en plusieurs éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré linéaire sur les surfaces correspondantes. Cette méthode prend en compte la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques.

Dans le domaine du diagnostic des machines asynchrones, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les impacts locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine. A titre d'exemple et dans ce travail, la méthode des éléments

finis sert à étudier les effets du défaut de court-circuit inter spires sur les grandeurs mesurables tels que les courants, les tensions et le couple électromagnétique.

Noter bien que la considération du comportement électromagnétique local permet d'avoir une modélisation plus fine du moteur. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

I.7 Signatures spectrales pour révéler les défauts

En réalité, l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, elle est fonction de différents paramètres, tel que les composantes fréquentielles apparaissent dans les tensions d'alimentation ces composantes dites harmoniques de temps et la disposition du bobinage statorique et de la structure de la cage rotorique dans le cas des moteurs à cage. A cause de cette structure, Il a été démontré qu'en plus de l'harmonique fondamental, apparaissent dans le spectre du courant statorique d'autres harmoniques dites harmoniques d'espace (harmoniques d'encoches rotoriques) ayant pour fréquences [GHO 05].

$$f_{he} = \left[\frac{kN_b}{p} (1 - g) \pm n_{\omega s} \right] \cdot f_s \quad (\text{I.1})$$

Avec f_s la fréquence de tension d'alimentation, ($n_{\omega s} \pm = 1, \pm 3, \pm 5, \dots$), p le nombre de paires de pôles, N_b le nombre des barres rotoriques, $n_{\omega s}$ l'ordre des harmoniques de temps de la tension, et k un entier positif. Pour $k=1$ et $n_{\omega s} = 1$ on définit ce qui sont appelés « les harmoniques d'encoches principales (PSH) ».

I.7.1 Les défauts de court-circuit inter spires :

Pour détecter les défauts de court-circuit inter spires, plusieurs approches ont été mises en œuvre, à savoir l'utilisation d'une bobine concentrique placée autour de l'arbre de la machine afin de capter puis analyser le flux axial de la machine. Ce type de défauts entraîne l'apparition d'une série d'harmoniques dans le spectre du flux axial donnée par [GHO 05, KHE 12] :

$$f_{st} = f_s \cdot \left(k \pm \frac{n(1-g)}{p} \right) \quad (I.2)$$

Avec $k=1,3$ et $n=1, 2,3,\dots (2p-1)$.

Le diagnostic des courts-circuits statoriques peut être effectué via la MCSA, et est basé sur la détection des composantes fréquentielles données par l'expression (I.2), du fait que cette onde de flux tournant sera l'origine des composantes de courant équivalentes dans l'enroulement statorique [GHO 05, KHE 12].

Les harmoniques 150Hz, 250Hz...apparaissent en cas de court-circuit entre spires, mais sont souvent présents à cause de la saturation et de n'importe quel défaut susceptible d'entraîner un déséquilibre d'impédance, tel que le déséquilibre de tension. Aussi, il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques et de saturation subissent des variations en cas de défauts statoriques [GHO 05].

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques rappels sur la constitution de la machine asynchrone en citant en premier lieu les différentes parties qui la composent : les deux bobinages statorique et rotorique, ensuite nous avons présenté les principaux défauts qui peuvent altérer le fonctionnement normal de la machine ainsi que les causes probables.

Nous avons montré aussi que la présence d'un défaut dans la machine implique toujours une modification de sa topologie, pour cela, le développement d'un modèle dynamique, flexible et prenant en considération la géométrie de la machine s'est avéré très important, sa description fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II

**Simulation de la machine
Asynchrone par la
Méthode des éléments
finis**

II.1 Introduction

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait parâtre plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié [BAZ 09]

Parmi les méthodes qui sont basées sur la théorie du champ électromagnétique on trouve la méthode des éléments finis. Cette dernière sera notre outil pour élaborer un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone.

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans, les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul d'où une grande souplesse d'utilisation [ZOR 10].

II.2 la méthode des éléments finis

Cette méthode est basée sur la résolution numérique des équations de Maxwell. Les informations fournies par ce type de simulation sont d'une grande précision et elles nous apportent la prise en compte de la géométrie de la machine, la saturation des matériaux magnétiques, ainsi que l'effet de peau dans les barres rotoriques, lorsque le problème est correctement posé (géométrie, physique, lien avec les équations de circuit...) et que l'on utilise le mode de résolution adéquate (magnétostatique, magnétodynamique, magnétique évolutif). D'autre part, d'un point de la machine (fréquence et flux magnétisant), en modifiant, directement, les paramètres dans le programme du calcul (Logiciel) d'où une grande souplesse d'utilisation [MAB 17].

II.2.1 Equations de maxwell et lois de comportement

Dans les machines électriques, les équations qui régissent le champ électromagnétique sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. On les définit comme suit: [ZOR 10].

- Les relations de couplage électromagnétique :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

- Les relations de la conservation des flux :

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

- La relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.6})$$

- La relation de la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

Où

\vec{H} : Champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

\vec{B} : Induction magnétique (T)

\vec{B}_r : Induction rémanente des aimants (T)

\vec{j} : Densité de courant totale (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$)

II.2.2 Le modèle employé

Selon les résultats escomptés et le temps de simulation dont on dispose, trois modes de résolutions peuvent être employé :

II.2.2.1 Le mode magnétostatique

Ce mode ne pourra donc être utilisé que pour simuler un instant donné d'un fonctionnement essentiellement à vide (sans courant induits) de la machine car il impose de connaître les valeurs des courants dans les différentes barres du rotor. On s'en servira essentiellement pour la détermination de l'inductance magnétisante du moteur. Dans ce mode les sources sont indépendantes du temps.

Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$

Par conséquent, les équations du modèle deviennent :

$$\overrightarrow{\text{rot}}\vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{II.9})$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.10})$$

La condition (II.9) permet de définir une fonction en vecteur potentiel \mathbf{A} telle que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A} \quad (\text{II.11})$$

Pour que \mathbf{A} soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute $\text{div}(\mathbf{A}) = 0$ alors la condition appelée jauge de **Coulomb** .Qui vérifiée automatiquement l'unicité de la solution

Par la substitution de (II.11) et (II.10) dans (II.8) nous obtenons l'équation électromagnétique en magnétostatique, exprimée par le système d'équations suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v \cdot \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}) = \vec{J} + \overrightarrow{\text{rot}}(v \cdot \vec{B}) \quad (\text{II.12})$$

Où $v = 1/\mu$: est la réflectivité magnétique.

II.2.2.2 Le mode magnétodynamique

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension variant en fonction du temps

Le terme $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$ n'est pas nul.

Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simuler en régime permanent. Ce qui permet d'obtenir des valeurs convenables du courant efficace. Ce mode pourra être utilisé pour étudier un schéma équivalent de la machine.

Le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v. \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}) + J\omega \sigma\vec{A} = \vec{j} \quad (\text{II.13})$$

$\omega=2\pi f$: pulsation électrique (rad. s^{-1}), j : unité imaginaire ($i^2 = -1$)

II. 2.2.3 Le mode magnétique transitoire

Est le plus complet. Il traduit fidèlement la rotation du moteur. Dans ce cas l'alimentation est en courant transitoire, le traitement du système précédent des équations caractéristiques, nécessite une discrétisation pas à pas dans le temps.

Donc le système à résoudre est le suivant :

$$\overrightarrow{\text{rot}}(v. \overrightarrow{\text{rot}}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \overrightarrow{\text{rot}}\vec{B}_r + \sigma \overrightarrow{\text{grad}}V = \mathbf{0} \quad (\text{II.14})$$

II.3 Principe de la méthode des éléments finis

Le principe fondamental de la méthode des éléments finis réside dans le découpage du domaine d'étude en domaines élémentaires de dimension finie. Sur chaque domaine appelé élément fini, Le vecteur potentiel, dans un élément de découpage peut être approchée par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes), dont l'expression varie d'un type à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [BEL 04].

Pour élément triangulaire on a :

$$A_c(x, y) = a + bx + cy \quad (\text{II.15})$$

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$A_c(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.16})$$

Les constantes a b c et d sont à déterminer. Le potentiel A_e est en générale non nul dans l'élément et nul ailleurs.

La valeur approchée du potentiel dans un point du domaine (Ω) de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e(x, y) \quad (\text{II.17})$$

e : Numéro d'élément.

ne : Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).

Le potentiel en tous points d'un élément ainsi que la densité de courant sont parfaitement définis par les valeurs des potentiels de ses trois sommets (Fig. II-1).

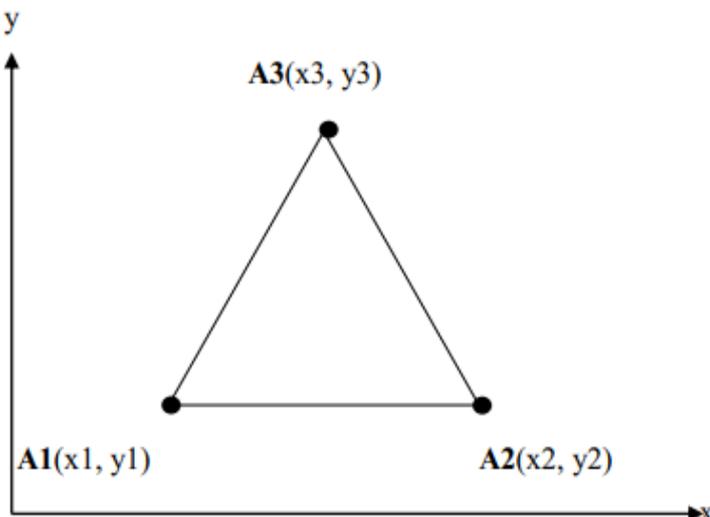


Figure II. 1: Fonction d'interpolation d'un élément.

II.4 Présentation du logiciel FLUX 2d

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite " bande de roulement " pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage.

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [ZOR 10]:

➤ Module pré-processeur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

➤ **Module processeur**

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

➤ **Module post-processeur (PostPro_2D)**

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc. [ZOR 10]

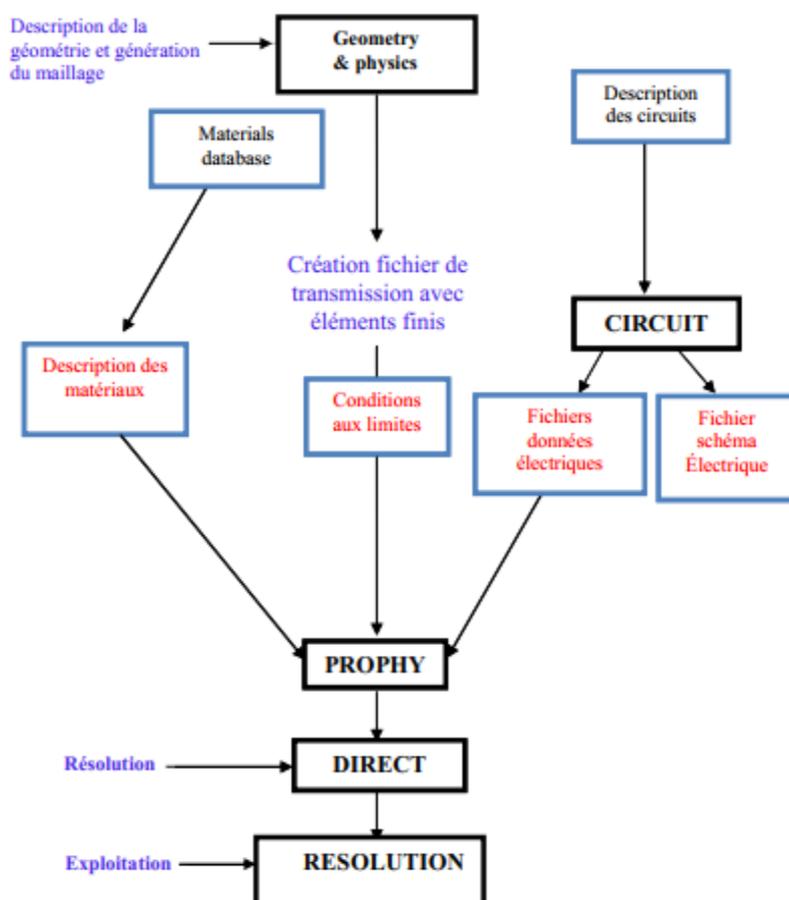


Figure II.2 Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D [ZOR 10]

II.5 Application à la simulation de la machine asynchrone

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D. [BEN 02]

II.5.1 Les données de la machine étudiée

La **figure II.3** présente la géométrie de la machine étudiée et ses dimensions

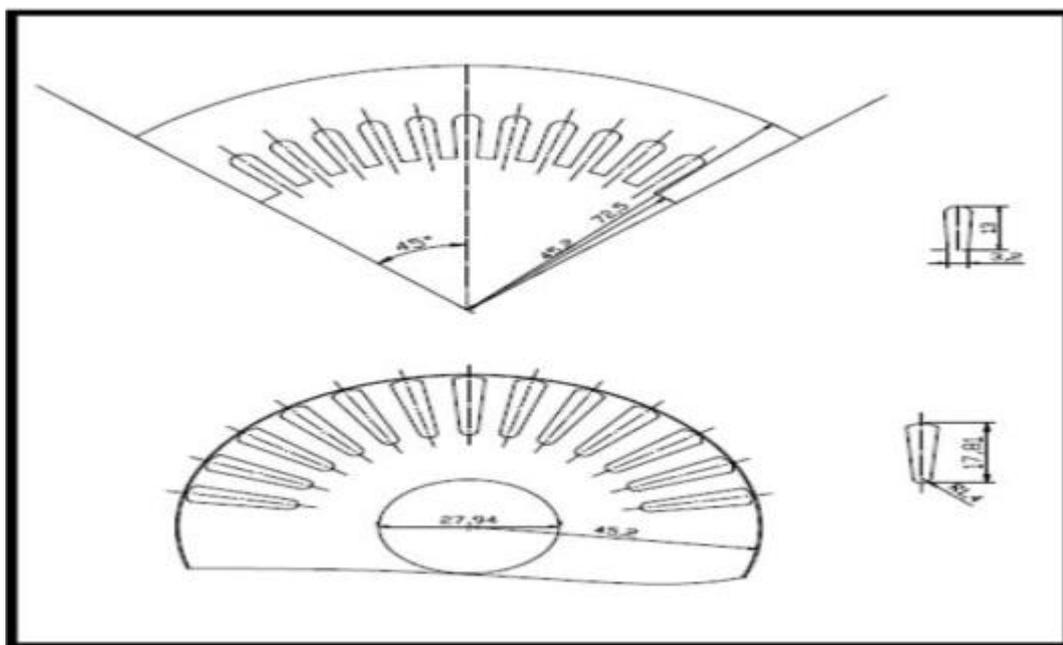


Figure II.3 les dimensions de la machine.

Les caractéristiques de la machine asynchrone étudiée sont données au tableau II.1.

Paramètres		Valeurs
MACHINE	Puissance	1.1kW
	Tension	400/230V
	Fréquence	50Hz
	Vitesse nominale	1425tr/min
	Nombre de paires de pôles	2
	Longueur du paquet de tôles	55mm
STATOR	Nombre d'encoches	48
	Nombre de spires par phase	464
	Connexion	Y
	Diamètre extérieur	145mm
	Diamètre intérieur	90.4mm
	Résistance par phase	9.5Ω
ROTOR	Nombre d'encoches	28
	Diamètre extérieur	89.8mm
	Diamètre intérieur	27.94mm
ENTREFER	Epaisseur	0.3mm

Tableau II.1 Les caractéristiques de la machine

La figure II.4 illustre la répartition du bobinage dans les encoches statoriques, qui a $w_1=58$ tours par encoche

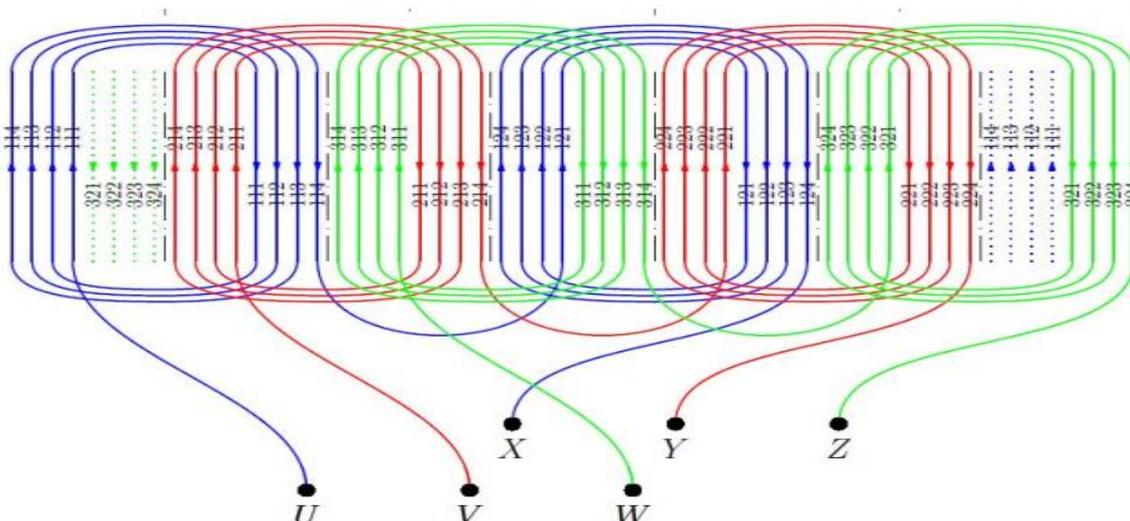


Figure II.4 Bobinage statorique

La figure II.5 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

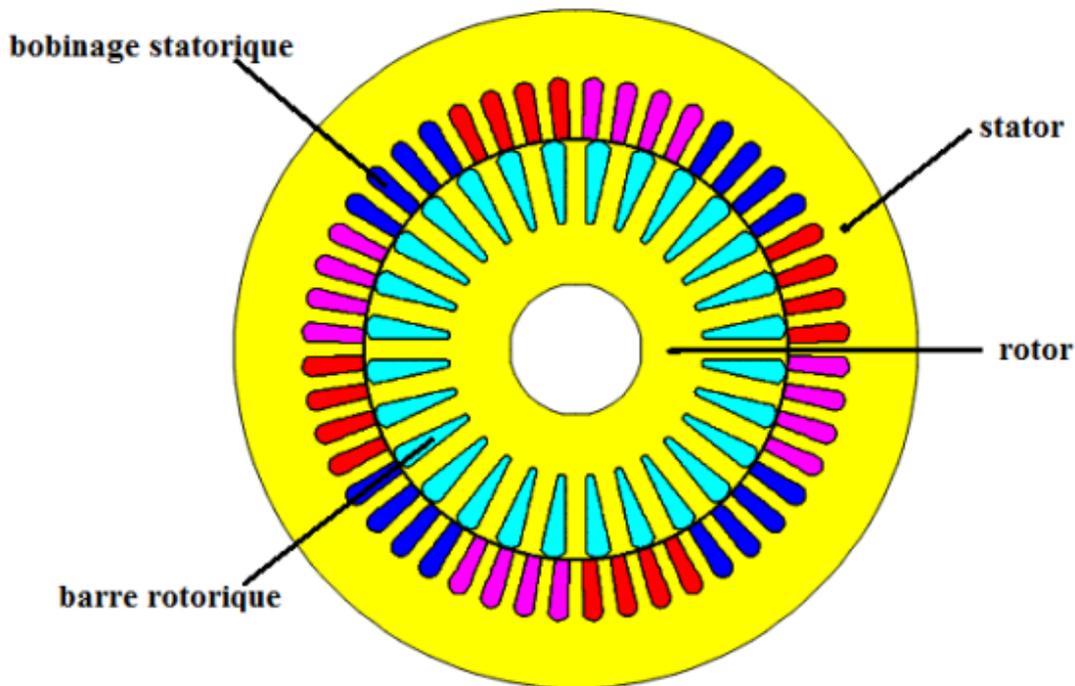


Figure II.5 circuit magnétique de la MAS

II.5.2 Procédure de construction du modèle par FLUX 2D

Pratiquement, il suffit pour une machine saine de considérer un seul pôle grâce à la symétrie électrique et magnétique de la machine par rapport à son axe de rotation, mais ce n'est pas le cas pour une machine avec défaut où elle perd sa symétrie. Il faut donc réaliser la géométrie complète de la machine pour étudier son comportement avec défaut [KHE 12].

Pour simplifier la méthode de construction, on commence par faire entrer des paramètres et des systèmes de coordonnées pour le modèle puis schématiser la première encoche statorique et la première barre rotorique. Le reste de la géométrie et du maillage est créé par propagation. Les paramètres à entrer représentent les dimensions des différentes parties de la machine, mais sont indépendants d'aucune unité de mesure. L'intérêt de ces paramètres est qu'ils simplifient l'entrée du problème et les modifications dans la géométrie par définition des coordonnées des points en fonction de ces paramètres, par exemple, on définit le diamètre intérieur de stator comme (DIS) et si on veut le changer il suffit de changer son paramètre,

Flux2D vas automatiquement mettre à jour les points et les lignes correspondants à ce paramètre et le maillage. Sans ce paramètre il faut redéfinir les coordonnées de chaque point et chaque ligne cités à cette distance ainsi que le maillage.

Lorsque on entre les points de l'encoche statorique et de celle rotorique et relie entre eux par des lignes et des arcs, les surfaces des régions sont automatiquement construites par ces lignes. Puis on construit les deux lignes intérieure et extérieure du rotor et celle extérieure de stator.

Génération du maillage

Les éléments du découpage sont générés automatiquement par un générateur de maillage dans le module **Preflux**, mais la size du maillage peut être contrôlé par création des points et des lignes du maillage puis l'association de ces derniers aux points de la géométrie. Preflux donne l'avantage de propagation des surfaces et leur maillage au même temps.

Géométrie

Pour compléter la géométrie facilement on ajoute des transformations qui doublent rapidement les surfaces et les lignes : pour le rotor, la transformation est une rotation autour d'un point, définie par les coordonnées de ce point et l'angle de rotation. Dans notre cas le point est o (0,0), l'angle égale à 360/36. Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égale à 360/48. On applique la première à la surface qui représente la barre rotorique 47 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 35 fois avec le choix de commande **Add Faces and associated Linked Mesh Generator** pour doubler les surfaces avec la prise en compte de leur maillage. Il reste le diamètre intérieur de stator, pour le compléter on relie entre deux encoches par un arc puis double cet arc 35 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces.

Jusqu'au ici le maillage n'est pas effectué, pour mailler la géométrie on choisit la commande **Mesh lines** puis la commande **Mesh faces** et le maillage sera schématisé. La figure II.6 représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

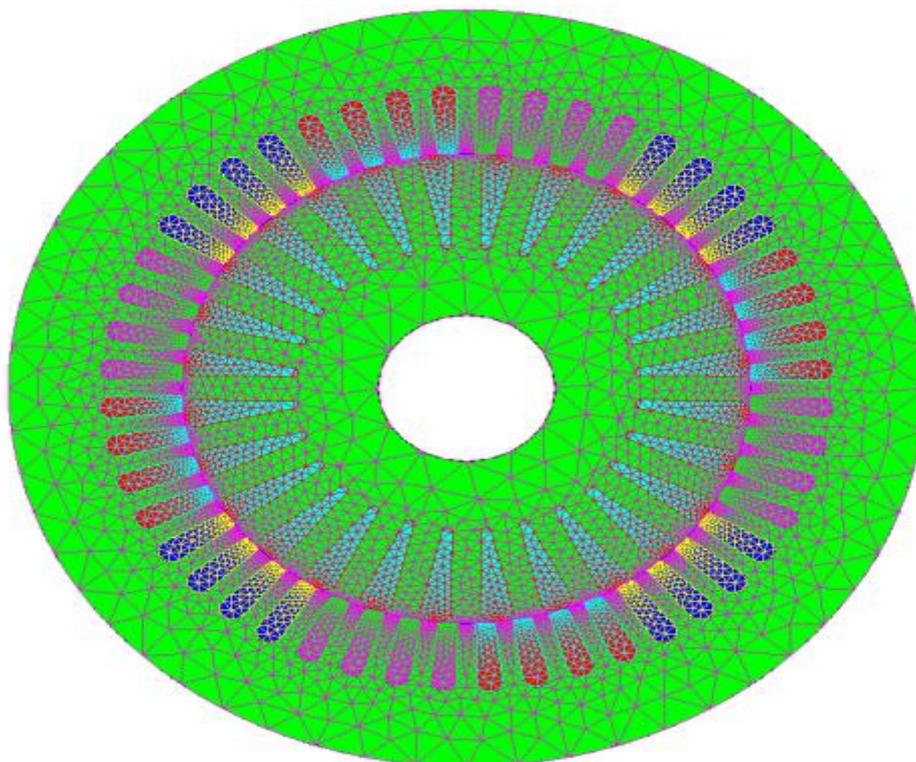


Figure II.6 répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger le temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre, lors de nos simulations nous appliquons la condition de Dirichlet sur tout le contour de la machine avec un potentiel vecteur nul [TUD 09].

Création des matériaux

Pour notre modèle on utilise trois types de matériaux : IRON (défini comme un matériau Ferromagnétique non linéaire), l'Aluminium et l'air

L'aluminium est défini comme un matériau linéaire par une résistivité et une perméabilité relative constante. Il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres propriétés (propriétés thermiques par exemple) parce qu'ils ne sont pas prises en compte pour notre cas (analyse magnétique).

Le matériau ferromagnétique IRON est caractérisé par la courbe d'aimantation $B(H)$, qui est non linéaire, pour tenir en compte de la saturation du circuit magnétique.

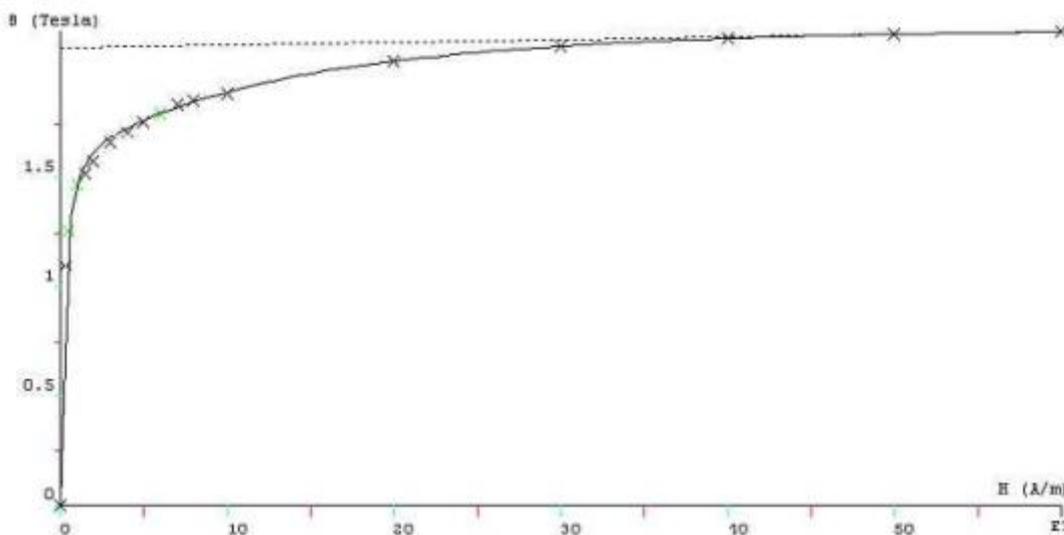


Figure II.7 la courbe d’aimantation B (H) du matériau ferromagnétique

Le circuit électrique

Pour bien représenter le circuit électrique de la machine il faut tenir compte des effets d’extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d’anneau de court-circuit), figure II.8

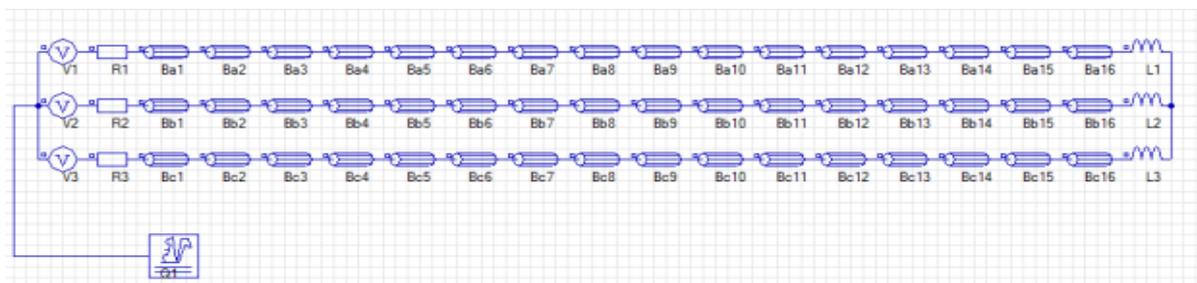


Figure II.8 : le circuit électrique d’alimentation

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D) utilisé pour modéliser la cage d’écurueil de la machine, c’est un circuit fermé qui contient des barres rotorique, des résistances et des inductances de fuite correspondent aux régions d’inter-barre d’anneaux de court-circuit (arcs entre deux barres adjacentes), figure II.10. V_a , V_b et V_c sont les sources de tension d’alimentation (voir figure II.11). Ba1, Ba2,Bc4 représentant le bobinage statorique. Ra, Rb, et Rc sont les résistances de chute de tension dans le réseau. Rsa, Rsb, et

R_{sc} représentent les résistances des voltmètres pour mesurer les tensions statoriques. L_a , L_b et L_c sont les Inductances de fuite des têtes de bobines, elles sont calculées analytiquement.

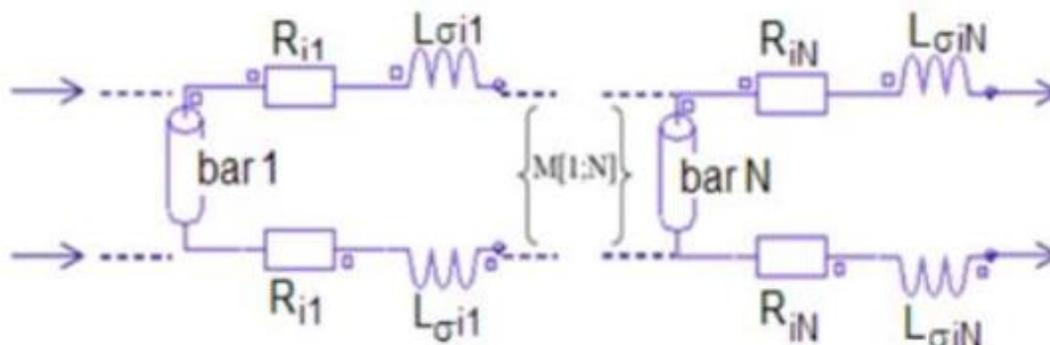


Figure II.9 : Circuit équivalent de la cage rotorique

Ce lien est utilisé car les simulations envisagées visent à reproduire les variations du moteur lors d'un fonctionnement en charge. Les courants induits au rotor ne pourront donc plus être négligés comme c'était le cas à vide, il est donc indispensable de modéliser le court-circuit de la cage. De plus, cette méthode permet d'alimenter directement le moteur en tension et non pas en courant comme il faudrait le faire sans ce couplage [ZOR 10].

Les propriétés physiques et régions

Le problème étant défini par une application magnétique de 2D en magnéto transitoire (pas à pas dans le temps), auquel, le circuit électrique et les matériaux créés précédemment sont importés. Les valeurs des résistances, des inductances, et des tensions d'alimentation, sont définies aussi ici. La prise en considération de mouvement (soit rotation ou translation) nécessite l'existence des ensembles mécaniques, ces derniers sont de trois types :

Fixé : les parties fixes du modèle

Mouvement : définit les parties du modèle qui sont en mouvement.

Compressible : définit les régions entre les parties fixes et celles en mouvement.

Dans notre modèle les trois types existent, le stator présente la partie fixe, le rotor est en mouvement (rotation suivant un axe parallèle à Oz) et l'entrefer est compressible.

Le couplage entre la géométrie du modèle et le circuit d'alimentation est effectué par la création des régions surfaciques, chacune de ces régions est défini par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondent dans le circuit, le sens du courant et l'ensemble mécanique. Puis ces régions sont associées aux surfaces de la géométrie par la commande (**assign régions to faces**).

La rotation est réalisée par la considération d'une bande de mouvement. A chaque instant le rotor est déplacé par un certain angle. La seule partie de la géométrie qui sera remaillé est la bande de mouvement qui couple les éléments du rotor avec ceux de stator. Dans notre cas la bande de mouvement est constituée par la région de l'entrefer.

II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis, sous l'environnement Flux 2D®. On a commencé par la représentation de la méthode de calcul de champ par les éléments finis en citant les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les machines électriques qui sont les équations de Maxwell associées aux relations constitutives du milieu considéré. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé.

A la fin de ce chapitre nous avons cité la méthode de réalisation de ce modèle et du couplage de circuit magnétique avec le circuit électrique extérieur d'alimentation.

Chapitre III

**Résultats de
simulation
de la MAS**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulation de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel FLUX 2D. Les tests sont effectués à l'état sain, avec des défauts de court-circuit entre spire et déséquilibre de tension d'alimentation.

Par la suite, nous avons passé à l'analyse spectrale d'une grandeur mesurable qui est le courant des phases statoriques à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT) (outil mathématique très utilisé); qui permet de décrire n'importe quel signal par son spectre fréquentiel.

Enfin, nous allons étudier l'impact de ces défauts sur l'amplitude de l'harmonique 3f_s sous différentes charges.

III.2 Résultats de simulation

III.2.1 Etat sain et déséquilibre de tension d'alimentation

Une tension asymétrique aux bornes d'une machine asynchrone provoque un déséquilibre au niveau des courants circulant dans les enroulements statoriques. Ceci génère des oscillations dans les signaux du couple électromagnétique et de la vitesse, provoquant ainsi une augmentation de niveau des vibrations et les contraintes mécaniques. [HAL 15]

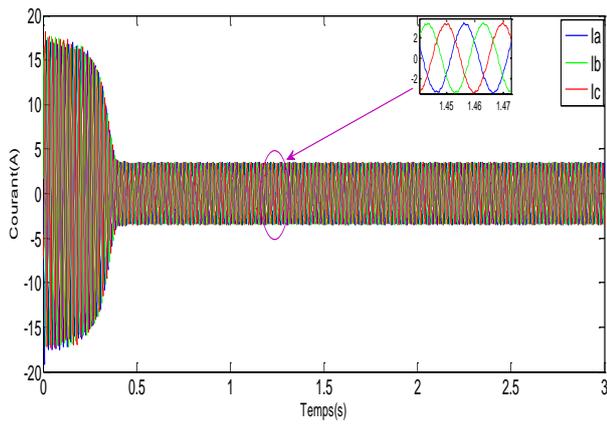
Dans un premier temps, nous avons effectué des tests de simulation à l'état sain et en pleine charge d'un moteur de 1.1 kW, dont les paramètres sont présentés dans l'annexe. Dans un second temps, nous avons effectué d'autres tests de simulation mais cette fois sous un déséquilibre de tension dans la phase A comme suis :

$$V_a = 218.499 \sqrt{2} (0^\circ) \text{ V.}$$

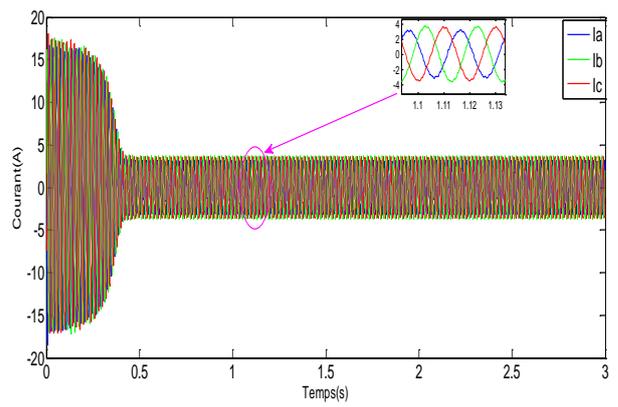
$$V_b = 230 \sqrt{2} (-120^\circ) \text{ V.}$$

$$V_c = 230 \sqrt{2} (120^\circ) \text{ V.}$$

Les figures III.1 à III.4 montrent les allures temporelles des tensions, courants, couple et vitesse. On remarque l'augmentation de l'amplitude de l'ondulation de la vitesse en régime permanent ainsi qu'une légère diminution dans la valeur moyenne de la vitesse (1446 tr/min à l'état sain et 1444.5tr/min à l'état de déséquilibre de tension d'alimentation).

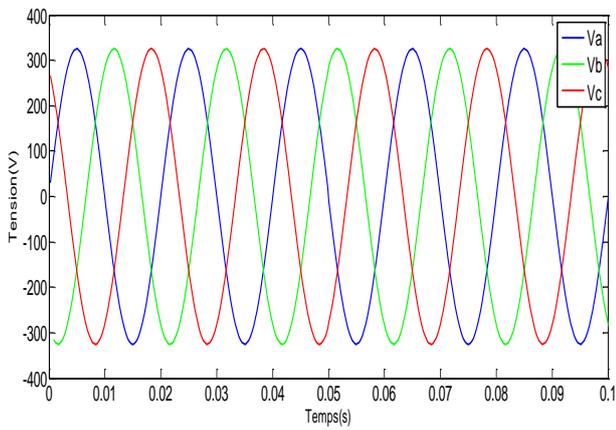


(a)

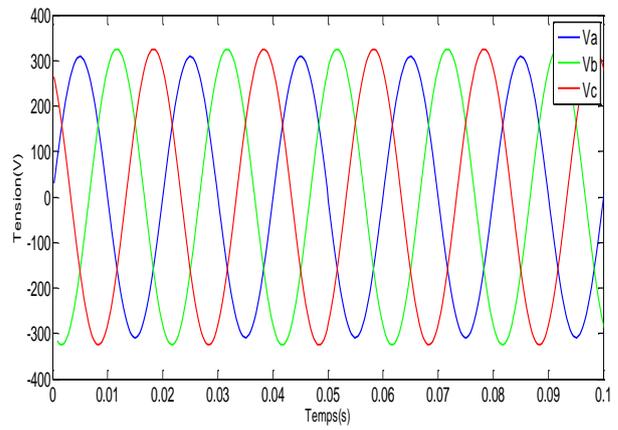


(b)

Figure III.1 les courants statoriques en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5% ;

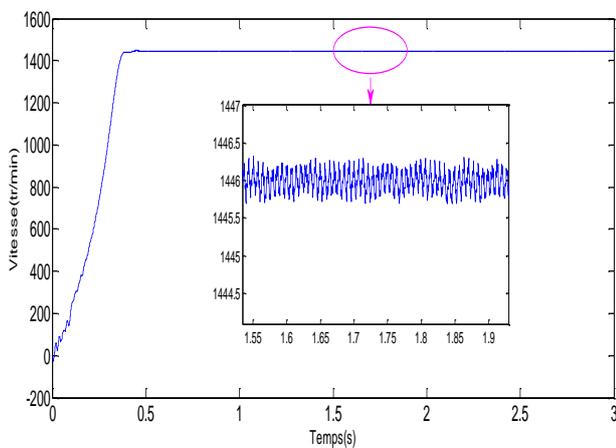


(a)

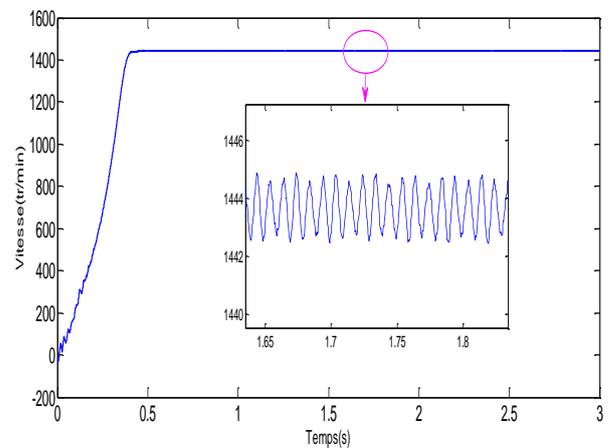


(b)

Figure III.2 les tensions d'alimentation en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5% ;



(a)



(b)

Figure III.3 la vitesse de rotation en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5% ;

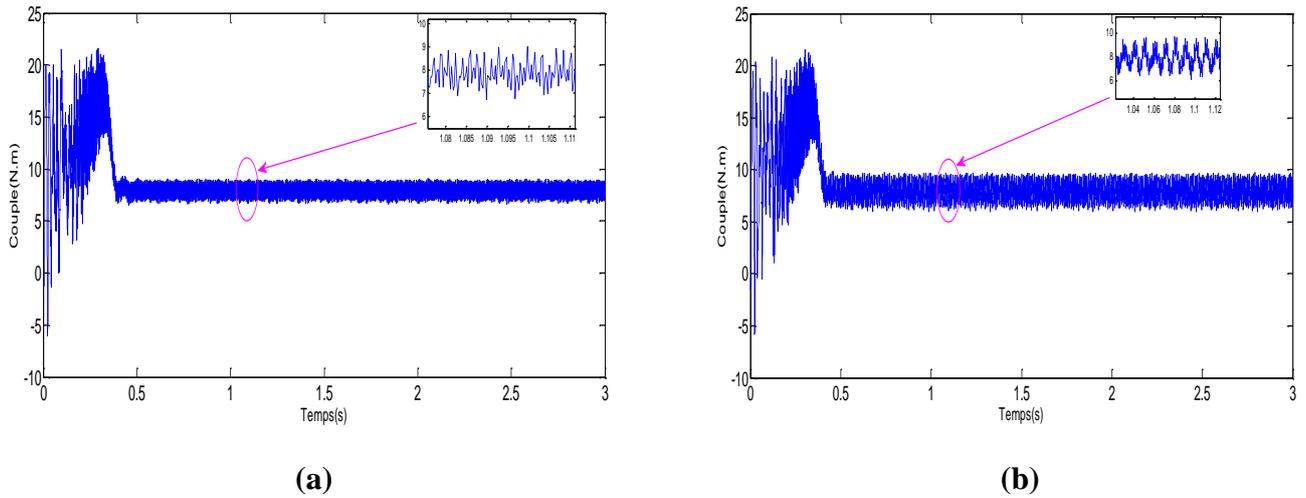


Figure III.4 le couple en pleine charge. (a) état sain ;(b) déséquilibre 5% ;

On remarque aussi une augmentation des ondulations du couple en régime permanent du couple bien sur à cause de déséquilibre de tension.

III.2.2 Etat sain et court-circuit entre spires statoriques

Le court-circuit entre spires des enroulements statoriques est un défaut largement rencontré dans l'industrie. Il apparaît généralement à cause des mauvaises conditions de fonctionnement ou vieillissement des isolants qui enrobent les conducteurs [SAH 10].

Dans cette partie, on a effectué des tests de simulation en pleine charge avec 6spires en court-circuit dans la phase B.

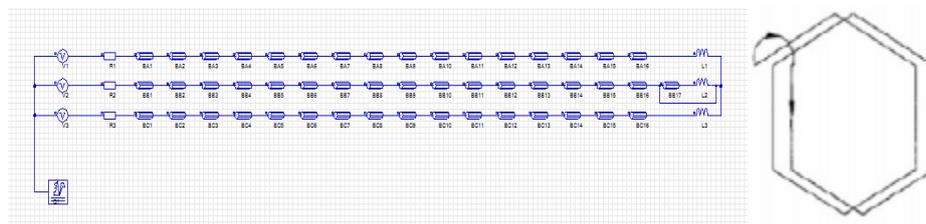


Figure III.5 Représentation un court-circuit entre 6spires dans la phase B.

Les figures III.6 à III.9 montrent les allures temporelles des tensions, courants, couple et vitesse à l'état sain et avec défaut de 6 spires de court-circuit. On remarque bien que ce défaut engendre un déséquilibre au niveau des courants statoriques.

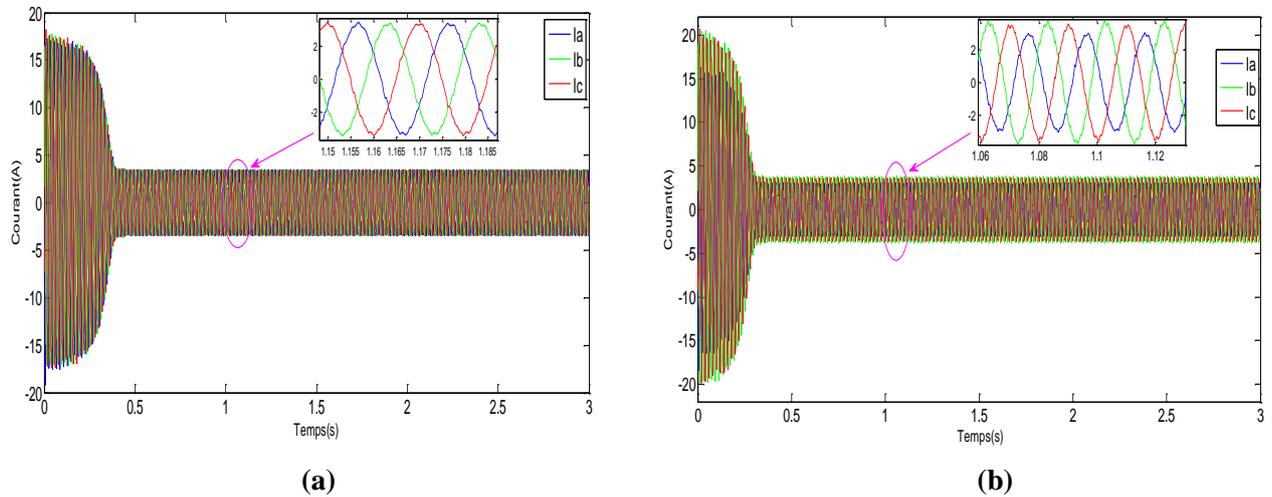


Figure III.6 les courants statoriques en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires

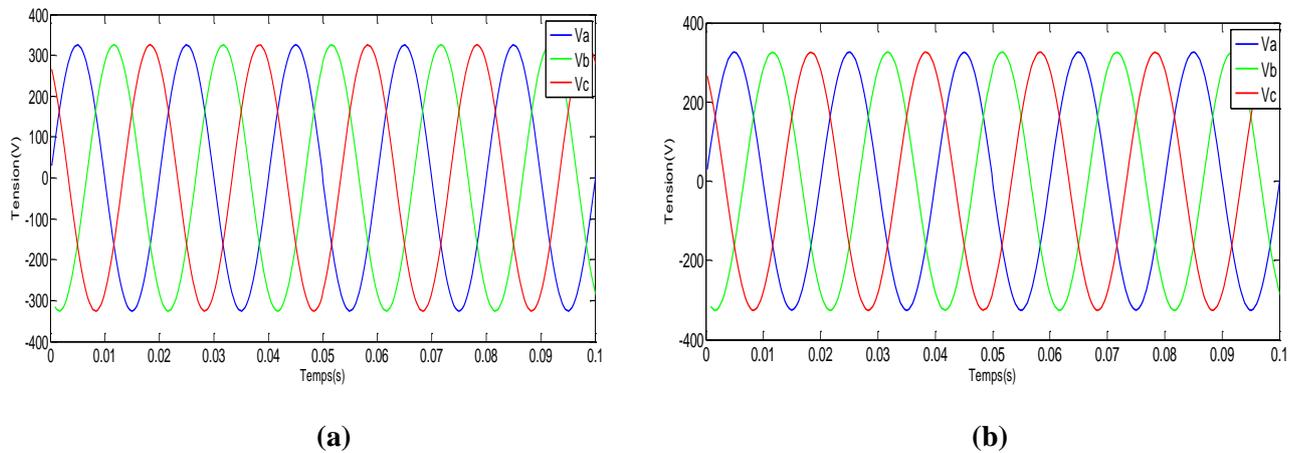
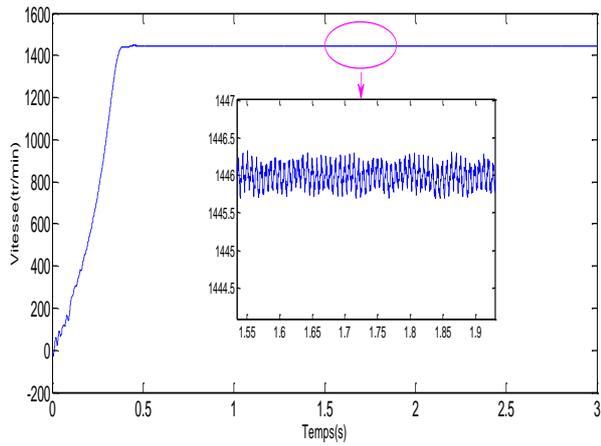
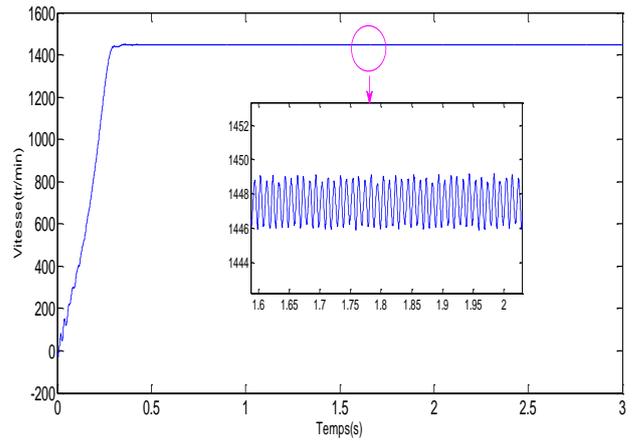


Figure III.7 les tensions en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires



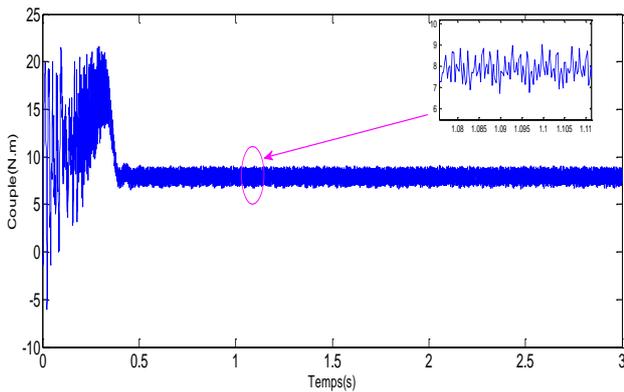
(a)



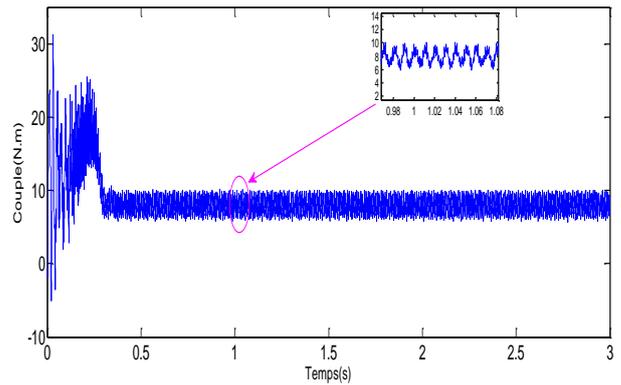
(b)

Figure III.8 la vitesse en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires

On remarque aussi une augmentation des ondulations de la vitesse et du couple en régime permanent.



(a)



(b)

Figure III.9 le couple en pleine charge. (a) état sain ;(b) court-circuit entre 6 spires

III.3 Analyse Spectrale du Courant Statorique

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes.

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on est obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : le couple, la vitesse, les courants, le flux, les vibrations,...

Dans ce travail, on s'intéresse à l'utilisation d'une méthode basée sur la Transformée de Fourier Rapide (FFT). Ceci s'adapte parfaitement à notre application dans la mesure où de nombreux phénomènes associés aux défauts se traduisent par l'apparition des harmoniques de nouvelles fréquences liées directement au glissement ou à la modification des amplitudes des harmoniques qui existaient dans le spectre.

III.3.1. La Transformée de Fourier Rapide

On rappelle que la transformée de Fourier Rapide $X(f)$ d'un signal $x(t)$ continu dans le temps soit donnée par [SAH 10]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{III.1})$$

Son inverse est donnée par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j\omega t} dt \quad (\text{III.2})$$

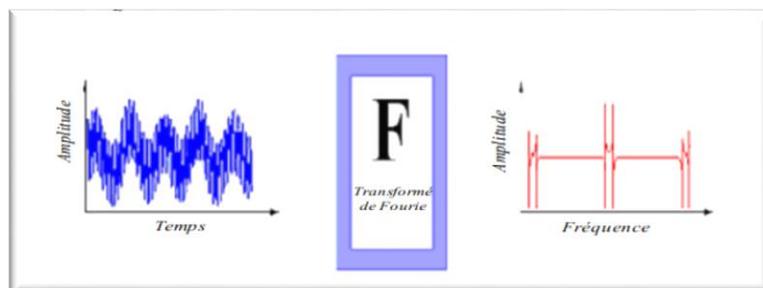


Figure III.10 Représentation temporelle vers fréquentielle [BOU 15].

Dans notre travail, les spectres de courant sont visualisés dans une échelle logarithmique normalisée. La résolution fréquentielle souhaitée est déterminée par la durée de l'acquisition :

$$\Delta f = \frac{1}{t_a}$$

Les figures III.11-12 montrent les spectres du courant statorique du moteur 1.1kW en mi-charge pendant l'état sain et avec 6 spires en court-circuit et avec déséquilibre de tension d'alimentation de 5%. Il est clairement visible que la plupart des harmoniques du courant statorique augmentent en amplitude à cause de la présence d'un défaut de court-circuit entre spires ou déséquilibre de tension et cette augmentation dépend de la sévérité du défaut. On remarque aussi que l'harmonique 150 Hz est la plus sensible à la présence des défauts (Indicateur des défauts).

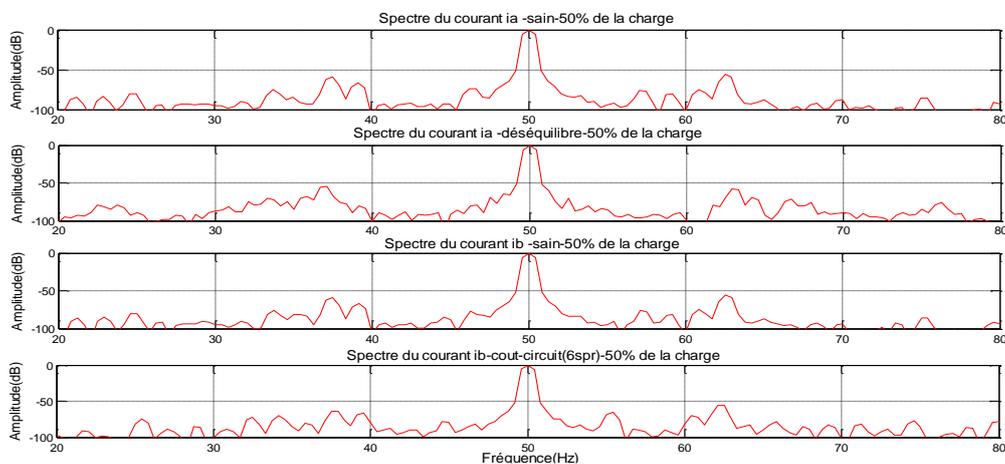


Fig III.11 Spectre du courant statorique en Mi-charge à l'état sain et avec déséquilibre 5%, 6 spires en court-circuit (visualisation la fréquence 50 Hz)

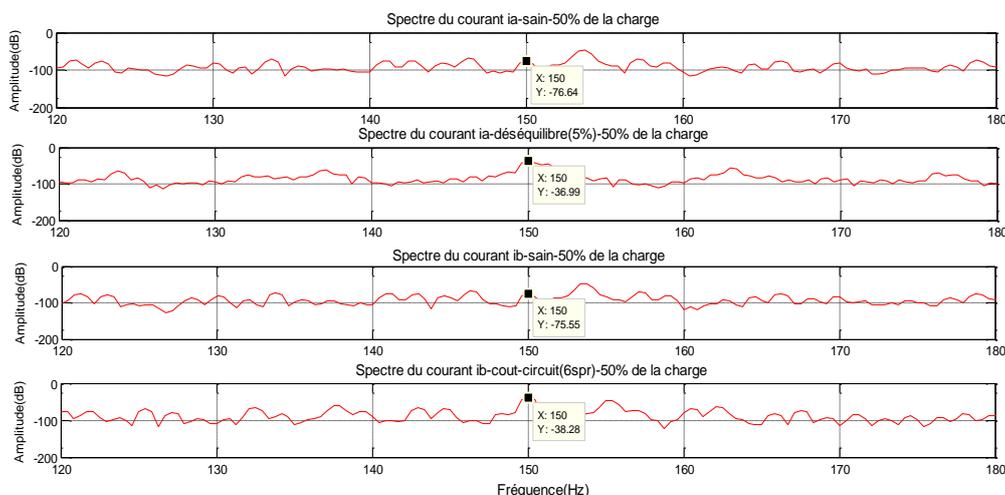


Fig III.12 Spectre du courant statorique en Mi-charge à l'état sain et avec déséquilibre 5%, 6 spires en court-circuit (visualisation l'harmonique 150 Hz)

III.4 Analyse et comparaison

Dans ce paragraphe, on va présenter une étude sur l'impacte des défauts de court-circuit et de déséquilibre de tension sur l'amplitude de l'harmonique 3fs sous différentes charges.

- La machine avec déséquilibre de tension 5%.
- La machine avec court-circuit entre 6spires.
- La machine à l'état sain.

<i>3kfs</i>		Amplitude (dB)		
		A vide	Mi-charge	Pleine charge
déséquilibre	2.5%	-37.58	-43.92	-49.94
	5%	-30.54	-36.99	-43.67
	10%	-23.79	-29.07	-36.99
Court-circuit	2spires	-34.97	-38.63	-39.26
	3spires	-34.66	-38.49	-39.42
	6spires	-33.91	-38.28	-39.95
	20spires	-31.91	-40.60	-44.16
Etat sain	Courant Ia	-70.50	-76.64	-81.73
	Courant Ib	-71.53	-75.55	-81.07

Tableau III.1 L'évaluation des raies 3kfs en fonction de la charge.

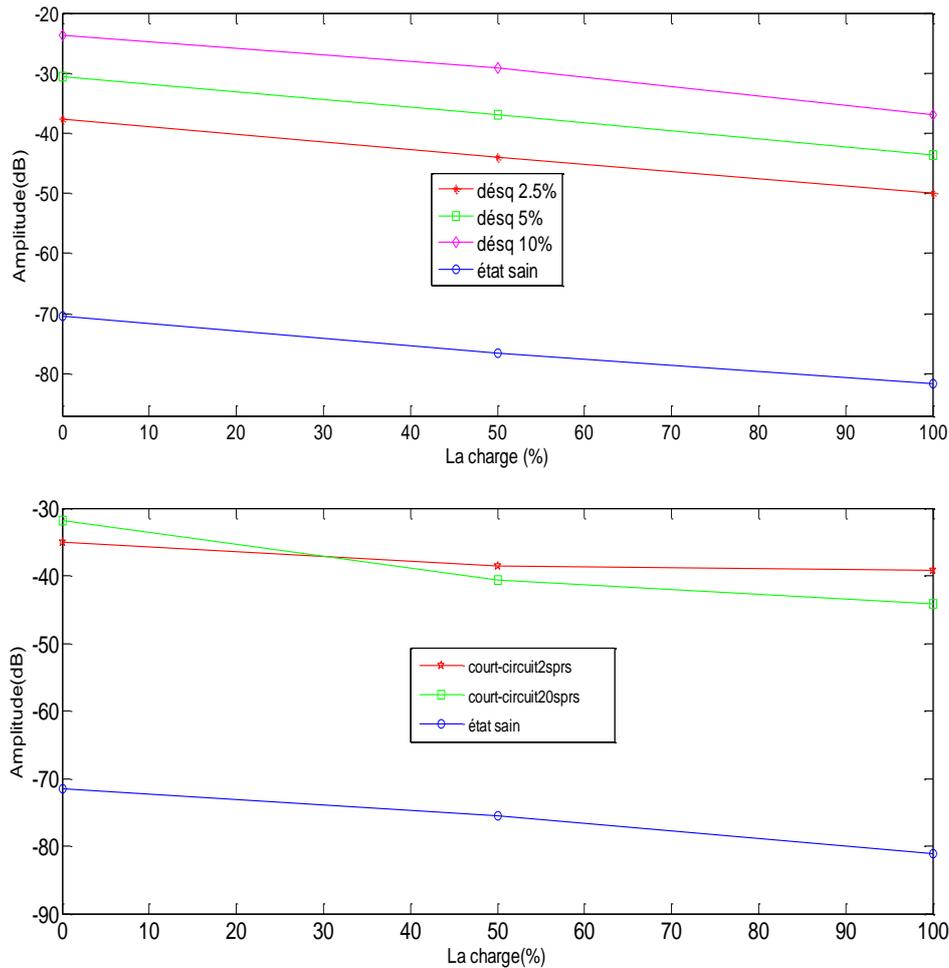


Figure III.13 Evolution des amplitudes des 3kfs en fonction de la charge

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié analytiquement le moteur asynchrone triphasé à cage à l'état sain et en présence d'un défaut de déséquilibre de tension et défaut de court-circuit entre spires du bobinage statorique en analysant les spectres de courant statorique pour chaque cas.

Une analyse harmonique des courants statoriques permet de voir une augmentation de l'harmonique 150 Hz et on a démontré que le défaut de court-circuit entre spires n'a pas de signatures propres mais il influe sur tous les types d'harmoniques.

Enfin l'analyse présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts statorique sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au stator. Par contre, le seul inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long. Un seul cas d'étude dure 1 jour et demi par un ordinateur de 4G de

RAM et μ p. Intel i3 de 2.4GHz. A noté aussi que la mémoire à réserver dans le disque dure doit être très grande (58Go pour une solution de 3secondes avec un pas de 0.0003s).

*Conclusion
générale*

Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire est une contribution à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écurueil en vue du diagnostic des défauts (court circuit entre spire et déséquilibre de tension).

Nous avons montré que les principaux éléments de la machine asynchrone peuvent présenter des défaillances totales ou partielles provoquant un arrêt inattendu, qui conduit à des pertes économiques considérables. Pour éviter ces problèmes, il est impératif de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats.

Le début de ce mémoire a été marqué par un rappel des différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter cette technique.

Afin de représenter le comportement de la machine lors d'un fonctionnement normal (sans défaut) et dégradé (avec défaut), nous avons créé un modèle éléments finis qui tien compte de la topologie et de dimensions de la machine.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide du "Toolbox Matlab", pour exploiter le contenu spectrale du courant statorique et par conséquent de déterminer les composantes $3kfs$ caractérisant les défauts (court circuit entre spire et déséquilibre de tension). En suite, nous avons montré l'impacte des défauts de court-circuit et déséquilibre de tension sur l'amplitude de l'harmonique $3fs$ sous différentes charges. et trouvé que la loi de variation des amplitudes de $3fs$ est inversement proportionnelle de la charge quelle que soit le type de défaut (court-circuit, déséquilibre), et que l'amplitude de ces harmoniques augmente.

En perspective, nous proposons à court terme d'étudier la modélisation de la machine asynchrone en présence de défauts statoriques expérimentalement avec une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode des éléments finis.

Bibliographie

- [BAC 02] : S. Bachir. « Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique », Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur, 2002.
- [BAZ 09] : BAZINE Sadok ; « Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défaut » ; thèse de doctorat ; Université de Poitiers ; Année 2009.
- [BEL 04] : M .BELATEL « contribution a la conception assistée par ordinateur des machine électrique » thèse magister, université Mentouri, Constantine, 2004.
- [BEN 02] : D. Bendittis « étude et modèle électromagnétique de machine asynchrone pour l'alternateur-démarrreur». Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2002.
- [BEN 03] : M. E. H. Benbouzid, G. B. Kliman. « What Stator Current Processing Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? », IEEE, Transaction on Energy Conversion, VOL 18 n°2, pp. 238-244, Jun 2003.
- [BOU 15] : Abdelkarim bourase « Détection Prédictive des Anomalies des Moteurs de Moyenne Tension lors des Défauts Combinés » thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba 2015.
- [BOU 10] : bouraiou ahmed « Diagnostic de défauts par logique floue ». Mémoire de magister de l'université de Anaba 2010.
- [BOU 07] : R. Bousseksou, « Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic», mémoire de magistere l'université de Constantine 2007.
- [CHA 17] : CHA. Abdelghani « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », Thèse de Doctorat l'université de Oran 2017.
- [DID 04] : Didier G, « Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », Thèse de doctorat, Université Nancy 1, France, 2004.

- [GHO 05] : A. Ghoggal , « Diagnostic de la machine asynchrone triphasée- Modèle dédié à la détection des défauts », mémoire de magister de l'université de Batna, 05/2005.
- [HAL 15] : N. Halem, « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis » thèse de doctorat, Université de Mohammed Khaidher Biskra 2015.
- [KHE 12] : S. Khelif, « Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique », mémoire de magistère, Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012.
- [KHO 05] : D.E. Khoudja, « Elaboration d'un système intelligent de surveillance et de diagnostic automatique en temps réel des défaillances des moteurs à induction » thèse de doctorat, Université de Boumerdès 2007.
- [MAB 17] : Mabrouk Abd Elhamid « Contribution Au Diagnostic De La Machine Asynchrone En Présence De Variation De Charge» thèse de doctorat, Université de Biskra 2017.
- [OND 06] : Ondel O. « Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone » Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, 2006.
- [SAH 10] : M. Sahraoui, « Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones » thèse de doctorat, Université de Biskra 2010.
- [SCH 99] : E.Schaeffer, « Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts » Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [TUD 09] : T. Tudorache, L. Melcescu and V. Petre: FEM optimal design of energy efficient induction machines; Advances in Electrical and Computer Engineering Volume 9, Number 2, 2009.
- [ZOR 10] : A. Zorig, «Identification des Machines Asynchrones en Vue de leur Diagnostic», mémoire de magister, Université de Setif 2010.