



Faculté de Technologie
Département de Génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité: Electromécanique

Présenté par

HAMMICHE Madjid

BOUSSAID Massinissa

Dirigé par

L'encadreuse : Mme. ABDELLI Radia

Le co-encadreur : Mr. BOUZIDA Ahcene

THEME

**Détection du défaut de rupture des barres dans une
machine asynchrone à cage**

Devant le jury composé de

Mr. LAAIFA OUI Karim

Mr. MIBARKI Youcef

Examineur

Président

Remerciement

Premièrement, on voudrait adresser nos remerciements à Dieu le tout puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années d'études.

Nos remerciements s'adressent à notre encadreuse Madame R. ABDELLI, notre co-encadreur Monsieur BOUZIDA Ahcene pour avoir proposé et dirigé ce mémoire et pour leur suivi le long de la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier vivement, les membres de jury pour avoir accepté de juger notre mémoire.

Nous saisissons cette occasion pour exprimer nos grandes reconnaissances et gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation et l'achèvement de ce travail.

Liste des acronymes et abréviations

MAS	Machine asynchrone	
MCSA	Motor Current Signature Analysis	
MEF	Méthode des éléments finis	
FFT	Fast Fourier Transform	
AFNOR	Association française de normalisation	
CEI	Commission électrotechnique internationale	
SE	Excentricité statique	
DE	Excentricité dynamique	
ME	Excentricité mixte	
2D	Deux dimensions	
\vec{H}	Vecteur champ magnétique	[A/m]
\vec{E}	Vecteur champ électrique	[V/m]
\vec{B}	Vecteur induction magnétique	[T]
\vec{A}	Vecteur potentiel magnétique	[T.m]
\vec{j}	Vecteur densité du courant total	[A/m ²]
\vec{Br}	Vecteur induction rémanente des aimants	[T]
V	Potentiel scalaire magnétique	[T.m]
ρ	Densité de charge volumique	[C /m ³].
μ	Perméabilité magnétique	[H/m]
v	Réfectivité magnétique	[H /m] ⁻¹
σ	Conductibilité électrique	[Ω^{-1} /m ⁻¹]
ϵ	Permittivité électrique	[F/m]
f.é.m	Force électromotrice	[V]
f.m.m	Force magnétomotrice	[V]
U	Source d'alimentation	[V]
isα	Courant statorique selon l'axe α	[A]
isβ	Courant statorique selon l'axe β	[A]
Ω	Vitesse mécanique	[tr/min]
Ω_s	Vitesse de synchronisme	[tr/min]
ω_s	Pulsation statorique	[rd/s]
f	fréquence	[Hz]
B	Bobinage statorique	[H]
L	Inductance de fuite	[H]
J	Moment d'inertie	Kg /m ²
v	Ordre des harmoniques de temps de la f.m.m	
nb	Nombre de barres rotorique	
p	Nombre de pair de pôle	
g	Le glissement	
a,b,c	Les trois phases statoriques	

Liste des figures

Figure I.1	Une machine asynchrone	3
Figure I.2	Le stator.....	4
Figure I.3	Le rotor à cage d'écureuil.....	5
Figure I.4	Proportion des défauts dans les machines asynchrones.....	8
Figure I.5	Répartition des pannes sur les machines asynchrone	9
Figure I.6	Image montrant l'effet du défaut de roulement	10
Figure I.7	Différents défauts d'excentricités : a) – Statique ; b) dynamique ; c) mixte	11
Figure I.8	Image illustre l'effet du Court-circuit entre spires	13
Figure I.9	Rupture d'anneau de court-circuit et les cassures de barres	14
Figure II.1	Enchaînement des étapes dans Flux 2D®	23
Figure II.2	Géométrie du modèle de la machine étudiée	24
Figure II.3	Répartition du maillage	25
Figure II.4	Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie...	25
Figure II.5	Distribution des lignes d'induction et du champ magnétique.....	26
Figure II.6	Les trois courant statoriques d'alimentation.....	27
Figure II.7	Les trois courant statoriques d'alimentation en régime permanent	27
Figure II.8	Le couple électromagnétique fournit par la machine	28
Figure II.9	Vitesse de rotation.....	28
Figure II.10	Le courant dans la première barre rotorique.....	29
Figure III.1	Distribution des lignes du champ	32
Figure III.2	Distribution du flux	33
Figure III.3	Les courants statoriques	35
Figure III.4	Courants rotoriques	36
Figure III.5	Vitesse de rotation pour chaque ca : a) régime transitoire ;b) régime permanent	37
Figure III.6	Analyse spectrale du courant de phase de 30 Hz à 90 Hz pour défaut de la cassure des barres	40

Liste des tableaux

Tableau I.1	Principaux défauts des machines électriques.....	7
Tableau I.2	Quelques termes et concepts souvent utilisés dans le diagnostic	14
Tableau II.1	caractéristiques de la machine	23

Sommaire

Remerciements

Liste des acronymes et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I Présentation des Défauts de la Machine Asynchrone

I.1 Introduction.....	2
I.2 La machine asynchrone.....	2
I.2.1 Eléments constitutifs de la machine asynchrone	3
I.2.1.1 Le stator	3
I.2.1.2 Le rotor	4
I.2.1.3 Les paliers	5
I.3 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone	5
I.3.1 Définition	5
I.3.2 Classification des défauts.....	6
I.3.3 Quelques statistiques.....	7
I.3.4 Défauts mécaniques	8
I.3.4.1 Défauts de roulements	8
I.3.4.2 Défauts d'excentricités	9
I.3.5 Défaillances au stator.....	10
I.3.5.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	11
I.3.5.2 Court-circuit entre spires	11
I.3.5.3 Court-circuit entre phases	12
I.3.6 Défaillances au rotor.....	12
I.3.6.1 Ruptures de barres	12
I.3.6.2 Ruptures d'anneaux	12
I.3.7 Conséquences des défauts.....	13

I.4 Définition du diagnostic.....	13
I.4.1 Définition	13
I.4.2 Objectifs	13
I.4.3 Terminologies et concepts relatifs au diagnostic.....	13
I.4.4 Etapes du diagnostic de défaut	14
I.4.5 Intérêt du diagnostic	15
I.5 méthodes de diagnostic de la MAS.....	15
I.5.1 Méthodes sans modèle	15
I.5.1.1 Diagnostic par mesure du courant statorique	16
I.5.1.2 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	16
I.5.1.3 Diagnostic par analyse du vecteur de Park.....	16
I.5.2.Méthodes avec modèle.....	16
I.5.2.1 Estimation paramétrique.....	16
I.5.2.2 Diagnostic à l'aide des observateurs	17
I.6 Conclusion	17
CHAPITRE II : Modélisation et simulation de la machine asynchrone en état sain	
II.1 Introduction.....	19
II.2 Méthode des éléments finis	19
II.2.1 Le mode magnétique transitoire	20
II.3 Présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D®	21
II.4 Etapes de création d'un modèle sain de la MAS à cage d'écureuil avec Flux 2D	22
II.4.1 Construction géométrique	22
II.4.2 Génération du maillage.....	22
II.4.3 Définition des propriétés physiques	22
II.4.4 Résolution.....	22
II.4.5 Exploitation des résultats.....	22
II.5 Application à la simulation de la machine asynchrone	23
II.5.1 Couplage avec les équations de circuit	25
II.6 Résultats de simulation.....	26

II.6.1 Interprétation et analyses des résultats 29
II.7 Conclusion : 30

CHAPITRE III. Simulation et diagnostic de la machine asynchrone avec défauts

III.1 Introduction 31
III.2 Simulation de la machine asynchrone avec défauts..... 31
III.3 Résultats de simulation..... 31
 III.3.1 Analyse des résultats magnétiques..... 31
 III.3.2 Analyse des courants de phases 34
 III.3.3 Analyse des courants rotoriques 35
 III.3.4 Caractéristiques mécaniques 37
III.4 Diagnostic de la MAS saine et avec défauts : 38
 III.4.1 Analyse spectrale du courant d'une phase statorique : 38
III.5 Conclusion..... 41
CONCLUSION GENERALE 43
LES REFERENCES 44

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques dans plusieurs domaines industriels. En raison de sa simplicité de construction, de robustesse et d'efficacité. Mais comme tout appareil, elle rencontre des dysfonctionnements causés par des défauts mécaniques ou électriques.

La prévention et l'étude de ces défauts dans le milieu industriel, est l'une des tâches les plus essentielles pour assurer un taux de disponibilité et un bon fonctionnement du produit, pour minimiser les coûts de maintenances et les arrêts imprévus. Pour ça on fait appel à différentes méthodes de surveillance et de diagnostic afin de suivre le moindre changement dans le comportement du système, et améliorer sa fiabilité. La simulation est devenue l'une des méthodes les plus privilégiées grâce à sa grande flexibilité et efficacité pour évaluer les systèmes, leurs comportements et performances.

Pour parvenir à faire notre simulation, on doit d'abord faire la modélisation de la machine à étudier. Donc dans le cadre de notre travail, on va modéliser une machine asynchrone à cage d'écureuil, et notre objectif est d'étudier son comportement et ses caractéristiques dans un état normal et ensuite avec défaut en lui introduisant des défauts des ruptures de bars rotorique, et faire une comparaison entre les deux cas. Après ça, on veut détecter ces défauts introduit en utilisant la méthode d'analyse fréquentielles.

Pour cela on a organisé ce travail en le partageant en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on présentera quelques généralités sur la constitution de la machine asynchrone et spécialement sur celle à cage d'écureuil, les différents défauts les plus fréquent, et enfin on donnera une approche sur les méthodes de détection et de diagnostic de ces défauts.

Le second chapitre est consacré à la simulation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil dans un état sain, avec le logiciel Flux 2D qui utilise la méthode des éléments finis, et grâce aux résultats de simulation nous allons étudier les caractéristiques de la machine dans son état normal.

Et enfin, dans le dernier chapitre, nous simulerons notre machine en introduisant des défauts de cassures de barres rotoriques, et on va observer son comportement grâce aux résultats donnés par le logiciel, en analyses temporelles et en analyse fréquentielles.

CHAPITRE I
Présentation des
Défauts de la
Machine
Asynchrone

CHAPITRE I: Présentation de défauts et diagnostic de la machine asynchrone.

I.1 Introduction

La continuité de service est une qualité importante et inévitable que doit avoir tout système de nos jours pour satisfaire les exigences de l'utilisateur. Les éléments d'un système sont interdépendants et mise dans une chaîne productive si bien qu'une panne dans un élément peut entraîner l'arrêt total du système et ce type de situations a un coût non négligeable dans certaines applications.

A cette raison-là, l'étude des défauts et les procédés de diagnostic accompagnés dans les machines électriques occupe une place importante dans les secteurs industriels depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères et stricts.

Ce chapitre donne en premier lieu, un aperçu des distincts défauts dans les machines asynchrones, leurs classifications et leurs origines. Nous montrons ensuite, les différentes méthodes de surveillance et de diagnostic les plus fréquemment utilisées

I.2 La machine asynchrone

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieure à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût.

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur le processus industriel, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un engouement prononcé depuis les deux dernières décennies [1].

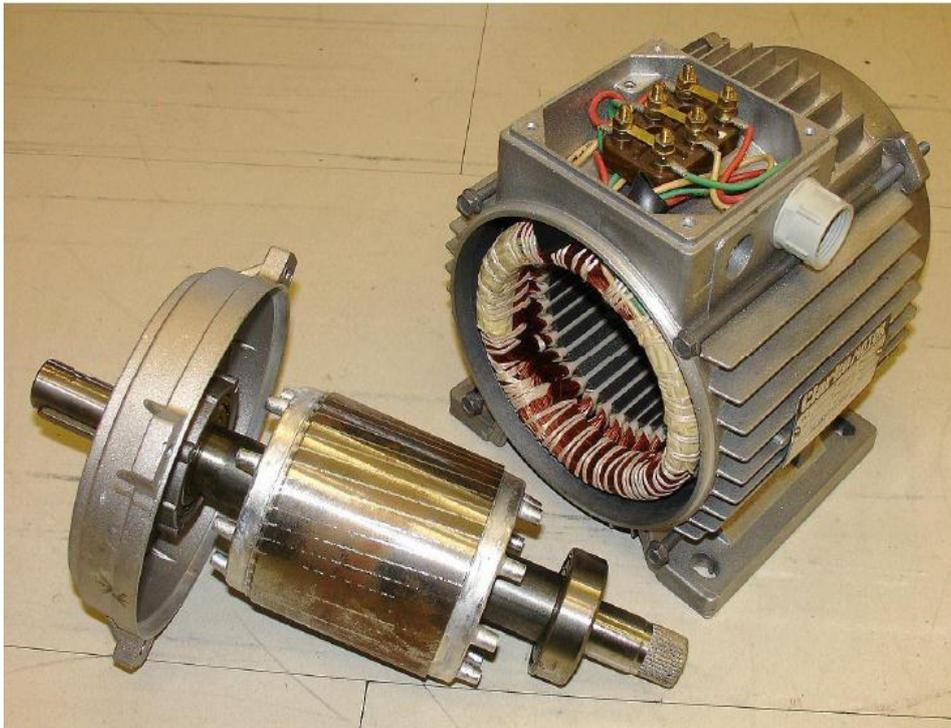


Figure I.1. Photo d'éléments d'une machine asynchrone

I.2.1 Éléments constitutifs de la machine asynchrone

Le sujet de notre étude est basé sur la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. La connaissance de ses éléments de constitution permet de voir de quelle façon le système est réalisé, et de quelle manière ses défaillances sont parvenues.

Du point de vue mécanique, la machine asynchrone se décompose en trois parties distinctes tel que :

- Le stator : partie fixe, connectée au réseau d'alimentation.
- Le rotor : partie mobile entraînant la charge mécanique.
- Les paliers : ils permettent la mise en rotation de l'arbre moteur.

I.2.1.1 Le stator

Le stator d'une machine asynchrone, également appelé l'inducteur, est constitué généralement de trois phases (composées elles-mêmes de bobines) alimentées par un système de tension triphasée de fréquence f . Celui-ci possède un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches dans lesquelles viennent se loger les enroulements. Le cylindre ferromagnétique est fabriqué par un empilement de plaques de tôles feuilletées et entaillées d'encoches afin de réduire l'influence des courants de Foucault. Le bobinage statorique peut être caractérisé par ses conducteurs d'encoches et ses têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches sont à l'origine de la création du champ magnétique dans l'entrefer et les têtes de bobines ferment les courants circulants dans la bobine afin d'assurer le circuit fermé des enroulements, et par

conséquent, la circulation du courant d'un conducteur d'encoche à un autre [2].

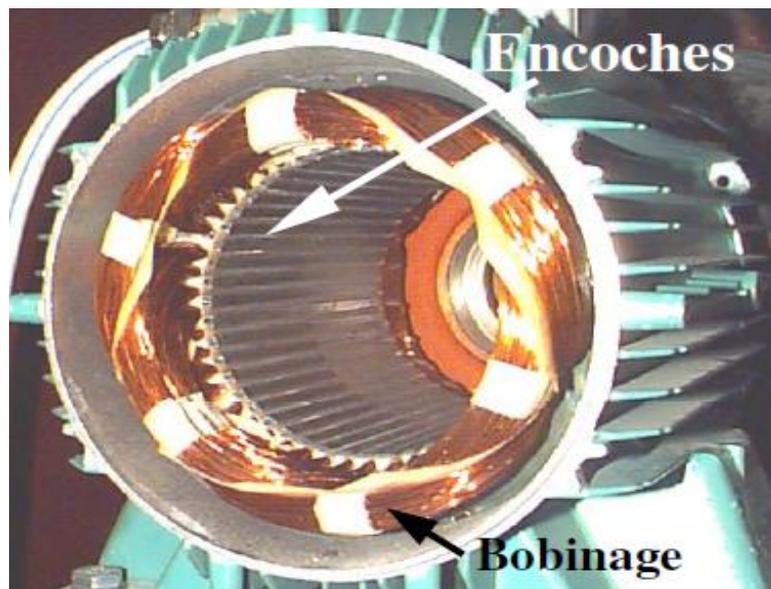


Figure I.2. *Photo du stator*

I.2.1.2 Le rotor

Le rotor, également appelé l'induit, peut se présenter de deux manières différentes. En effet, il y a les rotors à cage d'écureuil et les rotors bobinés. Les machines asynchrones possédant les rotors à cage d'écureuil sont les plus répandues dans l'industrie. Ceux-ci sont constitués d'un empilement de tôles ferromagnétiques cylindriques entaillées d'encoches (appelée feuilletage). Ces encoches servent à l'injection de matériaux conducteurs (alliage d'aluminium, en cuivre ou encore en laiton) afin de réaliser les barres rotoriques (similaire aux conducteurs d'encoche pour le stator) et les anneaux (similaire aux têtes de bobines au stator). Les barres et les anneaux sont ainsi connectés entre eux et constituent un circuit fermé ou un court-circuit [2].

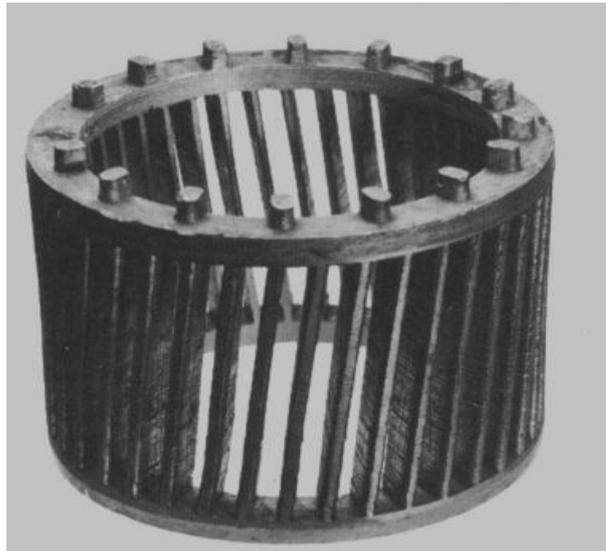


Figure I.3. *Photo d'un rotor à cage d'écureuil*

I.2.1.3 Les paliers

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer le guidage en rotation de l'arbre. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixes sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone [3].

I.3 Présentation des différents défauts dans la machine asynchrone

Vu sa grande solidité et son faible coût, la machine asynchrone reste l'élément le plus utilisé dans l'industrie, et omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie. Malgré toutes ses aptitudes, un certain nombre de défauts et de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent restreindre la durée de vie de celui-ci, en faisant apparaître des défaillances dans le stator et le rotor. Ces défaillances peuvent provoquer par la suite des pannes, ainsi des pertes économiques considérables, il est donc primordial de mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts inattendus.

I.3.1 Définition

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines divers, électrique, mécanique ou bien encore magnétique. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes [4] :

- Les générateurs de pannes ou initiateur des pannes : surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation

électrique, usure des éléments mécaniques (roulement à billes), ... Etc.

- Les amplificateurs de défaut : surcharge fréquente, vibration mécanique, environnement humide, échauffement permanent, mauvais serrage, vieillissement, ... Etc.

- Les vices de fabrication et les erreurs humaines : défaut de fabrication, composants défectueux, protection inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, ...

Ces défaillances de la machine asynchrone peuvent être la conséquence de différents types de défauts, on classe ces derniers en deux catégories :

- Défauts externes : ceux qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieure, affectants ainsi la machine.
- Défauts internes : ceux qui se produisent à l'intérieure de la machine, conséquence d'un ou des problèmes qui se développent dans celle-ci.

I.3.2 Classification des défauts

Lorsqu'on parle des défaillances de la machine asynchrone, il est important de noter que cette machine n'est qu'un seul composant du système global. De multiples facteurs qui peuvent endommager partiellement ou entièrement la machine ou bien le système.

Les défauts peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories : interne et externe. Les défauts internes sont provoqués par les constituants de la machine (bobinages du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc.). Les défauts externes sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine [5].

De ce fait, on peut classer les défauts dans les machines asynchrones en deux catégories : les défauts qui se produisent dans la chaîne d'entraînement à l'extérieur (externe) de la machine et les problèmes qui se développent à l'intérieur (interne). Ce tableau ci-après résume les types de défauts avec leurs origines.

Tableau I.1. Principaux défauts des machines électriques [5]

Défaillances des machines électriques	internes	Mécanique	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Electrique	Mouvement des enroulements et des tôles
			Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture des barres
	externes	Mécanique	Défaillances au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Electrique	Défaut de montage
			Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
		environnementales	Réseau bruité
Humidité			
		Température	

I.3.3 Quelques statistiques

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 montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et le reste (18% dans les autres régions de la machine telles que les roulements, les borniers,...etc [5].

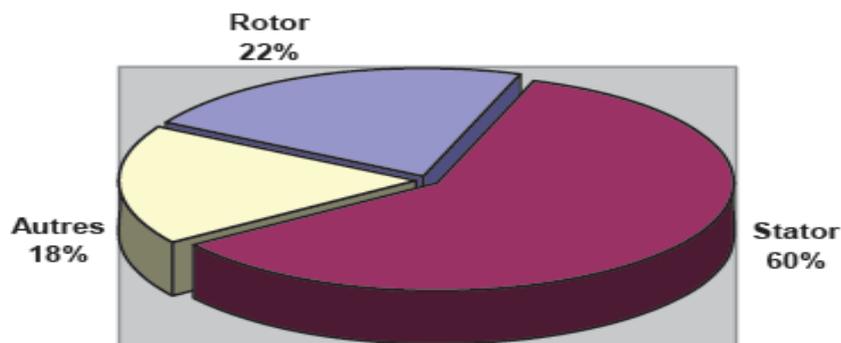


Figure I.4. Proportion des défauts dans les machines asynchrones

D'autre part, les mêmes études montrent qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période. La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur est donnée sur la figure suivante [4] :

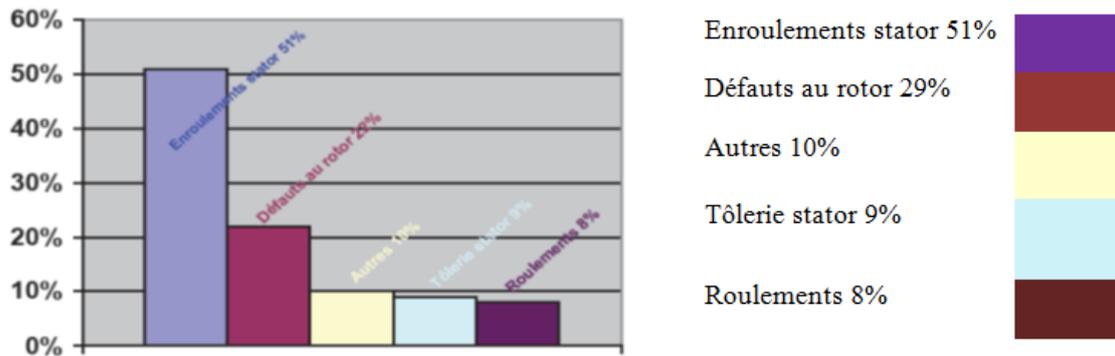


Figure I.5. Répartition des pannes sur les machines asynchrone [4]

I.3.4 Défauts mécaniques

Le pourcentage le plus élevé de défauts de la MAS est celui des défauts mécaniques. Ces défauts peuvent être des défauts de roulements, des défauts d'excentricité, etc.

I.3.4.1 Défauts de roulements

Les défauts de roulements sont la cause la plus fréquente de défauts dans les moteurs asynchrones, ce qui est de 40 % des défaillances totales du moteur à induction. Ils peuvent être classés en 3 types différents, qui sont [6]:

- Un défaut de la cage interne.
- Un défaut de la cage externe.
- Un défaut de billes.

Les défauts de roulements sont généralement détectés en analysant l'amplitude des composants de la fréquence de défaut de roulement, pendant le fonctionnement en régime permanent, où les amplitudes des composants ont tendance à augmenter à mesure que la gravité de défaut augmente.

Les défauts de roulement peuvent se manifester comme des défauts de l'asymétrie du rotor. Ils sont généralement classés dans la catégorie des défauts liés à l'excentricité, or les défauts liés aux roulements à billes peuvent se manifester aux fréquences de vibrations [7]:

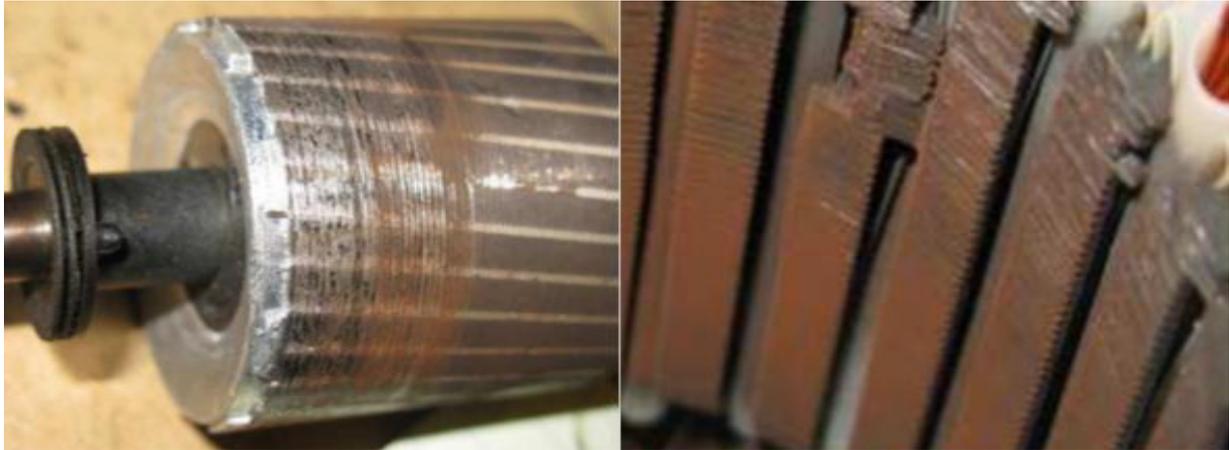


Figure I.6. Image montrant l'effet du défaut de roulement

I.3.4.2 Défauts d'excentricités

Il existe deux types de défauts d'excentricité associés aux moteurs à induction : l'excentricité statique et l'excentricité dynamique. Quand l'excentricité est statique, l'épaisseur d'entrefer entre le stator et le rotor varie, mais la position de l'entrefer minimum reste fixe. L'excentricité dynamique (DE) existe lorsque l'axe de rotation coïncide avec l'axe du stator mais pas avec l'axe du rotor, l'emplacement de l'entrefer minimum change alors avec la position angulaire du rotor et tourne avec lui. Pour l'excentricité mixte (ME), les deux défauts (SE) et (DE) sont présents en même temps et l'axe de rotation est différent des deux axes du stator et du rotor [6].

➤ **Excentricité statique**

Peut-être causée par des défauts de fabrication du noyau du stator (c'est-à-dire de forme ovale) et les problèmes d'installation, où le rotor peut ne pas être monté exactement dans le centre du stator.

➤ **Excentricité dynamique**

Peut-être causée par des défauts de fabrication du rotor, où le diamètre du rotor n'est pas concentrique avec le centre de l'arbre, et les problèmes de roulement, où il pourrait y avoir un mouvement radial dans le roulement dû à des défauts d'usure ou de fabrication. Quand l'excentricité est dynamique, la différence d'entrefer entre le stator et le rotor varie mais la position de l'entrefer minimum tourne avec le rotor.

La présence de l'excentricité se manifeste par l'apparition d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences (f_{ecc}) données par l'expression ci-dessous :

$$f_{ecc} = f_1 [(K n_b \pm n_d)(1 - g) / p \pm v] \quad (1.3)$$

Avec $k=1,2,3,\dots$, f_1 : la fréquence d'alimentation, n_b : le nombre des barres rotoriques et 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, g : le glissement, p : le nombre de paires de pôles et v : l'ordre des harmoniques de temps de la f.m.m, ($v=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7,\dots$ etc.).

➤ **Excentricité mixte**

En présence d'excentricités statique et dynamique, c'est à dire une excentricité mixte, il y aura une apparition des harmoniques de basses fréquences (f_m) et de la fréquence de la fondamentale donnée par la relation ci-dessous :

$$f_m = |f_1 \pm k f_r| \quad (1.4)$$

Avec $k=1,2,3,\dots$ et $f_r=f_1(1-g)/p$. et f_1 : est la fréquence fondamentale

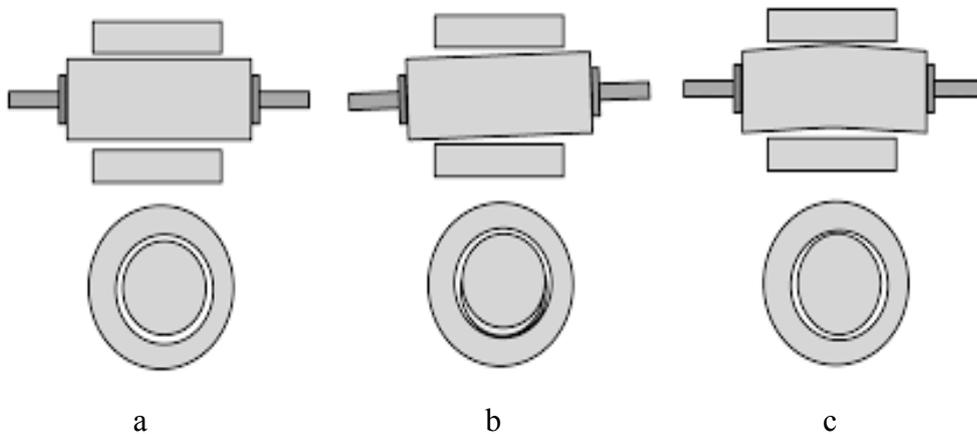


Figure I.7. Différents défauts d'excentricités : a) Statique ; b) dynamique ; c) mixte

I.3.5 Défaillances au stator

L'armature statorique, munie de son bobinage est une partie de la machine qui subit beaucoup de contraintes et dont les effets sont plus importants à cause de la complexité de la structure et la fragilité de certaines parties telles que les isolants [5].

Pour le stator les défauts qui sont les plus fréquents, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre

phase et bâti, déséquilibre d'alimentation, défaut de circuit magnétique.

I.3.5.1 Défauts d'isolant dans un enroulement

L'augmentation de la température des différents constituants du moteur, engendré par les différentes pertes Joule, fer, mécanique, peut causer la dégradation des isolants dans les enroulements. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase - masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts [4].

I.3.5.2 Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase 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 [3], et il a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans cet enroulement concerné.



Figure I.8. Image illustrant l'effet du Court-circuit entre spires

I.3.5.3 Court-circuit entre phases

Le court-circuit entre phases apparaît préférentiellement dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient.

Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant, un court-circuit entre une phase et le neutre (via la carcasse) ou entre spires d'une même phase. Il conduit à un déséquilibre de phases, ce qui a une répercussion directe sur le couple [3].

I.3.6 Défaillances au rotor

Un rotor bobiné peut être affecté par les mêmes défauts que le stator. Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit

I.3.6.1 Ruptures de barres

Ces ruptures de barres peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, . . .), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures). Ce défaut fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande (vitesse constante). Lorsque l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statorique [3].

I.3.6.2 Ruptures d'anneaux

La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. En fait les cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotorique. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et donc des courants peuvent entraîner leur cassure [3].

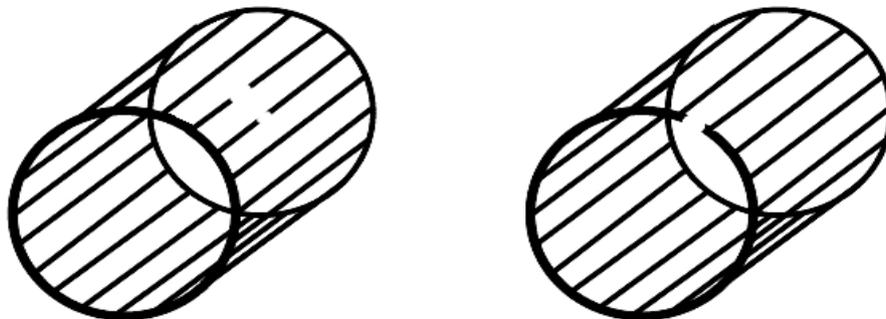


Figure I.9. Rupture d'anneau de court-circuit et les cassures de barres

I.3.7 Conséquences des défauts

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts [8] :

- Effectuassions au niveau du couple et de la vitesse
- Appel supplémentaire de courant
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent le rendement global

I.4 Définition du diagnostic

I.4.1 Définition

La norme AFNOR et CEI définit le diagnostic par : « L'identification de la cause probable de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test » [9].

Suivant cette définition, on définit deux tâches essentielles du diagnostic :

- Observer les symptômes de la défaillance.
- Localiser et identifier la cause de défaillance à l'aide d'un raisonnement logique.

I.4.2 Objectifs

La raison d'existence du diagnostic est la défaillance. Sa finalité n'est autre que la nécessité des systèmes efficaces, sûrs, fiables et robustes face aux diverses contraintes qu'ils subissent.

I.4.3 Terminologies et concepts relatifs au diagnostic

Le tableau donne la définition normalisée de quelques termes couramment utilisés dans le diagnostic [10].

Tableau I.2. *Quelques termes et concepts souvent utilisés dans le diagnostic*

Terme	Définitions
Un défaut	Est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications. Les défauts sont classifiés d'une façon similaire aux défaillances.
Une défaillance	Est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques.
La panne	Est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Une panne résulte toujours d'une défaillance.
Un symptôme	Est caractère distinctif d'un état fonctionnel ou comportemental anormal.
La surveillance	Est une tâche continue, réalisée en temps réel, qui permet de déterminer l'état d'un système physique, elle consiste en l'enregistrement des informations ainsi qu'en la reconnaissance et l'indication des anomalies du comportement.
Un résidu	Est un signal conçu pour être un indicateur d'anomalies fonctionnelles ou comportementales, nul en absence de défauts et non nul en leur présence.
La sensibilité	Représente la capacité d'un système de diagnostic à générer des résidus sensibles aux défauts à détecter.

I.4.4 Etapes du diagnostic de défaut

Le diagnostic est une phase très importante de la maintenance corrective, son lancement sur un équipement, nécessite le suivi d'une chaîne d'étapes successives que se soient :

La Détection

Cette opération permet de décider si le système est en fonctionnement normal ou non.

- Probabilité de fausse détection : conduit à des arrêts ou des reconfigurations inutiles.
- Probabilité de non détection : peut conduire à une panne intolérable dans les

systèmes à haute niveau de sécurité (aéronautique, nucléaire, ...etc.) [10].

La Localisation

C'est l'identification de l'élément qui a causé le défaut. Parfois il est impossible de localiser les interactions entre les composants du système et l'instrumentation. La solution est d'isoler un sous-système comportant des composants susceptibles de contenir le ou les défauts [10S].

L'identification

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et déterminer les causes qui ont engendré la défaillance constatée [11].

1.4.5 Intérêt du diagnostic

Pendant leurs fonctionnements, les moteurs peuvent être exposés à différents environnements hostiles ou avoir des défauts de fabrications. Les différents défauts internes du moteur (par exemple, court-circuit des fils de moteur, les courts circuits entre spires, roulements cassés, excentricité du rotor, ruptures de barres au rotor), et les différents défauts externes du moteur (par exemple, coupure de phase, surcharge mécanique, rotor bloqué, surcharge électrique) peuvent se produire tôt ou tard. En outre, la grande variété des environnements et conditions auxquels sont exposés les moteurs accélère leur vieillissement et les assujettis aux défauts prématurés et évolutifs. Ces types de défauts se rapportent habituellement à la détérioration progressive de la machine qui peut mener à l'arrêt de celle-ci s'ils ne sont pas détectés au moment opportun [11].

I.5 méthodes de diagnostic de la MAS

L'approche traditionnelle consiste à ajouter des capteurs pour obtenir des informations supplémentaires sur l'état du système : c'est la redondance matérielle. L'inconvénient principal est le coût additionnel en équipement et en maintenance. Par opposition la redondance analytique consiste à développer des algorithmes de détection et localisation des défauts en utilisant les mesures disponibles sur le système. Ces algorithmes peuvent être ou non basés sur un modèle du système. Ils doivent bien sûr tenir compte des variations normales du comportement du système, des bruits de mesures, des perturbations externes. Ainsi que des erreurs de modélisation, pour éviter les fausses alarmes ou les manques à la détection.

I.5.1 Méthodes sans modèle

Les méthodes sans modèle supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit la machine

lors de son fonctionnement.

I.5.1.1 Diagnostic par mesure du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) [12].

I.5.1.2 Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans la machine, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique [12].

I.5.1.3 Diagnostic par analyse du vecteur de Park

Deux versions d'analyse par cette méthode à savoir : La première utilise les grandeurs biphasées $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$, qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de Lissajous : $i_{s\beta} = f(i_{s\alpha})$. 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 Etendu, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statorique ou rotorique et même les défauts de roulement [3] [13].

I.5.2. Methodes avec modèle

Cette méthode est basée sur l'estimation des signaux non mesurables ou sur le suivi des paramètres durant le fonctionnement. Elles supposent une connaissance approfondie du procédé sous forme de modèle numérique. Dans le cas de la machine asynchrone, une modélisation dans le référentiel triphasé ou biphasé équivalent est nécessaire.

I.5.2.1 Estimation paramétrique

Ce modèle est essentiellement basé sur l'hypothèse qu'un défaut se traduit par la variation de l'état paramétrique de la machine. Le suivi de l'évolution de ces paramètres caractéristiques donne une image sur la nature du comportement de la machine. Cette méthode est alors un bon moyen pour surveiller le système et d'alerter en cas de fonctionnement hors normes.

La première étape est donc, l'élaboration d'un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés, pour qu'on puisse les détecter et les localiser [14].

I.5.2.2 Diagnostic à l'aide des observateurs

Le principe de cette méthode est d'utiliser les erreurs d'estimation sur les sorties comme résidus. L'objectif est de construire des résidus structurés c'est-à-dire menant à la localisation des défauts. Dans certains cas l'utilisation de plusieurs observateurs, mis en batterie, peut être nécessaire pour garantir la localisation des défauts [15].

I.6 Conclusion

Nous avons montré que les principaux éléments de constitution d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil peuvent présenter des défaillances qui induisent un arrêt intempestif de la machine. C'est pour remédier ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels. Beaucoup de techniques de diagnostic développées qui consistent à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance et de se prémunir des arrêts imprévisibles d'équipements.

La connaissance des éléments de construction de la machine asynchrone à cage permet de trouver un modèle dédié à la simulation donnant ainsi une image approximative de l'état de la machine lors de ses régimes de fonctionnement sain et avec défaut, c'est ce que nous verrons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II
Modélisation et
Simulation de la
Machine
Asynchrone
En état sain

CHAPITRE II : Modélisation et simulation de la machine asynchrone en état sain

II.1 Introduction

La modélisation des machines électriques tournantes est une phase primordiale pour le diagnostic des défauts. Elle est d'un apport précieux dans le domaine de l'étude des 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 conditions de fonctionnement différentes. La modélisation se fait par plusieurs méthodes, et nous choisirons la méthode des éléments finis, la simulation se fait par le logiciel Flux 2D[®].

II.2 Méthode des éléments finis

La méthode à éléments finis MEF est une approche qui nécessite un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de faibles dimensions pour permettre de considérer que le matériau magnétique est linéaire sur les surfaces correspondantes.

L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée. De nombreux logiciels ont été développés à cet effet, tel que le Flux 2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but de ces logiciels est de déterminer la cartographie du champ magnétique présent dans les machines électriques afin d'optimiser leurs dimensionnements [10].

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 :

- Les relations de couplage électromagnétique :

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

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

- 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 :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

Où,

\vec{H} : Le champ magnétique (A/m)

\vec{E} : Le champ électrique (V/m)

\vec{B} : L'induction magnétique (T)

\vec{J} : La densité du courant total (A/m²)

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique (Ω⁻¹/m⁻¹)

ϵ : Permittivité électrique [F/m]

ρ : Densité de charge volumique [C/m³]

II.2.1 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.

Le système à résoudre est donc :

$$\overrightarrow{rot}(v.\overrightarrow{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \overrightarrow{rot} \vec{B}r + \overrightarrow{\sigma grad} V = 0 \quad (\text{II.8})$$

Avec $\vec{B}r$: Induction rémanente des aimants (T)

\vec{A} : Vecteur potentiel magnétique (T.m)

V : Potentiel scalaire magnétique (T.m)

ν : Réflectivité magnétique (H^{-1}/m^{-1})

II.3 Présentation et structure du logiciel de résolution Flux 2D[®]

Le Flux 2/3D est développé (en collaboration avec le G2ELab, fusion du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, du Laboratoire d'Électrostatique et Matériaux Diélectrique et du Laboratoire de Magnétisme du Navire) et distribué en France par la société CEDRAT S.A. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits [16].

Flux2D[®] est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos. 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 [16].

Les principaux modules permettant la simulation de tous systèmes physiques à l'aide de FLUX 2D sont présentés :

➤ **Module Construction**

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier (**geometry & physics**), de choisir et de construire une banque de matériaux (**Materials database**) et de définir le schéma et les données du circuit électrique (**Circuit**).

➤ **Module Solving Process**

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

➤ **Module Analysis**

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.

II.4 Etapes de création d'un modèle sain de la MAS à cage d'écureuil avec Flux 2D

Pour notre modèle on veut créer une MAS à cage d'écureuil dans un état sain, pour cela on doit passer par ces étapes :

II.4.1 Construction géométrique

La première étape pour construire une MAS, est de créer une entité stator qui est fixe et une entité rotor mobile. Chaque pièce créée, doit être affectée vers l'une de ces deux entités ou la laisser aire ou vide.

Le stator contient des encoches où sont enroulés les 3 conducteurs bobinés en cuivre.

Dans notre modèle, le rotor est avec un moment d'inertie J de 0.04 Kg.m^2 entraînant une charge qui possède un couple résistant C_r de 15 N.m et d'un moment d'inertie de 0.002 Kg.m^2 . La cage d'écureuil composée de 28 barres en aluminium de résistivité très basse.

II.4.2 Génération du maillage

Pour simuler la MAS, il faut impérativement mailler le modèle créé.

II.4.3 Définition des propriétés physiques

On doit définir le matériau de chaque composant de la machine, le logiciel Flux 2D possède une liste de matériaux avec leurs caractéristiques. Pour le rotor et le stator sont en M270_35A, la cage d'écureuil est en aluminium et les conducteurs bobinés de l'alimentation sont en cuivre.

II.4.4 Résolution

Après la vérification du maillage et la vérification physique du modèle créée, on définit les paramètres de simulation que ce soit : le temps de résolution de 2 second avec un pas de 5.10^{-4} .

II.4.5 Exploitation des résultats

La dernière étape est l'exploitation des résultats obtenus du modèle sain de la MAS, deux types de résultats : résultats graphiques où on trouve les propriétés magnétiques et physiques de la machine comme la distribution du champ magnétique et la vitesse de rotation, et aussi les résultats numériques qui donnent des chiffres exactes sur les grandeurs mises à calculer.

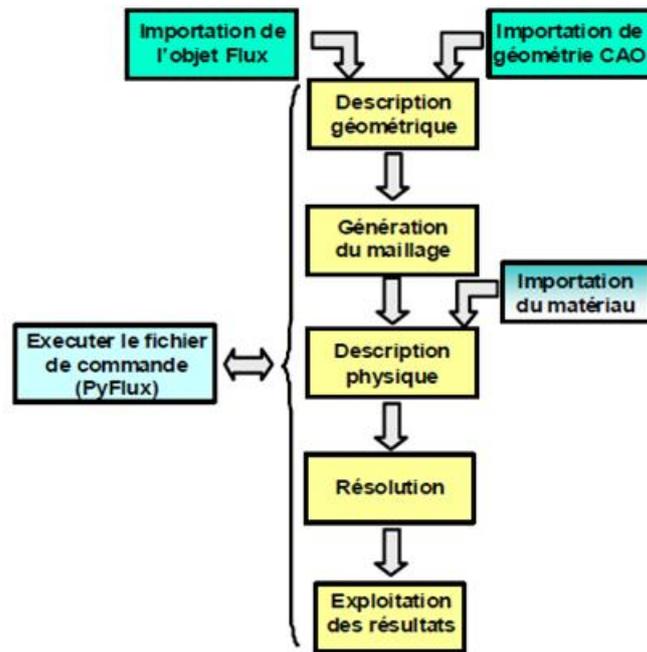


Figure II.1 Enchaînement des étapes dans Flux 2D®

II.5 Application à la simulation de la machine asynchrone

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

Tableau II.1. Caractéristiques de la machine

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Machine	Puissance nominale	2.2	kW
	Tension nominale	220	V
	Vitesse nominale	1480	tr/min
	Nombre de pôles	4	
	Fréquence	50	Hz
	Longueur active	120	Mm
	Nombre de phases	3	

Stator	Type de connexion	Y	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	108.5	mm
	Diamètre externe	153	mm
Rotor	Diamètre interne	42	mm
	Diamètre externe	107.94	mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.28	mm
	Nombre de barres	28	

La géométrie de la machine étudiée est représentée dans la figure II.2 :

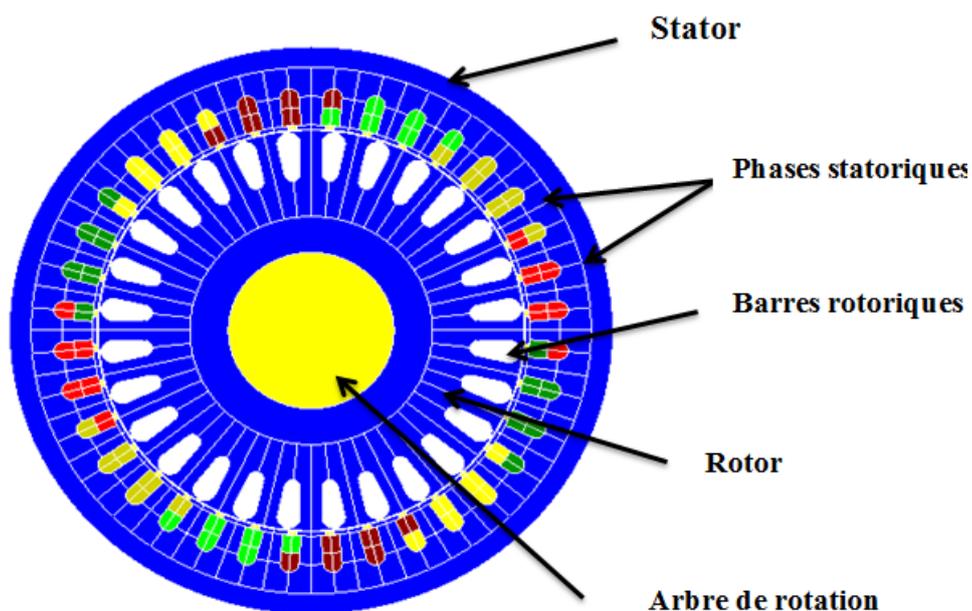


Figure II.2. Géométrie du modèle de la machine étudiée

La figure (II.3) représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

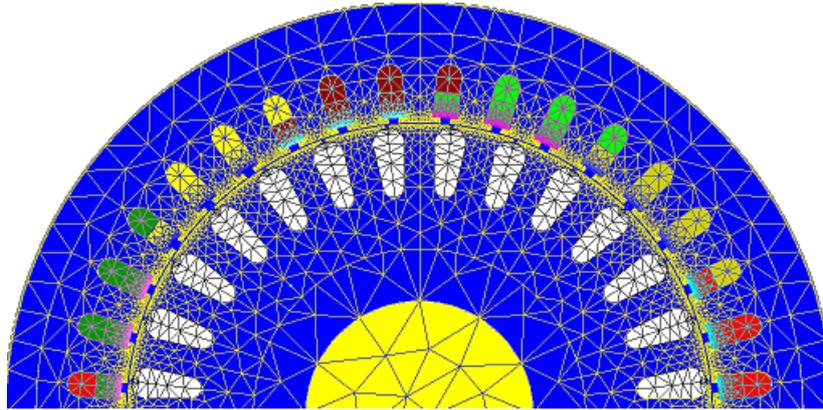


Fig. II.3: Répartition du maillage

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 les temps de calcul sans perte sensible d'information.

II.5.1 Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d' extrémité (inductance, résistance de tête de bobine et d' anneau de court-circuit). Le circuit électrique Figure II.4 représentant :

- Une source de tension triphasée d'alimentation : (U_a, U_b, U_c)
- Le bobinage statorique : (B_a, B_b, B_c)
- Les inductances de fuite (L_a, L_b, L_c)

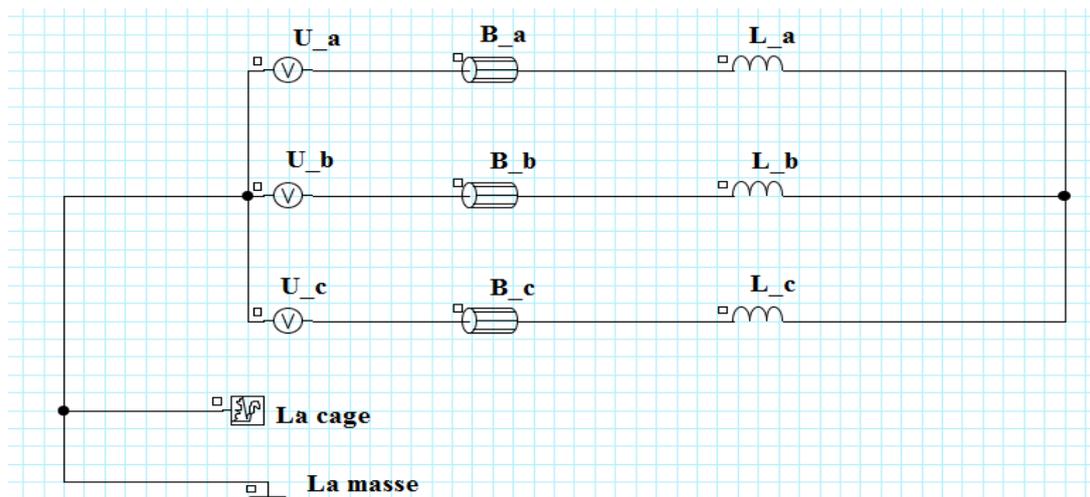


Figure II.4. Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie

II.6 Résultats de simulation

La machine est initialement couplée à une charge sous tension efficace de 220V après une simulation de deux secondes du fonctionnement de la machine sans défauts, on a obtenu les résultats présentés ci-dessous :

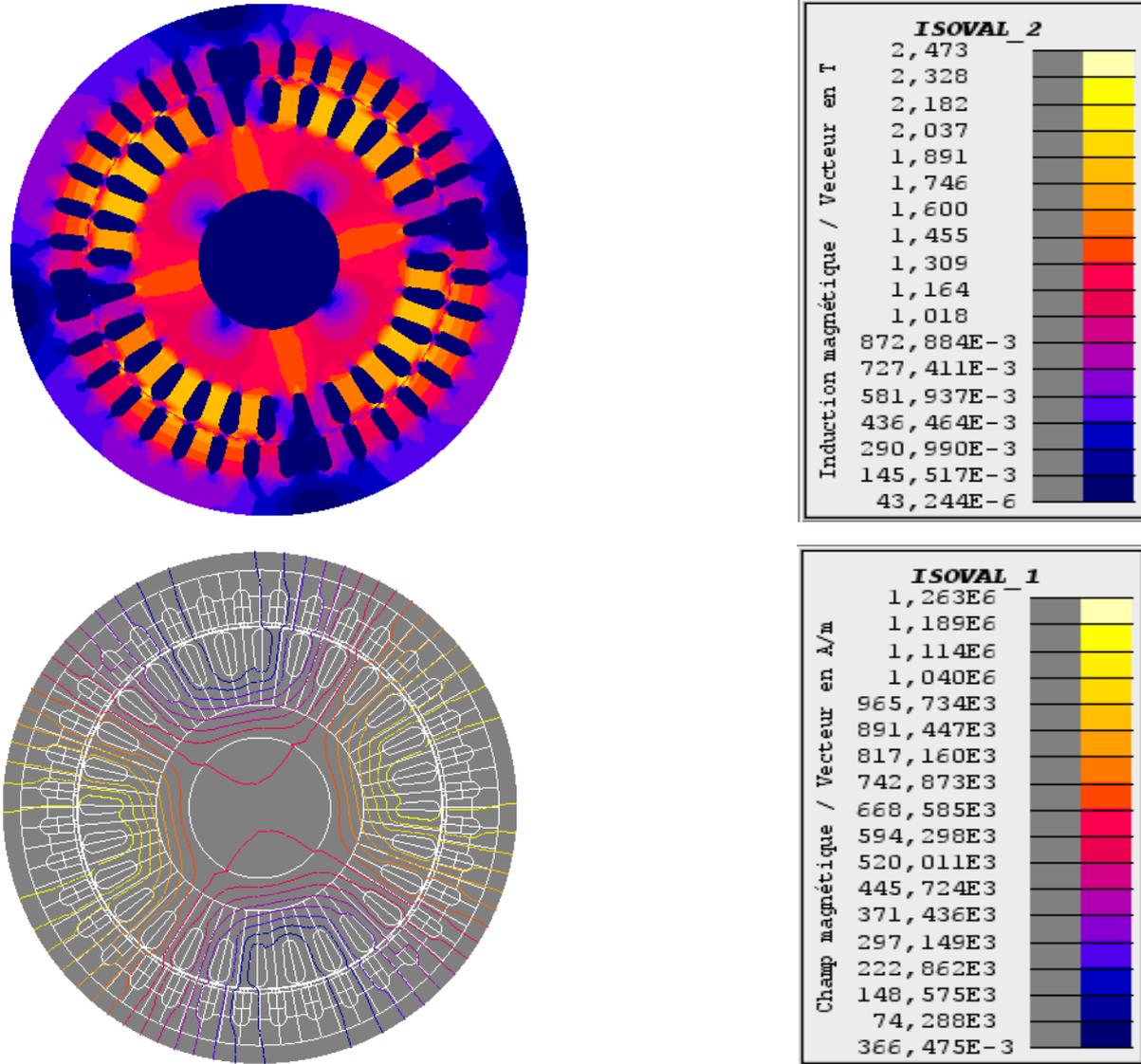


Figure II.5. Distribution des lignes d'induction et du champ magnétique

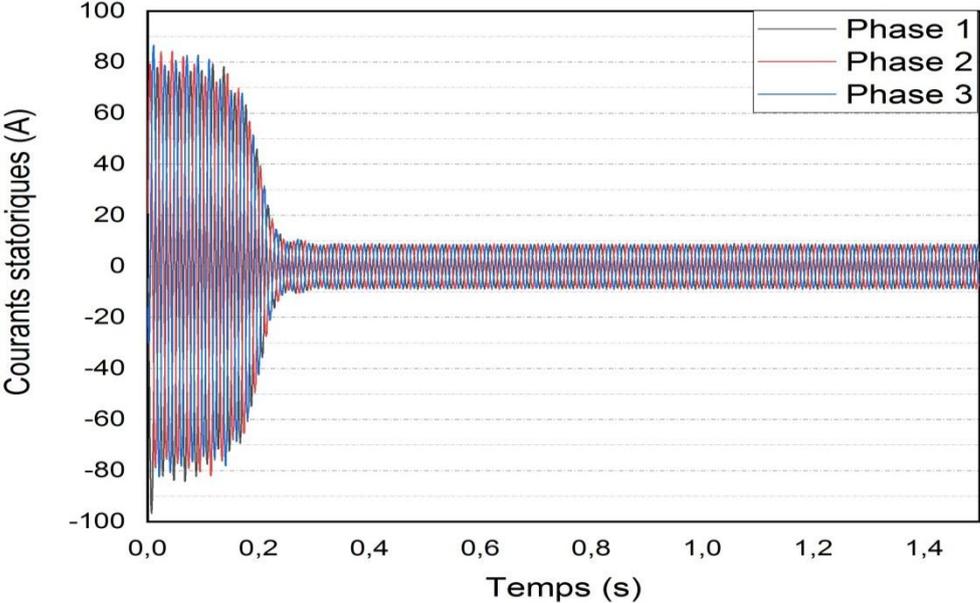


Figure II.6. Les trois courants statoriques d'alimentation

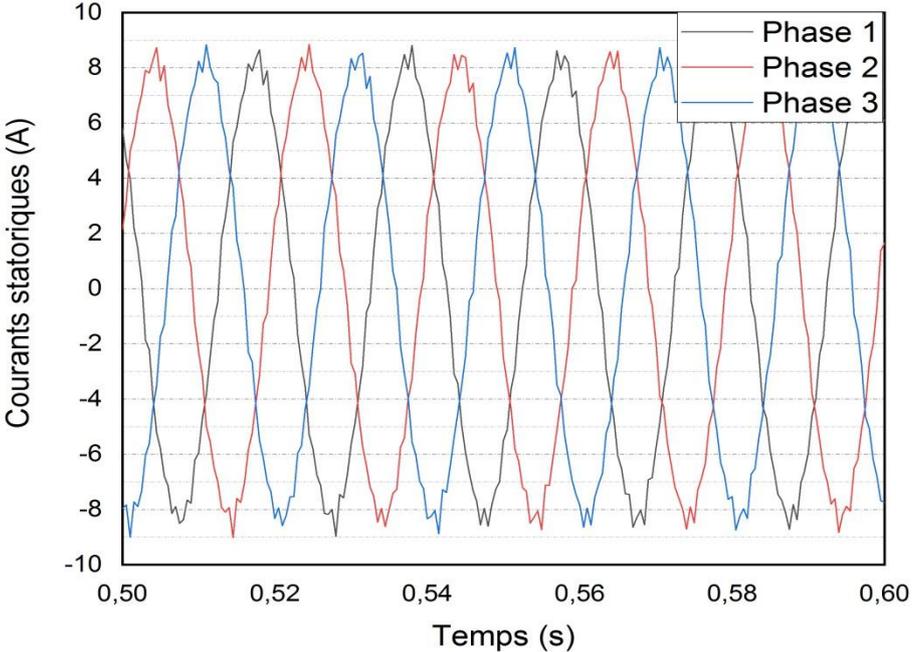


Figure II.7. Les trois courants statoriques d'alimentation en régime permanent

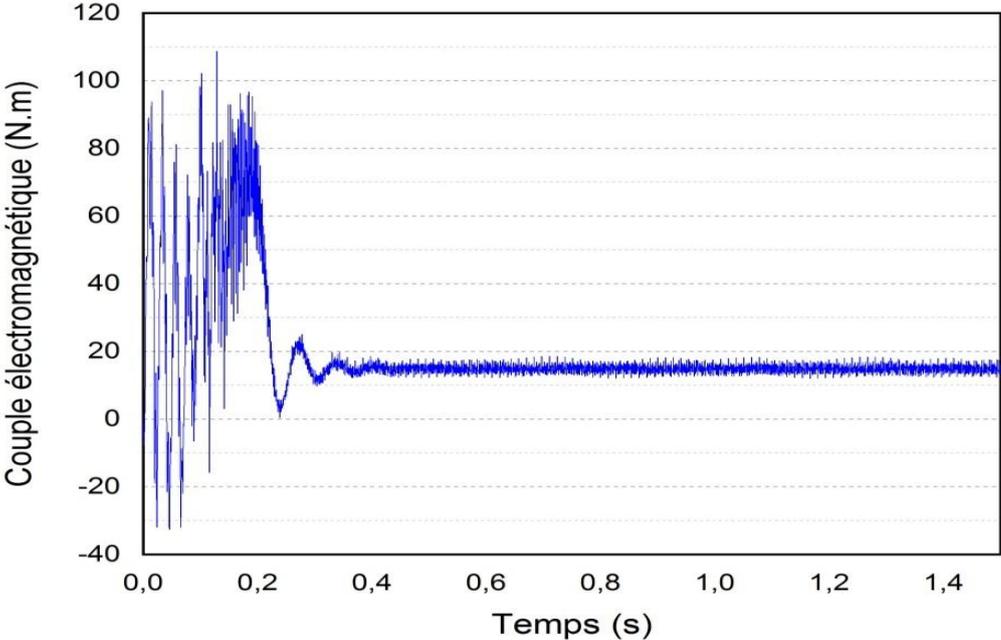


Figure II.8. Le couple électromagnétique fournit par la machine

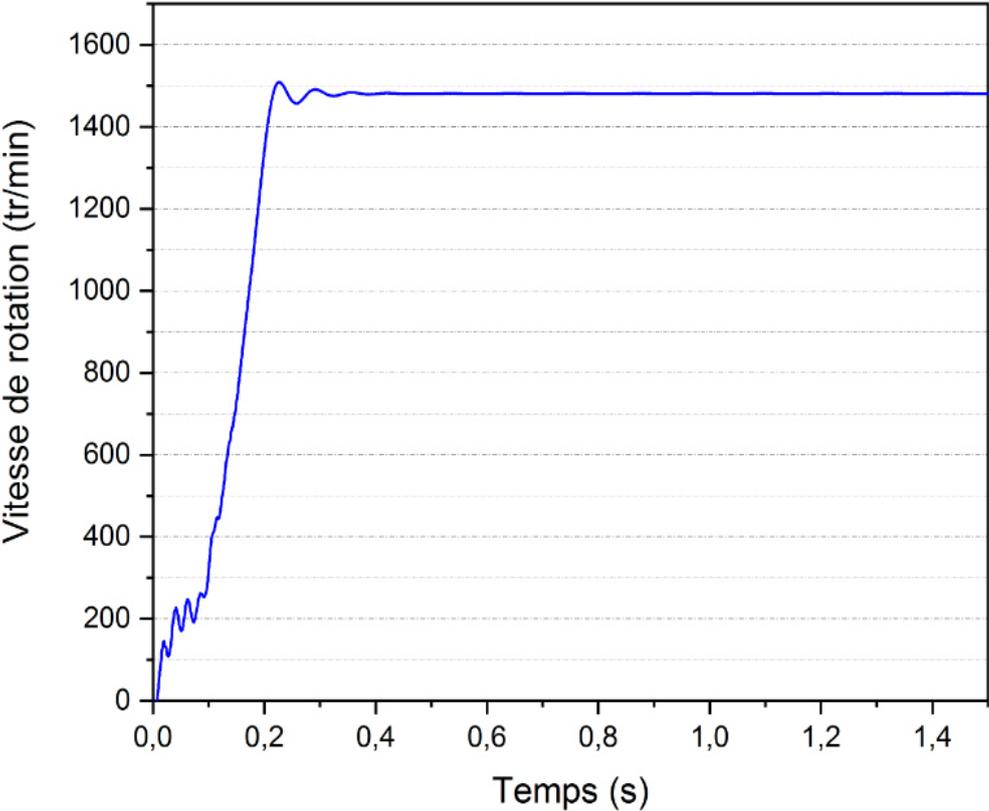


Figure II.9. Vitesse de rotation

II.6.1 Interprétation et analyses des résultats

La figure II.5 nous montre la distribution des lignes d'induction et du champ magnétique. On remarque que la répartition des lignes sont symétriques aux axes des poles de la machine.

La figures II.6 et la figure II.7 montrent que les courants sont déphasé entre eux de 120° l'un par rapport à l'autre, et aucune ondulation n'est y apparait, on constat que la machine est en fonctionnement normal. Après un régime transitoire de 0.25 second, les courants d'alimentation triphasé atteignent le regime permanent, avec une valeur efficace de 6.02A

La figure II.8 et II.9 présentent le couple et la vitesse de rotation. Le couple prend des valeurs tres importantes avec des fortes ondulations pondant le régime transitoir, et se stabelise à la valeur de 16.14 N.m en régime permanent. Des ondulations de vitesse qui apparait lors du démarrage causées par la charge entréné, et se stabelise à 1480 tr/min.

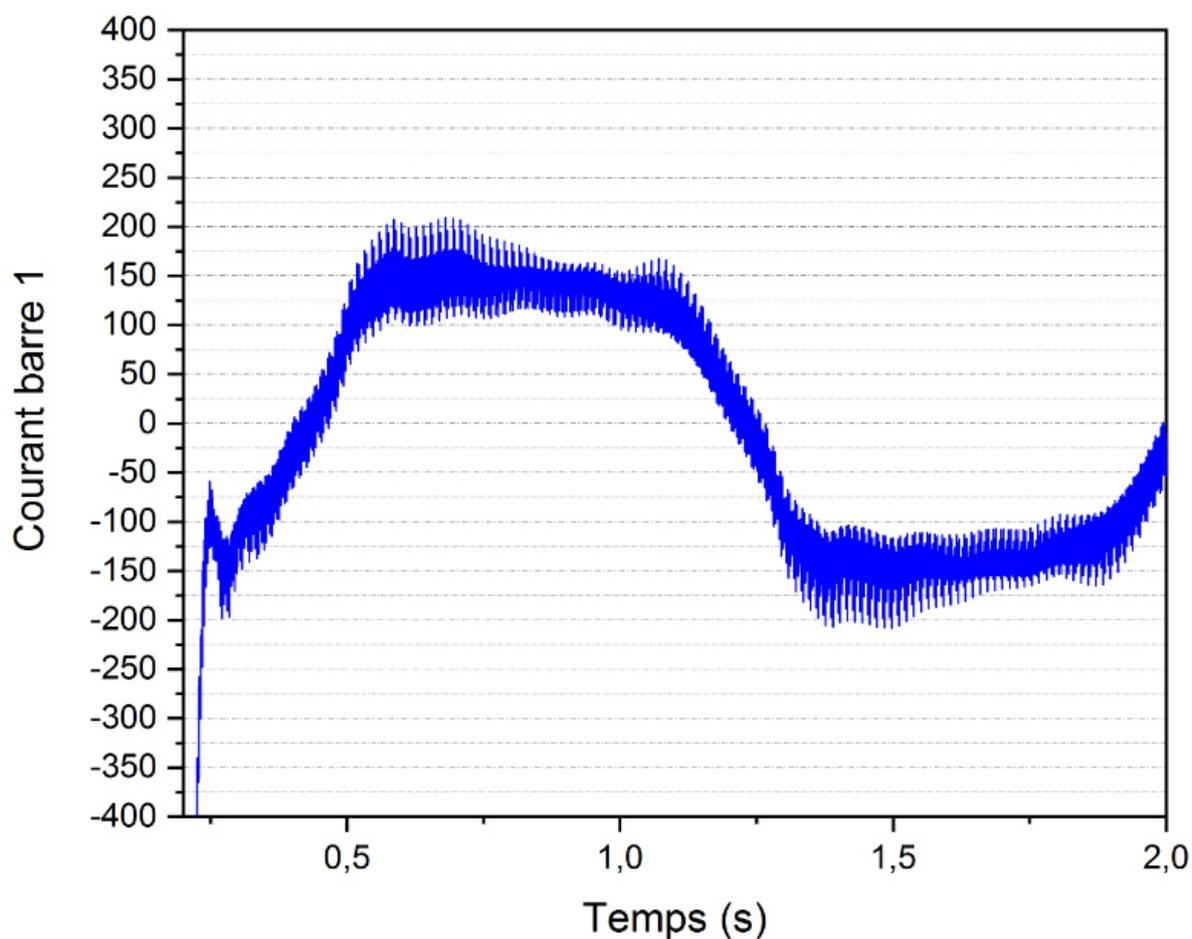


Figure II.10. *Le courant dans la première barre rotorique*

CHAPITRE II. Modélisation et simulation de la machine asynchrone en état sain

La figure II.10 montre le courant induit circulant sur la barre 1 de la cage, d'une valeur efficace de 142 A, et de fréquence qui vaut g.fs. Dans notre cas, le glissement est de 1.3% et la fréquence des courants rotoriques est de 0.665 Hz.

II.7 Conclusion :

L'utilisation du logiciel flux 2D nous a permis d'établir un modèle en éléments finis décrivant le fonctionnement réel de la machine asynchrone.

Grâce à ça, on a pu étudier dans ce chapitre le modèle sain de cette machine, et à partir des résolutions numériques et des différentes représentations. On a réussi à observer les caractéristiques et les performances d'une MAS dans un état normal.

La distribution des lignes de champs et de l'induction magnétique sont symétriques par rapport aux axes des pôles de la machine. Les courants statoriques sont équilibrés et n'ont aucune modulation. Les caractéristiques mécaniques de la machine, couple et vitesse, sont stabilisés.

Avec ses résultats obtenus, nous pourrions les comparer avec un modèle en état de défaut.

CHAPITRE III
Simulation et
Diagnostic de la
Machine
Asynchrone avec
Défauts

CHAPITRE III. Simulation et diagnostic de la machine asynchrone avec défauts

III.1 Introduction

La surveillance et le diagnostic des défauts de fonctionnement de tout système sont devenus incontournables en raison des contraintes croissantes imposées par les exploitants. Ces défauts sont essentiellement dus aux échauffements excessifs, à une fatigue causée par les forces électromagnétiques et les contraintes de l'environnement que doit subir la machine asynchrone pendant son usage. Les procédés de détection de ces défauts a fait une révolution dans les milieux industriels pour prévoir et apercevoir les moindres signes de défaillances, ce qui renvoie des intérêts économiques congédiables.

III.2 Simulation de la machine asynchrone avec défauts

Parmi les défauts les plus répandus dans les machines asynchrones, on cite les défauts de cassure des barres de la cage d'écureuil. Puisque les barres rotoriques sont des éléments de base de la construction de la machine, il est clair que leur rupture implique un fonctionnement anormal du système.

La simulation de ce défaut nous permet d'identifier les signatures de ces défauts et de prévoir les détériorations générées dans la machine. La simulation est faite sur une machine saine et avec des barres cassées d'une jusqu'à cinq barres adjacentes.

Pour modéliser les cassures de barres, nous avons affecté une valeur de résistance des barres suffisamment grande pour avoir un courant nul à travers les barres.

III.3 Résultats de simulation

Pour illustrer les cassures des barres dans le modèle de la machine, nous avons affecté une valeur quasi infinie à la résistance du matériau dont les barres sont construites.

Les résultats prélevés sur le modèle défectueux sont : Les courants statoriques, courants rotoriques, la vitesse de rotation, et les lignes du champ magnétique.

III.3.1 Analyse des résultats magnétiques

La figure III.1 montre la distribution des lignes du champ magnétique, et la figure II.2 montre la propagation du flux à l'intérieur de la machine dans le cas sain et avec défaut de cassure des barres.

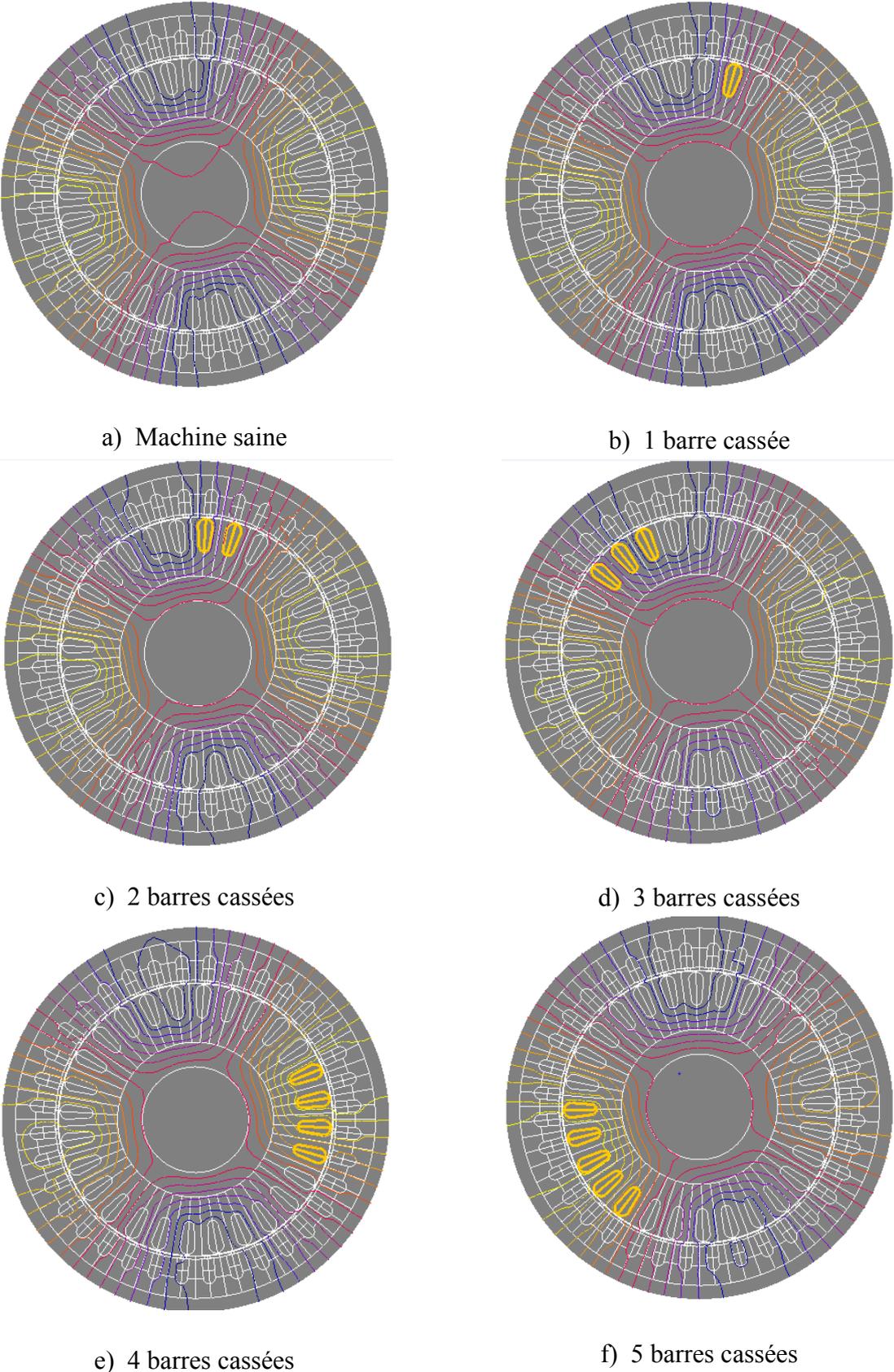


Figure III.1. *Distribution des lignes du champ*

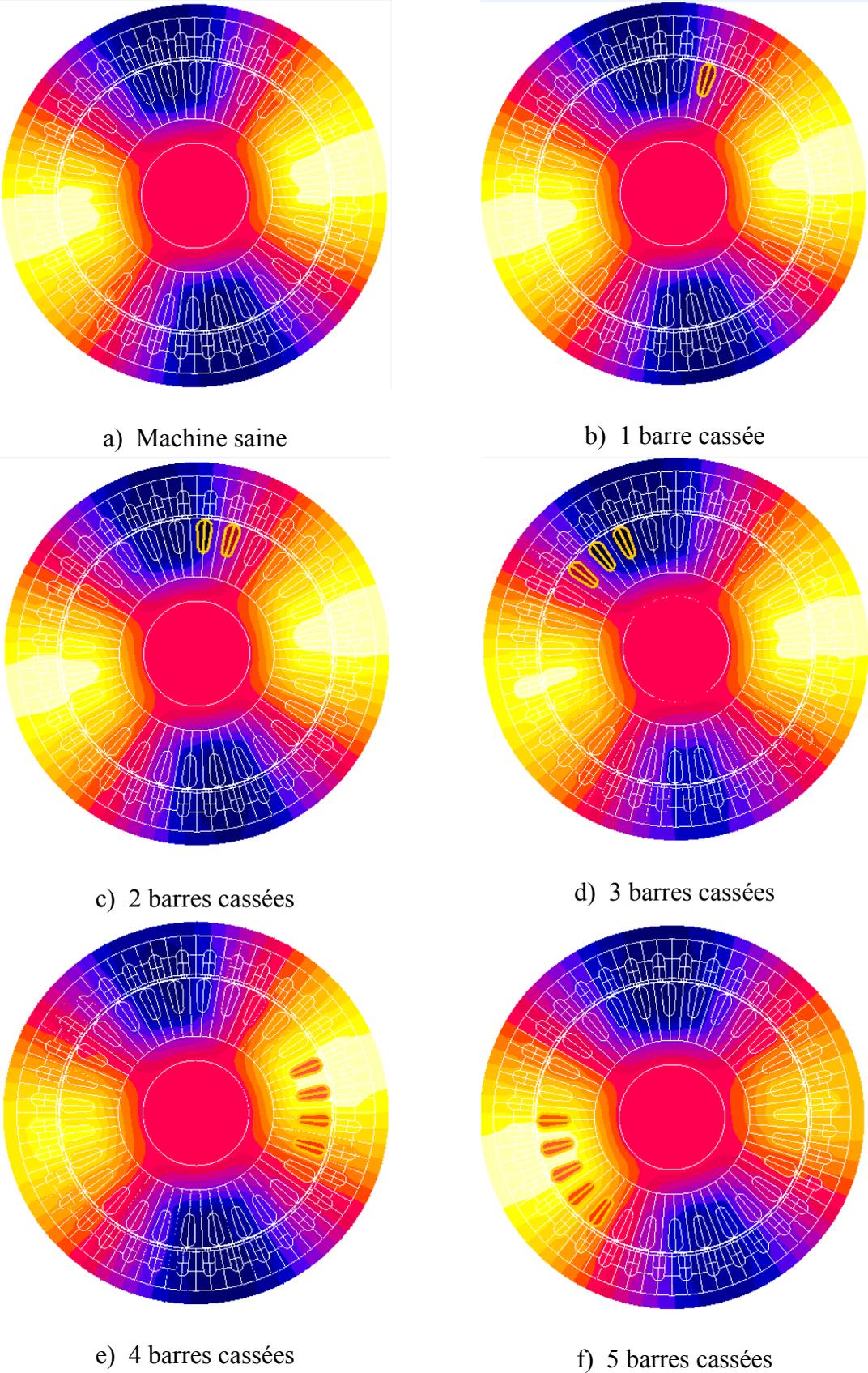
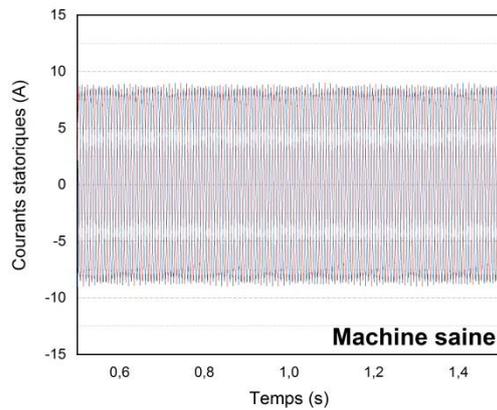


Figure III.2. Distribution du flux

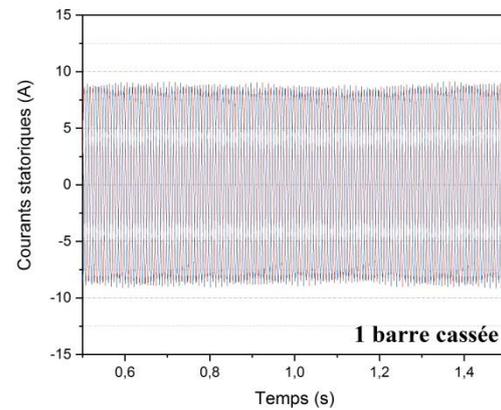
Dans les figures ci-dessus, on peut constater que dans le cas sain la répartition des lignes de champs sont homogènes et symétriques, tandis que dans le cas d'une cassure d'une barre ou plusieurs barres rotoriques, on observe une concentration du flux dans la région concerné par le défaut.

III.3.2 Analyse des courants de phases

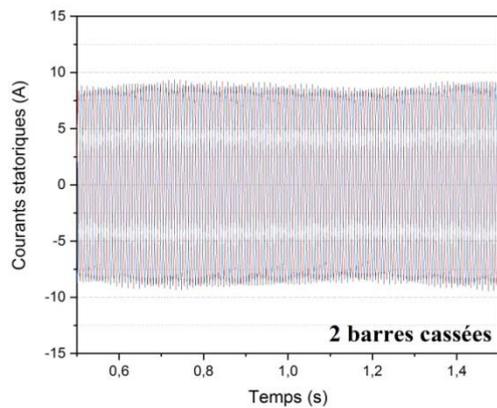
La figure suivante (III.3) montre les différentes formes des courants statoriques enregistrés en régime permanent pour le cas sain et en défaut. Les ruptures de barres ont des empreintes dans les signaux des courants statoriques. Elle se manifeste par l'injection des harmoniques dans le signal du courant d'alimentation de la machine.



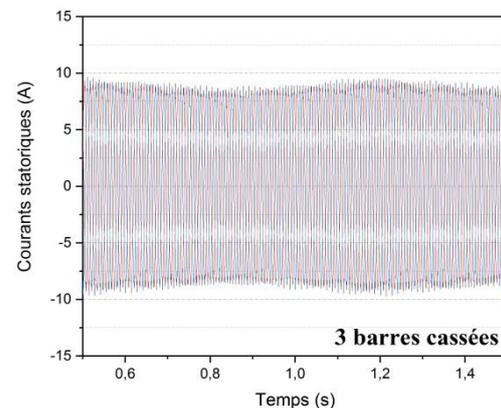
a



b



c



d

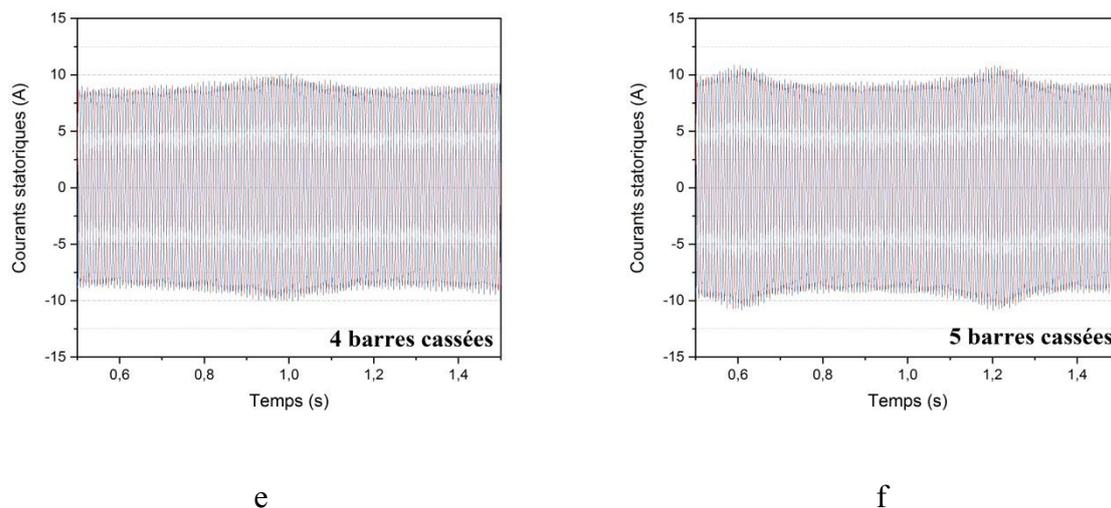


Figure III.3. Allures des courants statoriques

Dans le cas sain, le signal des courants statoriques est parfaitement équilibré, avec les ruptures des barres rotoriques, des modulations d'amplitude induites causées par le défaut. Cette modulation est importante quand le nombre de barres cassées est grand.

III.3.3 Analyse des courants rotoriques

L'une des particularités et avantage de la méthode des éléments finis réside dans la possibilité d'accéder et de calculer les courants circulant dans n'importe quelle barre. La figure III.4 représente l'évolution du courant dans les barres rotoriques qui se trouvent autour des barres cassées, dans notre cas, nous avons calculé les courants dans les quatre barres gauches et quatre barres à droite.

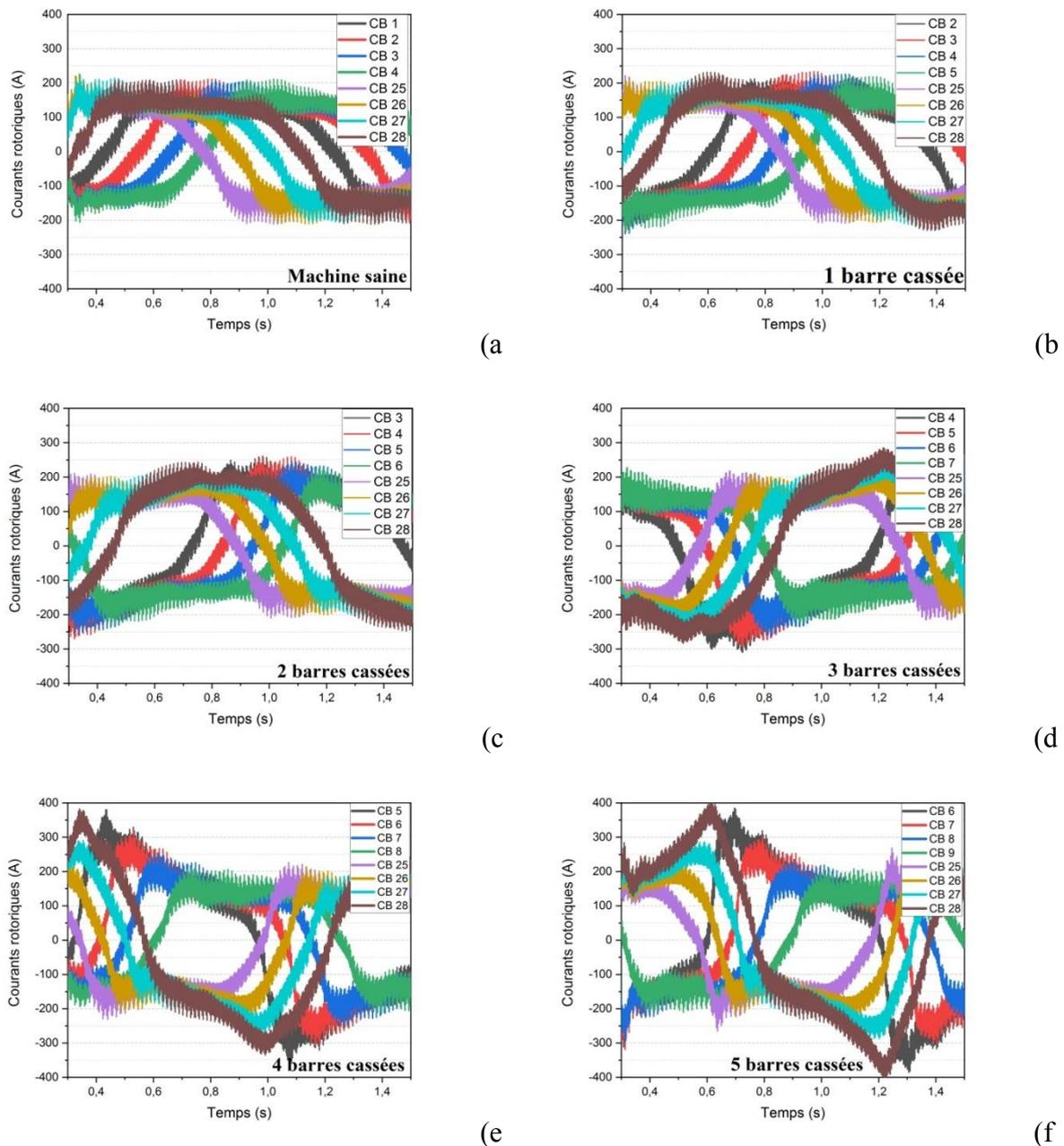


Figure III.4. Allures des courants rotoriques

On peut remarquer dans les figures ci-dessus par comparaison des cas de ruptures de barres rotoriques entre eux et le cas sain, une augmentation du courant traversant les barres adjacentes, et plus le nombre de barres cassées augmente, plus la circulation du courant dans ces barres adjacentes devient forte, c'est le courant qui circule dans les barres cassées qui est partagé sur les barres adjacentes, donc les barres adjacentes aux barres cassées sont plus susceptibles d'être défaillantes, ce qui peut conduire à un échauffement local et emmener à une nouvelle rupture.

III.3.4 Caractéristiques mécaniques

L'impact du défaut de cassure des barres n'est pas seulement sur les courants statoriques et rotoriques de la machine, mais il infecte aussi la vitesse de rotation. La figure III.5 donne un aperçu sur la vitesse de chaque cas étudié.

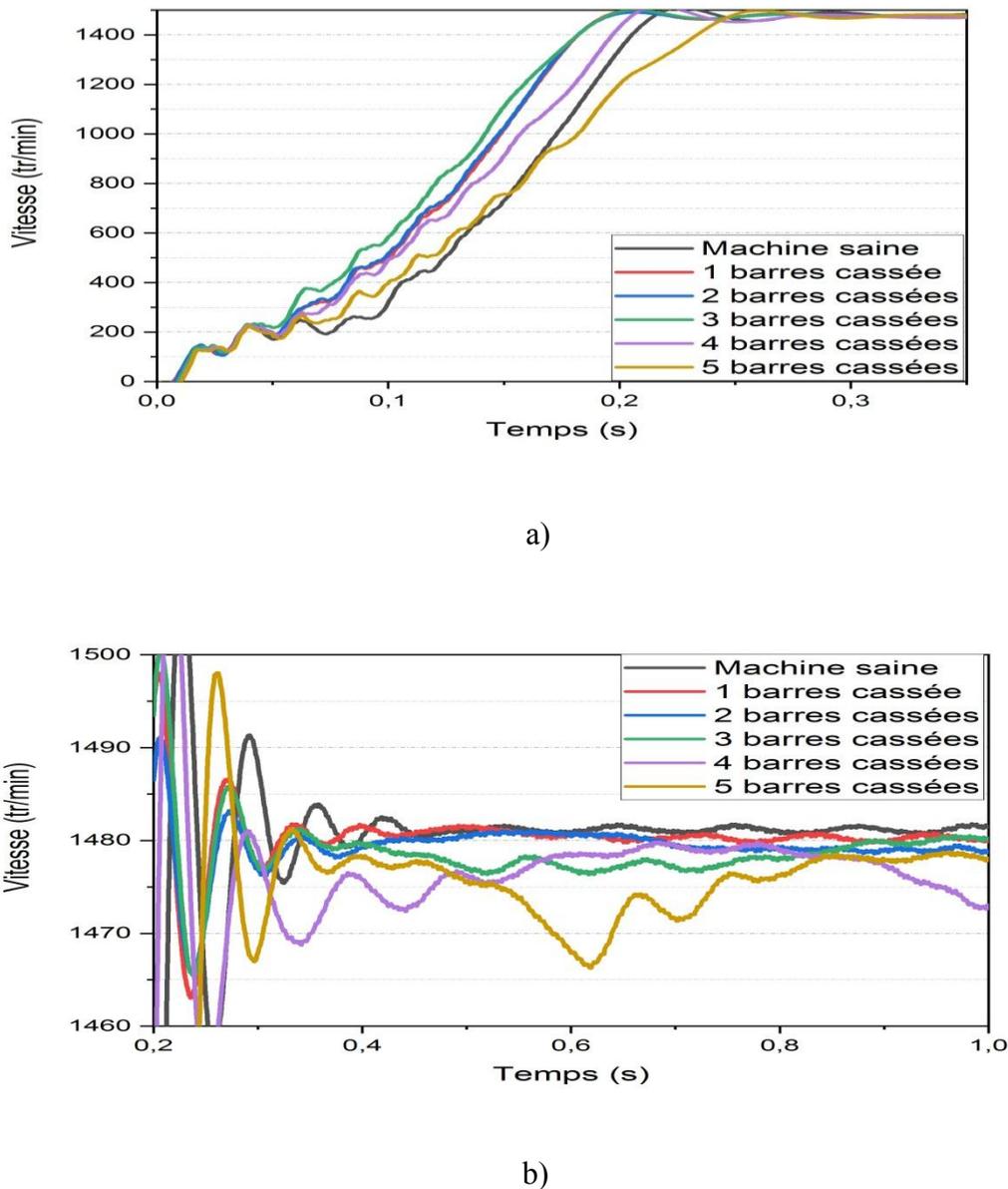


Figure III.5. Vitesse de rotation pour chaque cas : a) régime transitoir ; b) régime permanent

On peut observer que le défaut de rupture des barres rotoriques génère des oscillations de vitesse. Ces variations dues aux fluctuations de couple sont de faible fréquence. On constate que ces oscillations deviennent plus visibles lorsque le nombre de barre cassée augmente.

III.4 Diagnostic de la MAS saine et avec défauts :

Les techniques de détection des défauts par l'analyse temporelle des signaux n'est pas assez précise, et donnent peu d'informations sur l'existence d'anomalie et sur l'identification de type de défaut. La surveillance du comportement des machines tournantes aujourd'hui a largement développé des méthodes simple et efficace, dont on cite l'analyse du spectre du courant statorique (MCSA).

L'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est une méthode très efficace pour le diagnostic des défauts, comme la seule grandeur intéressante accessible au stator est le courant et l'intérêt de son analyse spectrale est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux en fonction de sa fréquence caractéristique.

L'analyse spectrale du courant statorique par la technique de la transformée de Fourier rapide FFT nous a permis d'identifier les signatures fréquentielles causées par la cassure des barres.

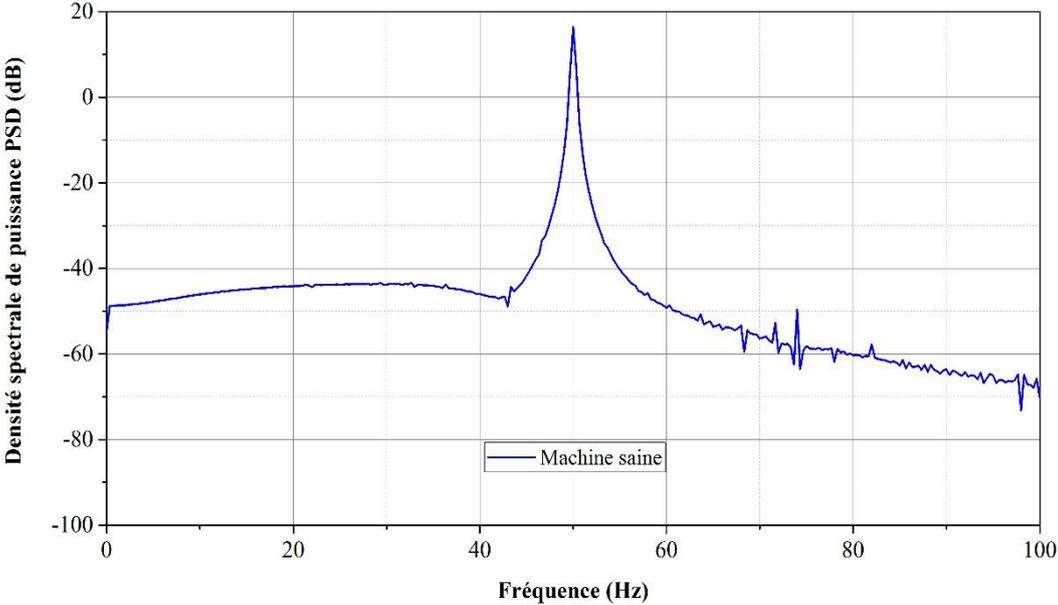
III.4.1 Analyse spectrale du courant d'une phase statorique :

C'est bien connu que la rupture de barres induit des forces électromotrices (f.é.m) dans les enroulements statoriques à des fréquences $(1-2k) \cdot f_s$ aux alentours du fondamental de courant statorique. Ces f.é.m engendrent une modulation du courant statorique.

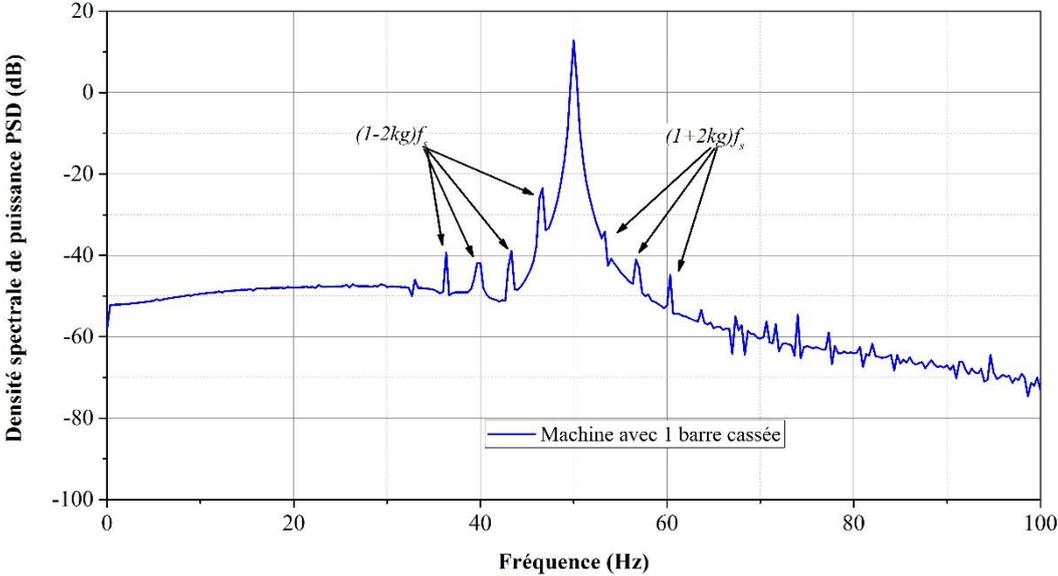
Les forces électromotrices dues au défaut sont alors de fréquences $(1 \pm 2k) \cdot f_s$. Les champs créés par les courants vont induire, par conséquent, au rotor des courants directs et inverses de fréquences $\pm 3k f_s$. Ainsi, au stator, des courants de fréquence $(1 \pm 4k) \cdot f_s$ sont générés selon le même processus. Par conséquent, des composantes de fréquences $(1 \pm 2k) \cdot f_s$ où k est un entier positif, se retrouvent dans les courants absorbés par la machine [15].

Dans cette étude, on veut étudier les manifestations de rupture de barres sur le courant statorique lors d'une alimentation idéale. Pour cela, nous avons pris le signal du courant d'une phase statorique pour faire une analyse spectrale pour chaque cas, soit une machine saine et avec défaut de cassures de barres.

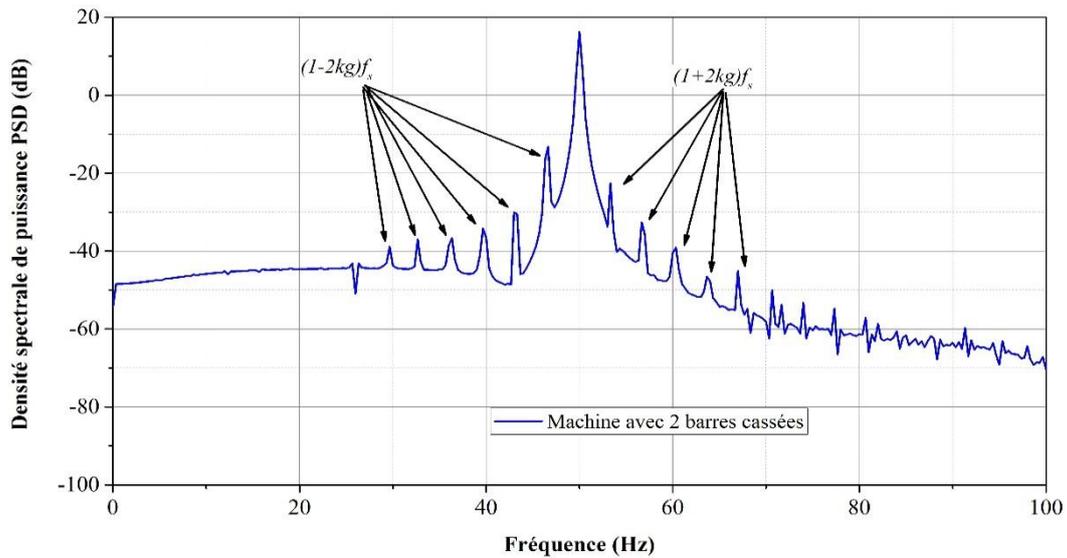
La figure ci-dessous présente les spectres du courant d'alimentation d'une machine saine et avec défaut de cassures de barres allant d'une barre à trois.



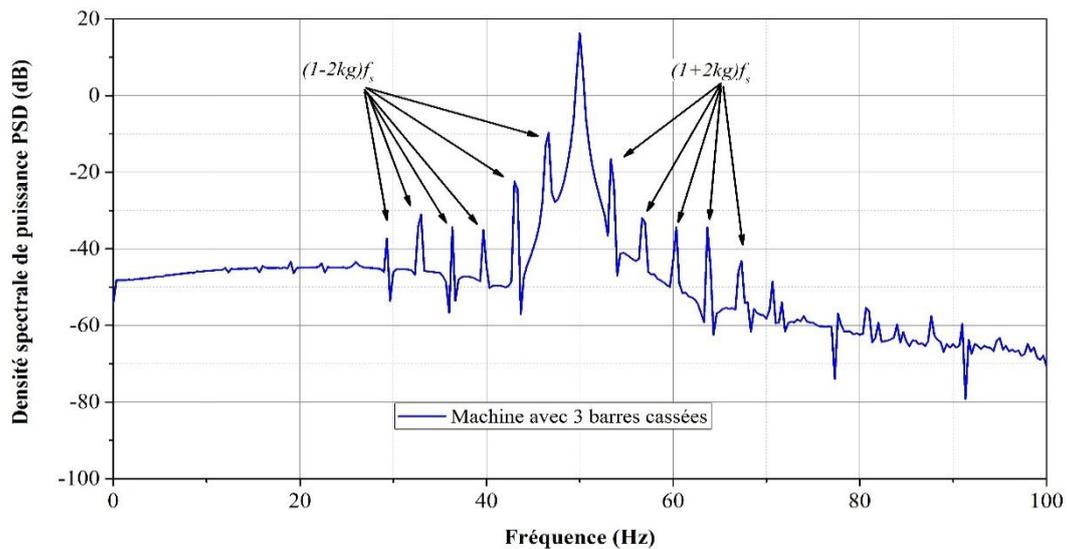
a)



b)



c)



d)

Figure III.6. Analyse spectrale du courant de phase de 0 Hz à 100 Hz pour défaut de cassure des barres

On remarque que le défaut de rupture de barres induit des pics dans le spectre du vecteur d'espace du courant statorique. Le nombre de ces pics est proportionnel au nombre de barres cassées. Ces pics apparaissent aux alentours du fondamental f_s et de sa composante symétrique inverse $-f_s$.

III.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la simulation de la machine asynchrone à cage d'écureuil par la méthode des éléments finis dans son état sain et avec le défaut de cassures des barres. Les résultats de simulation nous donnent une image claire sur son comportement lors de fonctionnement normal et en cas de défaut, et les conséquences renvoyées par ce dernier sur les caractéristiques électromagnétiques et mécaniques de la machine.

L'analyse du spectre du courant statorique (MCSA) est une méthode de diagnostic très utilisée dans la détection des défauts, son application sur le courant statorique de notre machine saine et défectueuse nous a permis de mettre en évidence toutes les bandes latérales relatives au défaut. Une détection précoce est possible à partir des raies localisées aux alentours des fréquences du fondamental f_s , et de sa composante inverse $-f_s$.

CONCLUSIÓN GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

L'évolution croissante des machines asynchrones dans le secteur industriel, et leur taux élevé d'utilisation met en évidence l'impératif de se prémunir contre l'apparition de tout défaut qui provoque le plus souvent un arrêt de la machine ce qui revient par des dommages matériels et financiers pour l'utilisateur.

Nous avons modélisé la machine asynchrone avec l'intégration du défaut de cassure de barres rotoriques. La simulation de la machine est déroulée selon six cas : état sain et avec défaut de cassure d'une barre jusqu'à cinq barres adjacentes. On a prélevé les résultats graphiques de l'état magnétique et mécanique de la machine. Les courants qui circulaient sur les barres cassées sont répartis sur les barres adjacentes, ce qui génère des fortes ondulations des courants rotoriques avec des intensités élevées.

Par titre de comparaison entre une machine saine et une machine avec défauts, une grande déférence dans les résultats, comme l'ondulation de la vitesse causé par la fluctuation du couple électromagnétique, qui se manifeste par la vibration de l'arbre moteur. Le signal des courants d'alimentation est déséquilibré et modulé, ces modulations sont engendrées par le déséquilibre du champ magnétique.

L'analyse temporelle des résultats obtenus ne permet pas de discerner l'effet de ce défaut sur la machine avec facilité. Pour cela, on a fait appel à la l'analyse fréquentielle, plus riche en informations et plus simple à interpréter. L'analyse spectrale du courant de phase de la machine par la transformée de Fourier rapide FFT sur chaque cas étudié a apporté de nouvelles informations, par rapport aux résultats de l'analyse temporelle. L'exploitation de ce spectre a permis de déterminer les composantes $(1 \pm 2 \text{ kg}) f_s$ caractéristiques du défaut de barres rotoriques qui donne une identité sur le défaut.

LES REFERENCES

[1] ABLA Bouguerne, «Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones », mémoire de Magister, Université Mentouri _Constantine, 2009.

[2] JULIEN Maitre, « reconnaissance des défauts de la machine asynchrone : application des modèles d'intelligence artificielle », thèse du doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2017.

[3] CHAOUCHE Riadh, CHETTI Sif Eddine, « Détection et diagnostic de défauts statorique externe d'un moteur asynchrone triphasé à l'aide de la carte ARDUINO MEGA 2560 » mémoire de Master, Université Kasdi Merbah _Ouargla, 2016.

[4] BABAK Vaseghi, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires. Modélisation – réduction du courant de défaut », thèse du doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.

[5] AIT MIHOUB Mohamed Oulhocine, « Méthode globale de diagnostic des machines asynchrones a cage d'écureuil », mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf- M'sila, 2016.

[6] BELASSEL Atef, « Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes », mémoire de Master, Université Badji Mokhtar _Annaba, 2019.

[7] M'ROUAIBIA Reda, « Détection et diagnostic des défauts des moteurs asynchrones », mémoire de Magister, Université BADJI Mokhtar-Annaba, 2009.

[8] MAGHRAOUI Abdelwahab, DEBOUCHA Abdelhakim, « Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage », mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf- M'sila, 2006.

[9] AMMAR Belaid, « Diagnostic de la MAS par la méthode d'identification paramétrique », mémoire d'ingénieur d'état, Université de M'sila, 2012.

[10] SAADI Sakhara, « diagnostic des défauts d'un entraînement électrique par la technique ondelette », thèse du doctorat, Université Badji Mokhtar _Annaba, 2017.

[11] OUMAAMAR Mohamed El Kamel, « Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée » thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.

[12] CHERIF Hakima, « Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes », mémoire de Magister,

Université Mouhamed Khider-Biskra, 2014.

[13] CHAHMI Abdelghani, « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », thèse doctorat, Université BOUDIAF Mouhamed-Oran, 2017.

[14] BELHAMDI Saad, « Diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande », thèse de doctorat, université Mouhamed Khider-Biskra, 2014.

[15] BABECHE Yacine, BOURAS Samir, « Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis », mémoire de Master, Université Mohamed Boudhiaf_M'sila, 2018.

[16] BOUSBIA SALAH Mohamed, DJERIBIAI Ayoub, BOUAZIZ Salim, « Identification des machines asynchrones par la méthode SSFR en vue de leurs diagnostic », mémoire Master, Université de M'sila, 2012.