



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
BAHAD ABDELOUAHAB

Le : dimanche 7 juillet 2019

Diagnostic des Défaits de la Machine Asynchrone à Cage par l'Utilisation du Logiciel FLUX 2D

Jury :

Pr.	Lotfi Alloui	Pr	Université de biskra	Rapporteur
Dr.	Rezig Mohamed	MCB	Université de biskra	Président
Dr.	KHENE Mohamed Lotfi	MCA	Université de biskra	Examineur

Année universitaire : 2018 - 2019



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Machine Electrique

Présenté et soutenu par :
BAHAD ABDELOUAHAB

Le : dimanche 7 juillet 2019

Diagnostic Des défauts de la Machine Asynchrone à cage par l'Utilisation du logiciel FLUX 2D

Présenté par :
Bahad Abdelouahab

Avis favorable de l'encadreur :
Pr. ALLOUI Lotfi *signature*

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Rezig Mohamed

Signature

Cachet et signature

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les machines 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. Ceci impose la mise en œuvre d'un système de surveillance. Dans ce contexte, l'objectif de cette est dédié au diagnostic des défauts dans les machines électriques asynchrones triphasées cage d'écureuil par un modèle de simulation basée sur la méthode des éléments finis 2D. Dans ce travail, nous proposons dans ce travail une étude comparative entre le comportement de la machine saine et le comportement de la machine doté de défaut rotorique. La technique d'analyse spectrale du courant statorique est la plus utilisée pour diagnostiquer les différents défauts dans les machines asynchrones ainsi que leur transformés a été présentée à l'aide de la transformée de Fourier (FFT), ce qui nous amène, à étudier l'impact du phénomène de cassure de barre. Le défaut de la barre rotorique cassée a été simulé dans ce travail, avec comme principal résultat l'apparition des signatures traditionnelles de ce défaut autour de fondamentale.

Mots clés : machine asynchrone, méthode des éléments finis, diagnostic, analyse spectrale, FFT, cassure de barre.

ملخص :

هذا العمل جزء من تشخيص الخلل في محركات القفص غير المتزامنة ثلاثية الطور. تعد آلة القفص غير المتزامن حاليًا العنصر الرئيسي لمعظم المعدات الصناعية، نظرًا لقوتها وتكلفتها المنخفضة والهدف من هذه الأطروحة هو تشخيص العيوب في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ثلاثية الطور مع القفص. السنجاب من خلال نموذج محاكاة يعتمد على طريقة العناصر المحددة ثنائية الأبعاد. 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. وهذا يتطلب تنفيذ نظام الرصد في هذا المنطق ، نقترح في هذا العمل دراسة مقارنة بين سلوك الجهاز الصحي وسلوك الجهاز مع عيب الدوار تقنية التحليل الطيفي للتيار الثابت هي الأكثر استخدامًا لتشخيص العيوب المختلفة في الأجهزة غير المتزامنة وتم تقديم تحولاتها باستخدام تحويل فورييه (FFT) ، والذي يقودنا إلى دراسة تأثير ظاهرة كسر الشريط. تم محاكاة خطأ قضيب الدوار المكسور في هذا العمل، وكانت النتيجة الرئيسية ظهور التوقعات التقليدية لهذا العيب حول الأساس.

الكلمات المفتاحية: آلة غير متزامنة ، طريقة العناصر المحددة ، التشخيص ، التحليل الطيفي ، كسر الشريط.

Remerciements

Je remercie « **ALLAH** » le tout puissant de m'avoir donné le courage ainsi que la force pour pouvoir finir ce modeste travail.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à la réussite de mon travail :

Nous tenons à exprimer nos vifs et sincères remerciements à « **Professeur ALLOUI Lotfi** », de nous avoir encadrés, pour sa constante disponibilité, son aide, encouragements et nous lui sommes reconnaissants pour ses conseils et orientations.

Je remercie Mr : **REZIGE Mohamed** (Dr. l'université de Biskra) d'avoir accepté de présider ma soutenance de master, et Mr: **KHENE Mohamed Lotfi** (MCA à l'université de Biskra). Pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département d'Electrotechnique de l'université de Biskra qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

Aux chers parents.

A mes frères et mes sœurs.

Ma sœur ouarda

Mon cousin Salah Eddine

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et

Chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute ma tendresse.

A tout ma famille.

A mes cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

Affectueuse reconnaissance.

Vous avez contribué en fonction de vos moyens à affermir ma

Formation.

Sincère gratitude.

A tous mes camarades du groupe « électrotechnique » de la faculté

Des sciences et de la technologie ; à tous les étudiants de la faculté

Des sciences et de la technologie de Biskra.

Abdou Bahad

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art.....	1
I.1 Stator de Machine asynchrone à cage	2
I.2 Rotor à cage d'écureuil.....	2
I.3 Les défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.....	3
I.4 Proportion des défauts de la machine asynchrone.....	5
I.5 Représentation des différents défauts statoriques possible.....	5
I.6 Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique;(c) excentricité dynamique.....	6
I.7 Mesures vibratoires sur la machine asynchrone.....	9
I.8 Direction des points de mesure pour un accéléromètre.....	10
Chapitre II: Modélisation de MAS par éléments finis.....	15
II.1 fonction d'interpolation d'un élément.....	21
II.2 l'enchaînement des programmes de Flux 2D.....	23
II.3 Les dimensions de la machine.....	24
II.4 Dimension des encoches, a)l'encoche statorique b) l'encoche rotorique.L'enroulement du stator est un enroulement de cuivrée deux couches.....	25
II.5 Bobinage statorique	25
II.6 Circuit magnétique de la MAS.....	26
II.7 Les points de maillage.....	30
II.8 Répartition du maillage.....	32
II.9 Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.....	32.
II.10 CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.....	33
II.11 Circuit équivalent de la cage rotorique.....	33

II.12. les tensions d'alimentation V1, V2 et V3.....	34
Chapitre III: Diagnostic et simulation de la MAS triphasée à cage avec défaut : cassure de barres.....	40
III.1 Distribution des lignes du flux à vide, (a) au démarrage ; (b) en régime permanent...40	
III.2 Induction magnétique B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.....41	
III.3 le courant statorique de la phase A à vide.....42	
III.4 le courant dans la barre rotorique 1 à vide.....42	
III.5 Vitesse de rotation à vide.....43	
III.6 Couple électromagnétique à vide.....43	
III.7 Distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge mécanique de 10 N.m.....45	
III.8 L'induction B en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge Mécanique de 10N.m.....46	
III.9 Distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge mécanique de 20 N.m.....47	
III.10 le courant statorique de la phase en charge (10N.m).....48	
III.11 le courant statorique de la phase en charge.(20N.m).....48	
III.12 le couple électromagnétique en charge. (10N.m).....49	
III.13 le couple électromagnétique en charge. (20N.m).....49	
III.14 vitesse de rotation en charge.....50	
III.15. Spectre du courant statorique pour une charge mécanique de 10N.m.....55	
III.16. Spectre du courant statorique pour une charge mécanique de 20N.m.....55	
III.17. Schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut.....57	
III.18. La distribution des lignes du flux en vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.....59	

Liste des figures

III.19. Répartition de l'induction magnétique B à l'intérieur de la machine électrique entraîné à vide (régime transitoire).....	60
III.20. Courant statorique de la phase à vide avec défaut 3 barre cassé.....	61
III.21: Couple électromagnétique à vide (3barre cassée).....	61
III.22. La vitesse de rotation à vide.....	62
III.23. Le courant dans les 3 barres cassées rotorique 1 à vide.....	63
III.24. Spectre du courant statorique pour une machine asynchrone entraîné à vide et ayant trois barres cassés.....	63
III.25. La distribution des lignes du flux en charge (10N/m) au démarrage (régime transitoire).....	64
III.26. L'induction magnétique B à l'intérieur de la machine électrique sous une charge mécanique de (10N/m) au (régime transitoire).....	65
III.27. Courant statorique de la phase d'une machine entraîné sous une charge mécanique de (10N/m).....	65
III.28. Le courant dans la barre rotorique 2(cassée) de la machine entraîné sous une charge mécanique de (10N/m).....	66
III.29. Le courant statorique de la phase à charge (15N/m) avec défaut de 2 barre rotoriques cassés.....	68
III.30. Le couple électromagnétique à charge (2barre cassée).....	68
III.31: Le couple électromagnétique à charge (machine saine).....	69
III.32. La vitesse de rotation de la machine électrique en charge (15N/m) avec une machine ayant deux barres cassées.....	69
III.33. La vitesse de rotation (zoom au régime permanent) sans défaut et avec défaut.....	70
III.34. Spectre du courant statorique pour une machine asynchrone entraîné à charge 15N.m et ayant deux barres cassés.....	70.
III.35. Spectre du courant statorique (zoom) pour une machine asynchrone entraîné à charge 15N.m et ayant deux barres cassés.....	71

Liste des tableaux

CHAPITRE I	Etat de l'art.....	1
	II.1 Classification des défauts magnétiques.....	09
CHAPITRE II	Modélisation de MAS par éléments finis.....	15
	III.1 Paramètres globales de la machine.....	27
	III.2 La taille des éléments du maillage.....	29
	III.3 B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.....	31
CHAPITRE III	Diagnostic et simulation de la MAS triphasée à cage avec défaut : cassure de barres.....	37
	III.1. Composantes fréquentielles du spectre du courant statorique de 20 harmoniques des encoches rotoriques et 06 harmoniques de fmm. Machine saine 7.5 kW en charge 20 N.m, $p=1$ et $R=20$	52
	III.2. Composantes fréquentielles du spectre du courant statorique machine avec défaut cassure de barre (7.5 kW en charge, $p=1$, $R=20$ et avec défaut 2 barre cassée avec une charge 15 N.m).....	71

Liste des symboles

- l : La longueur du conducteur
- V : La vitesse du conducteur
- B : Induction magnétique
- F_m : La force mécanique
- E_0 : Générateur de f.é.m.
- R : Résistance interne
- I : Le courant
- F_e : Force électromagnétique
- E : Force électromotrices (f.é.m.)
- Ω : Vitesse de glissement.
- A : Potentiel magnétique.
- Γ : Frontière de domaine Ω
- μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.
- μ_r : La perméabilité relative du fer
- ε : Permittivité électrique.
- μ : Perméabilité magnétique.
- J : Densité de courant uniforme.
- ρ : Charges électriques.
- σ : conductivité électrique.
- j : unité imaginaire.
- t : Temps.
- s : Glissement.
- Ω_s : Pulsation statorique.
- p : Nombre de paires de pôles.
- N_b : Nombre de barres rotoriques.

Liste des Symboles

F_s	: Fréquence d'alimentation.
F_r	: Fréquence rotorique.
f_{RSHs}	: Fréquences d'harmoniques d'encoches rotoriques.
F_b	: Fréquence caractéristique du défaut de barres cassées.
F_H	: Fréquences d'harmoniques de la force magnétomotrice.
Λ	: Rang des harmoniques du temps.
Ω_s	: Vitesse synchrone.
Ω_r	: Vitesse rotorique.
C_r	: Couple résistant.
FEM	: Finite Element Method.
MCSA	: Motor Current Signal Analysis.
F_{mm}	: Force magnétomotrice.
FFT	: Fast Fourier Transform.
RSHs	: Harmoniques d'encoches rotoriques.
L-PSH	: Lower Principal Slot Harmonic.
U-PSH	: Upper Principal Slot Harmonic.
e	: Numéro d'élément.
n_e	: Le nombre totale des éléments du domaine (Ω).
H	: Champ magnétique (A/m)

Sommaire

Résumé	I
Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VII
Liste des symboles.....	VIII
Introduction générale.....	I

Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Introduction:	1
I.2.CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	1
I.2.1 Le stator :	1
I.2.2 Le rotor :	2
I.2.3.Les paliers.....	3
I.3. LES DEFAILLANCES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE à cage... 3	
I.3 .1.Défaillances statoriques :	4
I.3 .2.Défaillances rotoriques	5
I.3 .3. Défaillances des paliers	7
I.4. METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	7
I.4.1. Méthode des éléments finis.	7
I.5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES.	8
I.5.1. Approche Signal	8
I.6. Approche signal.....	13
I.7. CONCLUSION	14

CHAPITRE II : Modélisation de MASY par éléments finis

II.1. Introduction:.....	15
II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	15
II.2.1. EQUATIONS DE BASE DE LA MASY	16
II.2.2 Le modèle employé	18
II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF	20
II.4 .Logiciel de résolution	21

Sommaire

II.5 Présentation du logiciel Flux 2D.....	22
II.6. Construction du modèle de la machine asynchrone.....	23
II.6.1 Les données de la machine étudiée	24
II.6.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D.....	28
II.6.3 Le circuit électrique.....	32
II.7.Conclusion	35
CHAPITRE III :	
Diagnostic et simulation de la MASY	
Triphasée à cage avec défaut : cassure de barres	
III.1 INTRODUCTION.....	37
III.2. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage (machine à l'état sain).	38
III.2.1. Résultats des simulations de la MAS à l'état sain (à vide).	39
III.2.2 Simulation de la MASY à l'état sain (en charge respectivement à 10 N.m et à 20 N.m)	44
III.2.3. Analyse spectrale du courant statorique.....	50
III.2.4. L'influence de la charge.....	51
III.3 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage (machine à L'état défaut).....	56
III.3.1. Que se passe-t-il dans la machine asynchrone quand une barre rotorique est cassée ?.....	56
III.3.1. Simulation de MAS à l'état de défaut ayant de cassures de barres rotoriques (à vide) :	58
III.3.1. Simulation de MAS à l'état défaut cassure de barre (en charge 15 N.m)	66
III.4. Conclusion	72
Conclusion Générale	74
Bibliographie.....	77

Introduction générale

Introduction générale

Les machines asynchrones à cage d'écureuil sont largement répandues dans l'industrie en raison de leur fiabilité et construction simple. Elles sont utilisées dans la majorité des secteurs industriels et commerciaux. Cependant, elles sont sujettes à de nombreux défauts comme les barres cassées ou l'excentricité au niveau du rotor ou encore les court-circuits entre spires au stator ou la vibration...

La machine asynchrone triphasée a été depuis son invention fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance. L'avènement de l'électronique de puissance renversa la tendance et la rend de plus en plus utilisée. Sa prédominance résulte de la standardisation réussie dans le "process" industriel, à sa grande robustesse et à ses coûts d'achat et d'entretien relativement plus faibles. En fait, Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées comme l'aéronautique, le nucléaire, les industries pétroliers, chimiques, dans le transport (métro, trains, propulsion de véhicule et des navires, les ascenseurs), dans l'industrie (machines outils, treuils) et dans l'électroménager. A l'origine, elle était uniquement utilisée comme moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée comme génératrice, c'est par exemple le cas des éoliennes dont la production de part le monde a connu un essor considérables. Cependant, et en dépit de toutes ces qualités, les machines asynchrones triphasées restent sensibles a de multiples perturbations de l'environnement auxquelles elles sont soumises. Les défauts dans les machines électriques peuvent être d'origine mécanique (excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotorique ou d'anneau,...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statorique). Les grandeurs mesurables tel que le courant statorique, les tensions, la vitesse ou bien encore la température et la densité de flux magnétique, peuvent fournir des informations significatives sur les défauts et servir ainsi à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur [HN 15].

Dans de nombreux secteurs industriels, la sûreté de fonctionnement est un enjeu important pour garantir une compétitivité optimale de l'outil de production devant une concurrence de plus en plus acharnée. Le diagnostic des défaillances de systèmes industriels, qui fait partie de la sureté de fonctionnement, lorsqu'il est réalisé avec efficacité, représente

un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité. Sa vocation première est de détecter et de localiser une défaillance des matériels. Historiquement, pour assurer un fonctionnement sûr et fiable, le diagnostic de défaut remonte à l'origine des machines elles mêmes. Les fabricants et les utilisateurs des machines électriques ont originellement mis en pratique une protection simple telle que la surcharge, la surtension et la protection contre les défauts à la terre, etc. Dans certaines applications où les systèmes industriels sont intégrés et souvent interconnectés, il est devenu primordial de diagnostiquer des défauts dès leur naissance, car une panne dans l'un des organes constitutifs de la machine peut arrêter tout le processus de production, ce qui cause des pertes financières lourdes. [HN 15].

Plusieurs modèles ont été développés parmi ces modèles le modèle triphasé-triphasé linéaire et celui de Park qui représentent le comportement électrique de la machine asynchrone mais ils négligent les phénomènes magnétiques ou électriques tels que les courants de Foucault, la saturation magnétique, l'effet d'une géométrie complexe (l'effet d'encoche), Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axe de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les barres cassées dans le rotor de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine.

La considération du comportement électromagnétique local du moteur permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique des équations de Maxwell régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle, dans ce but nous orientons dans cette mémoire d'utiliser la méthode de calcul par éléments finis à travers de l'outil logiciel FLUX 2d, ce dernier qui nous permet d'utiliser la technique de circuits couplés c'est-à-dire le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique.

Pour atteindre ces objectifs, le travail de thèse présentée s'articule sur trois parties distinctes mais complémentaires sous forme de chapitres:

Le premier chapitre présente des notions de bases reliées à l'action de diagnostic et les principaux défauts pouvant modifier le bon fonctionnement de la machine asynchrone, leurs origines.

Les différents défauts qui peuvent apparaître dans une machine asynchrone triphasée seront détaillés, avec comme trame de fond les différentes approches destinées au diagnostic de la machine asynchrone triphasée.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone triphasée par la méthode des éléments finis. Par la suite on décrit la méthode numérique pour le calcul des champs électromagnétiques par le logiciel FLUX 2D utilisant la méthode des éléments finis.

Le troisième chapitre nous montrerons les résultats de la simulation du moteur Asynchrone à cage avec une étude comparative entre comportement, d'une machine saine et d'une machine portant un défaut permettra de déduire la présence de défaut. Dans cette comparaison, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques sont adoptées. Via cette comparaison, la différence entre comportement d'une machine saine et d'une machine ayant un défaut permettra de déduire la présence du défaut et sa nature. Le recours vers l'utilisation des méthodes du traitement de signal permettra de donner une meilleure vision sur la présence du défaut et sur sa nature. Parmi ces méthodes, la méthode de transformée de Fourier (**FFT**) peut être exploitée.

Une conclusion générale s'impose à la fin de ce mémoire, pour montrer l'état d'avancement de notre travail l'humble. Dans cette comparaison, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques sont adoptées (couple, vitesse, courant...).

PARTIE THEORIQUE

Chapitre I : Etat de l'art

Chapitre I : Etat de l'art

I.1.Introduction:

Actuellement, le domaine de la maintenance préventive devient de plus en plus une Préoccupation stratégique des constructeurs et utilisateurs des machines électriques.

En effet, la détection, et l'analyse des défauts sont devenues essentielles au bon fonctionnement des machines. Ces tâches, sont indispensables aussi afin d'augmenter la disponibilité des installations, maintenir une bonne qualité de service et réduire les coûts directs et indirects de la maintenance des équipements de production.

Le but de ce chapitre est de présenter les différents défauts qui peuvent affecter le moteur asynchrone à cage et leurs méthodes 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 les quelles 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'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor bobiné ou à cage d'écureuil [LKH 15].

I.2.1 Le stator :

Le stator: partie fixe de la machine, constituée de disques en tôles magnétiques portant les enroulements chargés de magnétiser l'entrefer.

Les différents types des moteurs asynchrones ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine [A.M 2017]

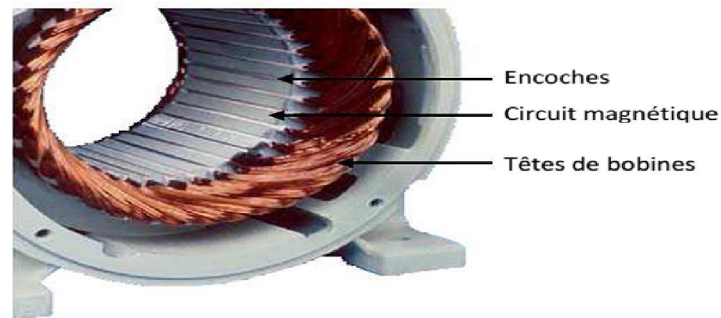


Figure I.1. Le Stator de *MAS*

I.2.2 Le rotor :

Le rotor: c'est la partie tournante où est constitué de disques en tôles magnétiques empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.

Le circuit rotorique est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui de la machine à rotor bobiné. Les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. La figure 2 illustre un rotor à cage. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service. [A.M 17]

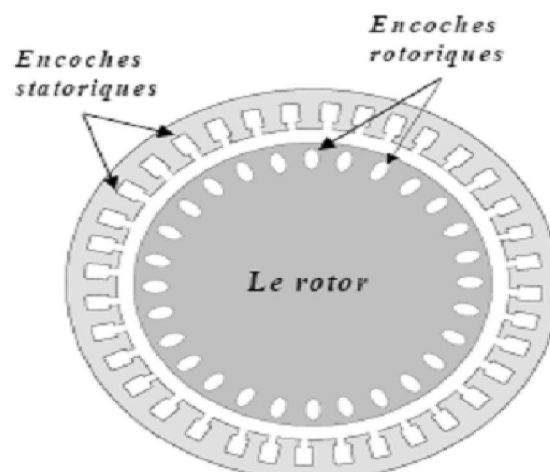


Figure I.2. Rotor à cage d'écureuil

I.2.3. Les paliers : ce sont des organes mécaniques permettant la mise en rotation du rotor et assurant le maintien des différents sous-ensembles. Ils sont constitués de deux composants :

- les Flasques
- Roulement à billes

I.3. LES DEFAILLANCES DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A CAGE :

Une défaillance est définie par la cessation de l'aptitude d'un composant à accomplir une fonction requise. Partons de cette définition, on peut citer les défaillances pouvant affecter les machines asynchrones triphasées à cage. [SM 10].

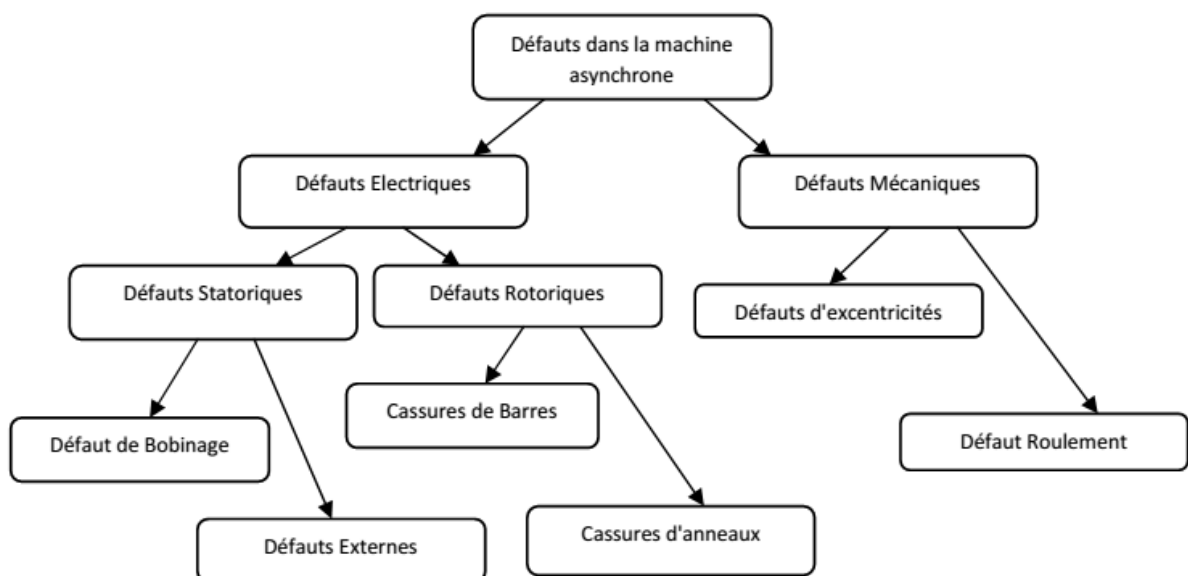


Figure .I.3. Les défauts de la machine asynchrone triphasée à cage.

Bien que la machine asynchrone à cage d'écureuil soit réputée robuste elle peut parfois présenter différents type de défauts ces défauts peuvent être d'origine mécanique ou électrique un problème minime à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. Certaines fois nous pouvons aussi incriminer le milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et/ ou chimiques hostiles).

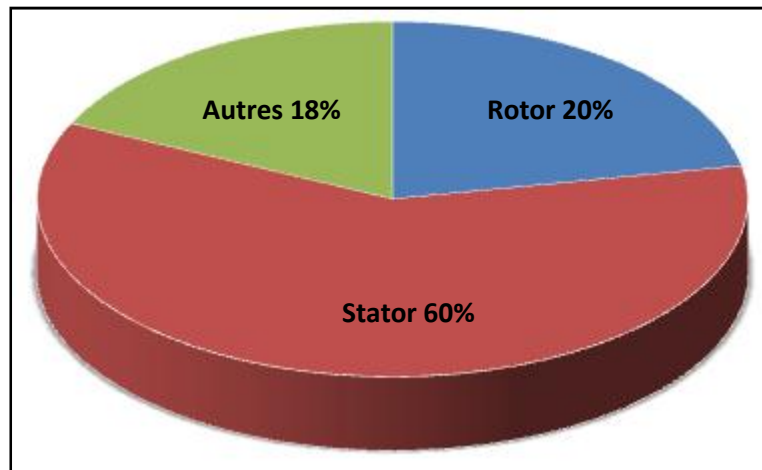


Figure .I.4. Proportion des défauts de la machine asynchrone

I.3 .1.Défaillances statoriques :

Ces défauts sont généralement liés à la dégradation de l'isolation électrique. Ils sont généralement connus comme des défauts de court-circuit d'une phase à la terre, court circuits entre spires de la même phase ou de court-circuit entre phases.

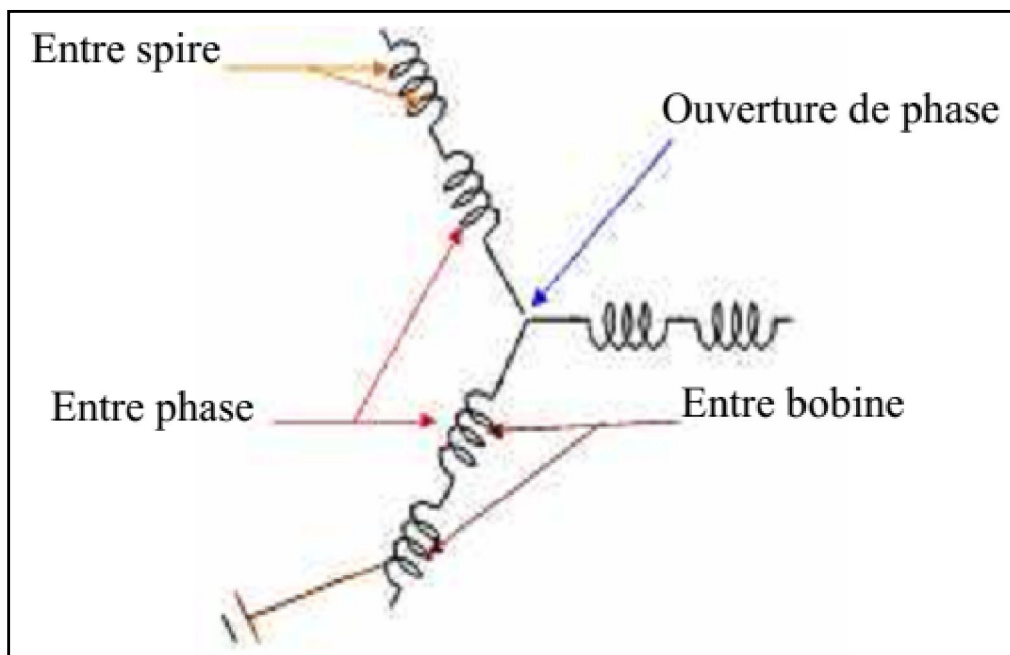


Figure .I.5 . Représentation des différents défauts statoriques possible

I.3 .1.1. Défaillances de la boîte à bornes

Les vibrations excessives de différentes origines peuvent conduire à un desserrement des boulons 8 de la boîte à bornes, ce qui mène à une rupture d'une phase en cours de fonctionnement. La contamination par des corps étrangers (poussière, graisse,...), peut aussi induire un arc entre les prises de connexion. Il en résulte une rupture d'une phase ou un court circuit entre les phases.

I.3 .1.2. Défaillances du circuit magnétique

Les tôles du circuit magnétique sont normalement isolées entre elles ; toutefois elles peuvent être accidentellement se court-circuitées. Ce défaut peut avoir comme origine :

- Un court-circuit des conducteurs qui peut également provoquer un échauffement local intense dans les tôles.
- Les corps étrangers projetés dans l'entrefer peuvent entraîner l'abrasion des tôles et causer des courts-circuits ; Un défaut sévère d'excentricité statique et/ou dynamique peut conduire à un contact franc entre le stator et le rotor, ce qui pourra détruire le circuit magnétique. [SM 10].

I.3 .1.3. Défaillances de court-circuit

La signature fréquentielle de ce défaut se manifeste par l'apparition d'harmonique aux fréquences $f=n.f_s$ avec $n = \{1, 2,3,\dots\}$ et f_s la fréquence d'alimentation. La variation des paramètres se fait comme suit : [L.kh 15]

- ✓ La résistance statorique augmente.
- ✓ La résistance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance rotorique diminue.
- ✓ L'inductance de magnétisation diminue.

I.3 .2. Défaillances rotoriques

I.3 .2.1 Défaillances des conducteurs

La cage rotorique étant formée de conducteurs (barres) est de deux anneaux de court circuit. Les ruptures ou les fissures de barres ou de segments d'anneaux de court-circuit sont très fréquent dans les machines de grande puissance. La cassure d'une barre peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. Ce défaut est dû à

- ✓ Un nombre important de démarrages successifs ce qui induit des courants énormes dans les barres rotoriques.
- ✓ Une excentricité statique et/ou dynamique, le rotor sera soumis à différentes forces qui tendent à faire sortir les barres des encoches.
- ✓ La dilatation puis la contraction répétée dans les barres rotoriques.
Une rupture de barres conduit à de fortes oscillations dans le couple et la vitesse
Accompagnées par des vibrations et des bruits excessifs ainsi qu'une augmentation de la température dans les barres adjacentes de la barre rompue.

I.3 .2.2 Défaillances d'excentricité

Un défaut d'excentricité dans une machine électrique correspond à un décentrement du rotor par rapport, au stator, entraînant une variation de l'entrefer. Il existe trois types de défaut d'excentricité : [AM 17].

- **l'excentricité statique** : correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor reste fixe mais ne coïncide, pas avec l'axe de symétrie du stator.
- **l'excentricité dynamique** : correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor n'est pas fixe mais tourne autour de l'axe de symétrie du stator.
- **l'excentricité mixte** : qui est une combinaison d'excentricités statique et dynamique.

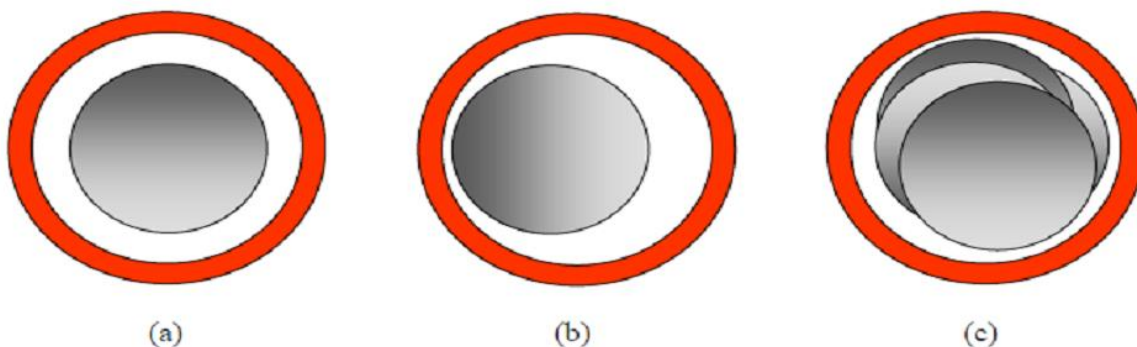


Figure I.6. Types d'excentricité: (a) rotor concentré; (b) excentricité statique;
(c) excentricité dynamique.

Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant à des fréquences f_{ecc} . [GHO.A 05].

I.3 .3. Défaillances des paliers

I.3 .3.1. Défaillances des flasques

Les défaillances des flasques sont généralement créées durant l'étape de fabrication. En effet, si les bords intérieurs ou extérieurs des flasques ne sont pas usinés correctement, les roulements à billes sont alors décentrés. Cela conduit à une excentricité du rotor par rapport au stator produisant des efforts supplémentaires sur l'arbre et sur les roulements à billes ce qui accélère leur détérioration.

I.3 .3.2. Défaillances des roulements à billes

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans tout type de machines électriques tournantes. D'une manière générale, toutes insertions en force des roulements à billes sur l'arbre, est susceptible de créer des indentations sur les surfaces de contact, voire une fracture directe. Le champ axial peut induire des courants électriques qui vont circuler au niveau des roulements à billes, ce qui accélère leur détérioration. En plus, la graisse qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certains cas, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. [SM 10].

I.4. METHODES DE MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

I.4.1. Méthode des éléments finis.

Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation de méthode de calcul par éléments finis 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 de la machine asynchrone, la méthode des éléments finis est utilisée dans le but de comprendre et de quantifier les conséquences locales d'un défaut sur les différentes parties de la machine. [BAS 09].

A titre d'exemple, la méthode des éléments finis permet l'étude des effets locaux du défaut de rupture de barres de la cage rotorique à savoir un échauffement local excessif dû à l'augmentation des courants circulant dans les barres voisines aux barres cassées et une forte sollicitation électrodynamique de ces mêmes barres voisines pouvant conduire à la propagation du défaut. De mêmes, la méthode des éléments finis sert à appréhender les impacts magnétique et thermique locaux du défaut de court-circuit inter spires dans les phases statoriques. 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 [DED 04].

I.5. METHODES DE DIAGNOSTIC DES MACHINES ASYNCHRONES.

Il existe une variété de techniques de diagnostic et des méthodes de détection des défauts. On présente dans ce qui suit quelques-unes qui concernent la détection des défauts machine.

I.5.1. 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. La surveillance via cette approche nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

I.5.1.1. Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

L'analyse vibratoire de la machine asynchrone peut être menée grâce à des accéléromètres placés sur les paliers dans les directions verticales, axiales et radiales.[RC 92]

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique telle que dans les unités d'exploitation de la **SONATRACH** et la **SONELGAZ**. Les problèmes vibratoires dans les moteurs asynchrones ont une complexité accrue à cause de la présence de champs magnétique tournant. [GHO A 05].

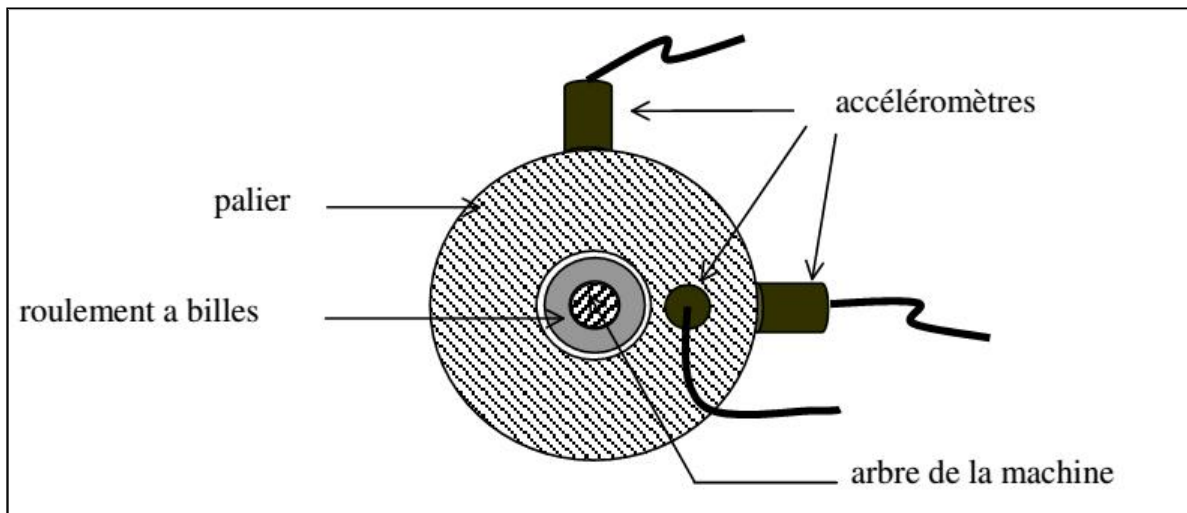


Figure I.7. Mesures vibratoires sur la machine asynchrone

Type de défauts	Fréquences caractéristiques	Causes typiques	
		Variation d'entrefer	Variation de courant
Stationnaire	$2 \times f_s$	Excentricité statique	<ul style="list-style-type: none"> • Déséquilibre de phases statoriques. • Spires en court-circuit. • Défaut d'isolement entre tôle
Tournant	$1 \times f_r$, avec bandes latérales à $2 \times gf_s$	Excentricité dynamique	<ul style="list-style-type: none"> • Barres (ou portions d'anneaux de court circuit) rompues ou fissures. • Défaut de tôles rotoriques.

Tableau I.1 : Classification des défauts magnétiques

Les vibrations dans les machines électriques peuvent être captées grâce à des accéléromètres (mesure de l'accélération de la vibration), des vélocimétries (mesure de la vitesse de la vibration), ou bien capteur de proximité (le déplacement relatif de l'arbre par rapport au capteur).

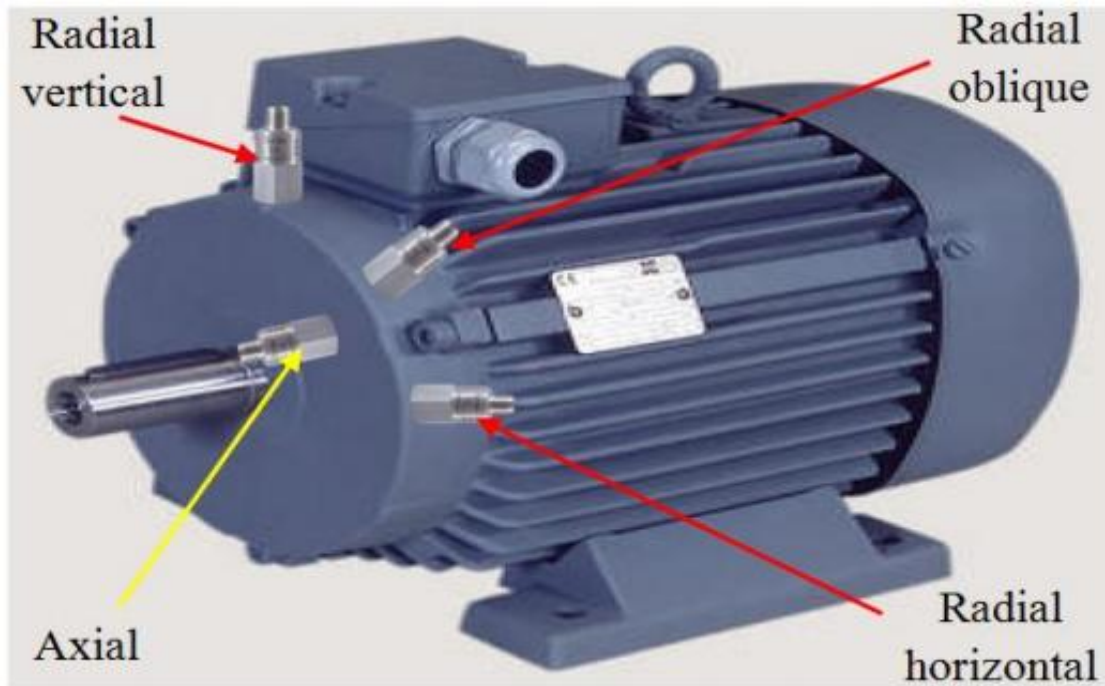


Figure I.8. Direction des points de mesure pour un accéléromètre.

I.5.1.2. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Pratiquement, de multiples solutions permettent de capter le flux de fuite axial dans une machine électrique, tel que les sondes à effet Hall. Mais l'exemple de base consiste à enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, celle-ci sera le siège d'une FEM induite liée au flux de fuite axial. La réalité fait que les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à cause des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques [JJL 94].

I.5.1.3. Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vu 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) [M.G.A 00].

I.5.1.4. Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, 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. L'analyse spectrale de ce signal, donne des informations pertinentes sur l'état du moteur

Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode. [BLO 06].

I.5.1.5. Diagnostic par l'analyse de la tension de neutre

Elle est basée sur l'exploitation du contenu spectral de la tension entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone. Cette méthode a démontrée son efficacité quant à la détection des défauts statoriques, ainsi que les défauts rotoriques.

Cependant, l'utilisation de cette technique devient un peu compliquée dans le cas où le neutre de la machine est très loin par rapport à celui de la source. [KHA 09].

I.5.1.6. Diagnostic par analyse de la température ou la thermographique

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble des l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge, plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau. . [GHO.A 05].

L'opérateur fait la part de choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. Les anomalies sont localisées spatialement, un réglage des paramètres de l'objet (émissivité, ambiance...) permet le calcul direct de la température maximale observée et éventuellement la surchauffe. Un calcul complémentaire peut, dans le cas où le système n'est pas à sa charge normale, permettre d'estimer la surchauffe ramenée à son fonctionnement normal. La surchauffe étant calculée, nous rapprochons celle-ci de la cinétique de dégradation et donc des degrés d'urgence. Cette détermination est très importante car elle permet une véritable localisation dans le temps ; d'où une gestion aisée du traitement des anomalies. Un cliché dans l'infrarouge et une photo dans le visible mémorisent le défaut. La détection serait possible suite à l'analyse du spectrogramme obtenu, au billet duquel les zones en dégradation seraient délimitées.

Un frottement excessif au niveau des paliers ou bien des billes de roulements se traduira par un échauffement graduel qui risque de devenir important. Un mauvais contact est susceptible de générer des décharges électriques traduisant l'augmentation locale de la température, une corrosion, une oxydation, une tresse défectueuse, et beaucoup d'autres exemples de cas pratiques pouvant être l'objet d'une inspection thermographique.[GO.A.05].

I.5.1.7. Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance est plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défauts électriques tels que les courts circuits entre spires statorique. Dans cette direction, M.Drif et allant démontrés l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité [DRI 08].

I.5.1.8. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

J. Milimonfared a proposé une autre technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques du temps) peuvent être évités ; Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production. [NAN 02].

I.5.1.9. Diagnostic par les analyses chimiques

La plupart des moteurs sont refroidis par l'air, ou le plus souvent à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur refroidi à l'eau. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

Dans certains cas, l'huile de roulement est analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents

I.6. Approche signal

Le principe des méthodes d'analyse des signaux repose sur l'existence de caractéristiques propres au fonctionnement sain ou défaillant du procédé.

L'apparition d'un défaut étant à l'origine de nombreux phénomènes tels que le bruit, l'échauffement et les vibrations. Ces symptômes sont la manifestation apparente d'une modification des caractéristiques temporelles et fréquentielles des grandeurs électriques et mécaniques.

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone pouvant être utilisées pour le diagnostic sont :

- ✓ Les courants absorbés ;
- ✓ Le flux de dispersion ;
- ✓ Les tensions d'alimentation ;
- ✓ La tension du neutre (neutre alimentation - neutre machine) ;
- ✓ le couple 'électromagnétique
- ✓ La vitesse rotorique, les vibrations ;
- ✓ Appel à des méthodes statistiques (change- ment de moyenne, rupture de modèle,

Analyse spectrale, analyse temps-fréquence ondelettes ou bien à des méthodes de reconnaissance de formes qui permettent de classer les signatures de défauts, il faut dans ce cas disposer de suffisamment d'expériences pour pouvoir constituer une base d'apprentissage. C'est dans ce cadre qu'entrent les réseaux de neurones. Les approches de classification se retrouvent également si l'on caractérise les situations avec des attributs symboliques.

I.7. CONCLUSION

La machine asynchrone, connue par son large domaine d'utilisation ; L'objectif de ce chapitre était de présenter de manière générale la constitution de la machine asynchrone en citant en premier lieu les différentes parties de la machine asynchrone les deux bobinages statorique et rotorique et les paliers, Ensuite nous avons présenté les phénomènes affectés par les défauts et après nous nous sommes attardés sur une synthèse de différentes méthodes de diagnostic de la machine asynchrone en présence de défauts ;après tout nous avons analyse chaque défaut une signature spectrale qui lui est propre, Enfin plusieurs techniques de diagnostic ont été brièvement présentées concentrant sur celles appartenant à l'approche signal et après tout la maintenance prédictive' ou 'proactive' dont l'objet est la détection des défauts parfois avant même qu'ils ne se manifestent visiblement. Tous ça pour donnée un rendement meilleur de la machine asynchrone.

Le prochain chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone par éléments finis.

CHAPITRE II :

Modélisation de MASY par éléments finis

CHAPITRE II : Modélisation de MASY par éléments fins

II.1. Introduction:

La MASY a été largement exploitée dans le domaine industriel. Ayant une technologie simple, la MASY peut être adoptée dans la plupart des applications liées aux entraînements électriques. Cependant, cette machine souffre d'une dynamique très complexe en raison de la présence d'un fort couplage entre les circuits inducteurs, c'est-à-dire les circuits créant principalement le champ magnétique dans la machine et statorique et rotorique. Une autre difficulté rencontrée lors de la modélisation de la machine asynchrone est la non-linéarité de son circuit magnétique. En effet, la machine asynchrone standard est, généralement, modérément saturée durant son fonctionnement normal. [M.A.15].

La modélisation des phénomènes électromagnétiques passe, respectivement, par la résolution des équations de Maxwell associées aux conditions de passage entre deux milieux différentes du point de vue diélectrique et/ou magnétique et des conditions aux limites. La résolution de ces modèles d'équations aux dérivés partiels spatio-temporelles nécessite l'emploi des méthodes numériques performantes telles que la méthode des éléments finis. Elle permet, outre de vaincre la complexité technique et la réduction des coûts et délais de conceptions, d'améliorer la qualité des machines. Nous nous intéressons dans cette étude, à la modélisation du comportement électromagnétique mécanique des machines asynchrones en régime transitoire et son implantation dans un code de calcul par les éléments finis. [SMS 15].

II.2 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS

Les éléments finis sont une technique de discrétisation qui permet de transformer une théorie « continue » conduisant à des problèmes mathématiques insolubles, comme par exemple la physique des milieux continus, en une théorie « discrète » conduisant à de simples systèmes d'équations que l'on sait résoudre. Cette transformation repose sur des hypothèses fortes, qui réduisent le domaine de validité de la théorie et qui doivent donc être bien comprises. Les logiciels de simulation par éléments finis sont de plus en plus utilisés dans l'enseignement des sciences de l'ingénieur, notamment au lycée. Cependant, ils font appel à des théories et des méthodes relativement sophistiquées, qui rendent l'interprétation de leurs résultats difficile à ce niveau.

Cette ressource, principalement destinée aux non-spécialistes, présente les différents concepts que doit connaître un enseignant pour comprendre les simulations par éléments finis et en interpréter les résultats.

La méthode des éléments finis, grâce à sa fidélité au comportement électromagnétique de la machine, permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut. Elle se caractérise essentiellement par:

- ✓ Prise en compte de la géométrie de la machine.
- ✓ Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques
- ✓ La méthode des éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace, cet avantage est très important particulièrement pour détecter les défauts en utilisant la technique d'analyse spectrale.
- ✓ De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

Il s'avère donc que la méthode des éléments finis, en dépit de ses exigences en moyens et en temps de calculs très importants, reste la plus fidèle au comportement électromagnétique de la machine. C'est l'une des raisons qui a orienté et justifié notre choix de cette méthode pour notre étude.

II.2.1. EQUATIONS DE BASE DE LA MASY

Dans les machines électriques à flux radial (auxquelles nous nous intéressons), la distribution du champ électromagnétique est supposée invariante suivant la direction longitudinale.

Un modèle bidimensionnel permet ainsi d'obtenir la solution avec une précision suffisante. C'est pour quoi, nous limiterons notre étude à la résolution des équations électromagnétiques en 2-D

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -\frac{i_s}{S} - \frac{\sigma}{l_m} u_{bmm} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- A potentiel vecteur magnétique ;
- I_s / S densité du courant statorique
- U réluctivité magnétique
- U_{bmm} différence de potentielle entre barres rotorique
- ϵ conductivité électrique
- S section des conducteurs

La détermination de la distribution du champ magnétique dans la machine nécessite la résolution de l'équation d'électromagnétique. Cette équation décrit le comportement de la machine dans un domaine, tridimensionnel qui reste difficile à traiter.

Nous adoptons quelques hypothèses simplificatrices qui restent, toute fois, justifiées et concordantes avec l'objectif recherché dans notre travail [BL 01].

❖ **Les relations de couplage électromagnétique :**

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

❖ **Les relations de la conservation des flux :**

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.5})$$

❖ **la relation régissant les propriétés des matériaux magnétiques :**

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

❖ **La relation de la loi d'Ohm :**

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.8})$$

H : Champ magnétique (A/m)

E : Champ électrique (V/m)

B : Induction magnétique (T)

B_r : Induction rémanente des aimants (T)

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

μ : Perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductibilité électrique (Ω⁻¹m⁻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 :

- **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

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{II.11})$$

La condition (II.10) permet de définir une fonction en vecteur potentiel A telle que:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{II.12})$$

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

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

$$\text{rot}(\nu \cdot \text{rot} \vec{A}) = \vec{J} + \text{rot}(\nu \cdot \vec{B}_r) \quad (\text{II.13})$$

Où

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

- **Le mode magnétodynamique**

Ce modèle s'applique aux dispositifs qui ont des sources du courant ou de la tension varient en fonction du temps, Le terme $\frac{\partial B}{\partial t}$ n'est pas nul. Et qui suppose la densité de courant sinusoïdale, et simule 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 :

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + j\omega\sigma\vec{A} = \vec{J} \quad (\text{II.14})$$

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

- **Le mode magnétique transitoire**

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

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{rot} \vec{B}_r + \sigma \text{grad} V = 0 \quad (\text{II.15})$$

II.3 LE PRINCIPE DE LA MEF

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 assurées la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. La majorité des formes d'approximations du potentiel dans un élément sont des approximations polynomiales [KHE 12].

Pour un élément triangulaire on a :

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

Pour les éléments quadrilatéraux on a:

$$Ae(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (\text{II.17})$$

Les constantes a, b, c et d sont à déterminer en utilisant les potentiels aux nœuds Correspondants. Le potentiel A_e est défini sur l'élément et nul ailleurs. La valeur approximée du potentiel dans tous les éléments du domaine de résolution est donnée par :

$$A(x, y) = \sum_{e=1}^{n_e} A_e(x, y) \quad (\text{II.18})$$

e : Numéro d'élément.

n_e : 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 (Figure. II.1).

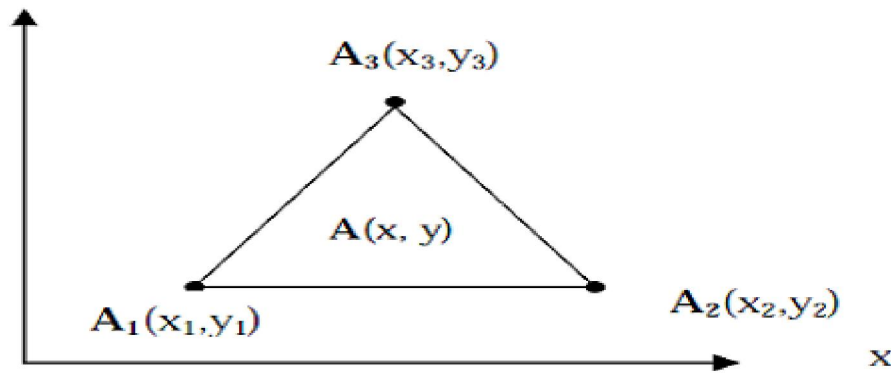


Figure II.1 : fonction d'interpolation d'un élément

II.4 .Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [BS 15].

- ✓ introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- ✓ Maillage
- ✓ résolution.
- ✓ exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées.

Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une Méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes.

C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux -2D.

II.5 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. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. 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 [SK 12].

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés :

❖ **Module Construction (Prelux) Il contient trois fonctions :**

- ✓ **geometry & physics** ; permet de définir la géométrie et le maillage du dispositif à étudier, de déterminer le type du problème (magnétostatique, magnétodynamique ou transitoire) et associer des matériaux et des propriétés (magnétiques et électriques) à chaque élément de la géométrie.
- ✓ **Circuit** définit le schéma et les données du circuit électrique.
- ✓ **Materials database** permet de choisir et de construire une banque de matériaux.
Ce module assure aussi le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique d'alimentation.

❖ **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.

L'enchaînement de ces modules de Flux 2D est schématisé par la figure II.2.

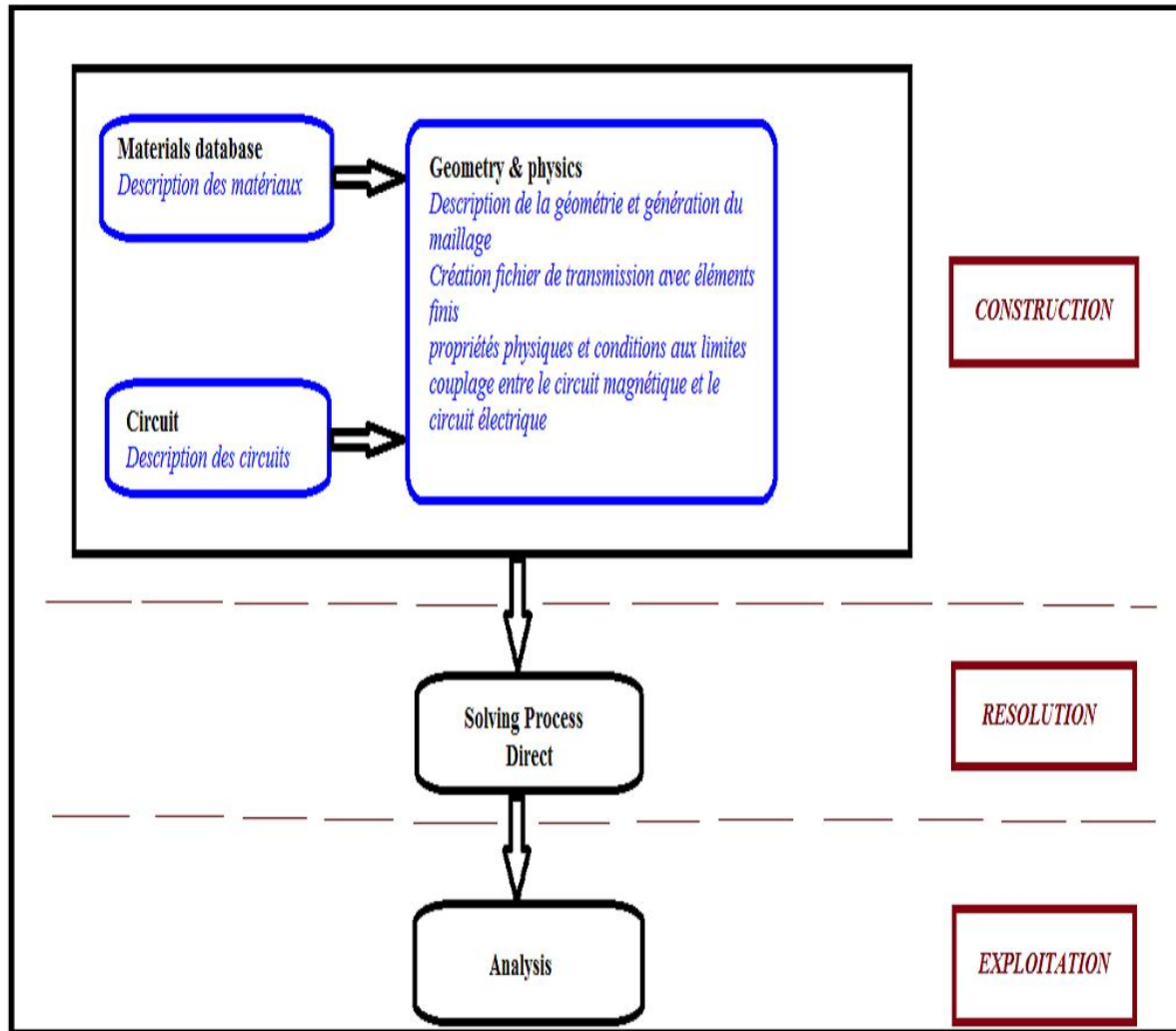


Figure II.2 l'enchaînement des programmes de Flux 2D

II.6. Construction du modèle 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 [DB 02] :

- ✓ 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.

Les autres hypothèses qu'on a considéré dans le développement de notre modèle sont :

- ✓ L'hystérésis et les pertes fer sont négligées.

- ✓ l'alimentation est purement sinusoïdale
- ✓ L'air autour de la machine et l'arbre ne sont pas modélisés pour cela la condition de Dirichlet ($A=0$) est appliqué sur les nœuds extérieurs du stator et celles intérieurs du rotor, ce qui force les lignes de flux à être tangentiels à ces deux surfaces.

II.6.1 Les données de la machine étudiée

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

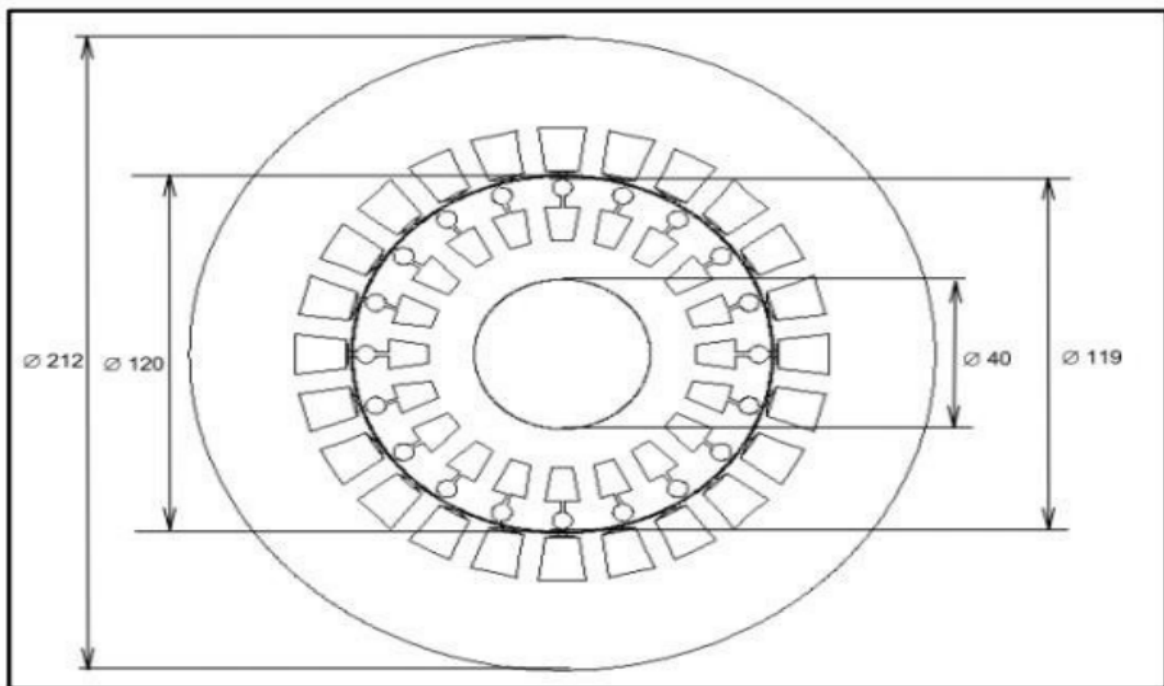


Figure II.3: Les dimensions de la machine

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur

La figure (II.4).

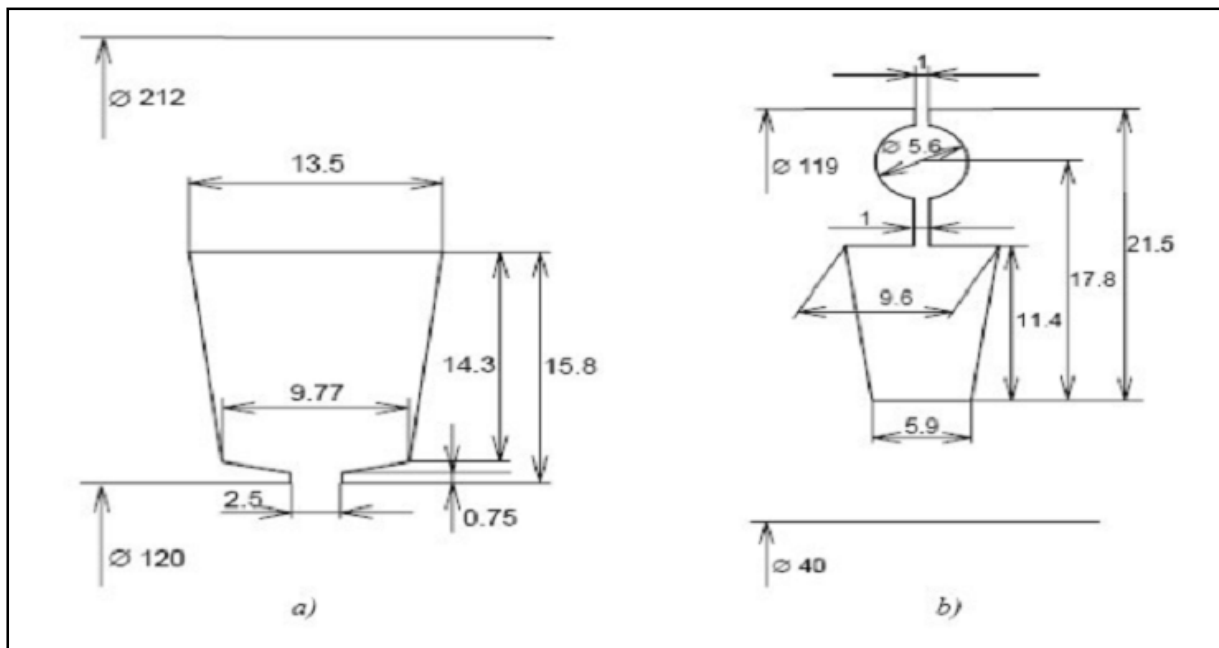


Figure II.4: Dimension des encoches, a) l'encoche statorique b) l'encoche rotorique.

L'enroulement du stator est un enroulement de cuivrée deux couches, **Figure II.5**, avec Une étape raccourcie de 8/12 et $w_1 = 208$ tours par phase.

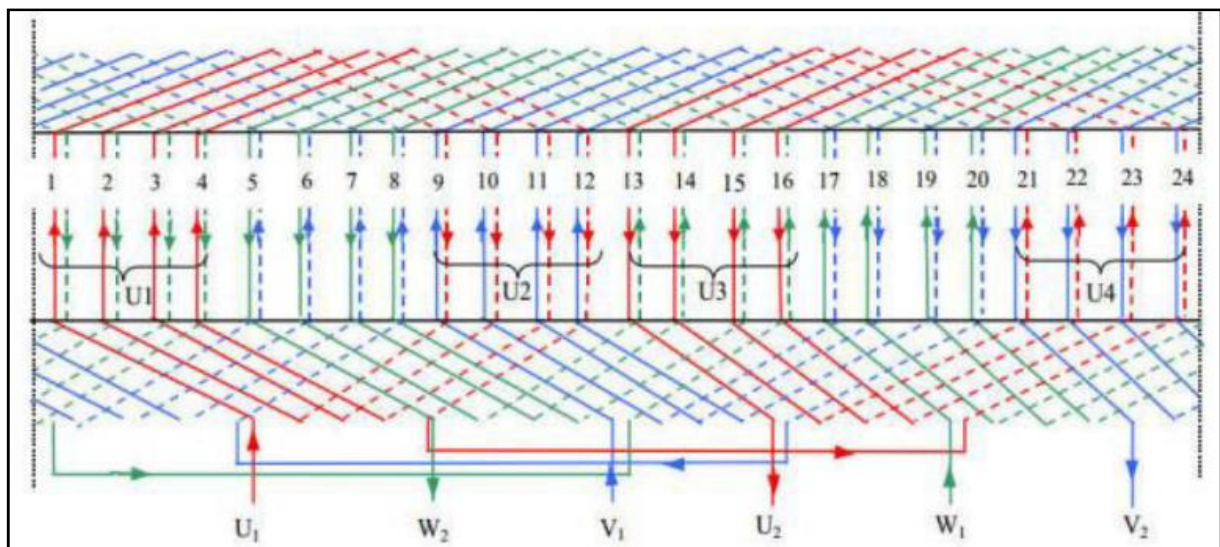


Figure II.5: Bobinage statorique

❖ Circuit magnétique de la MAS

La figure II.6 présente le circuit magnétique de la machine asynchrone et la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

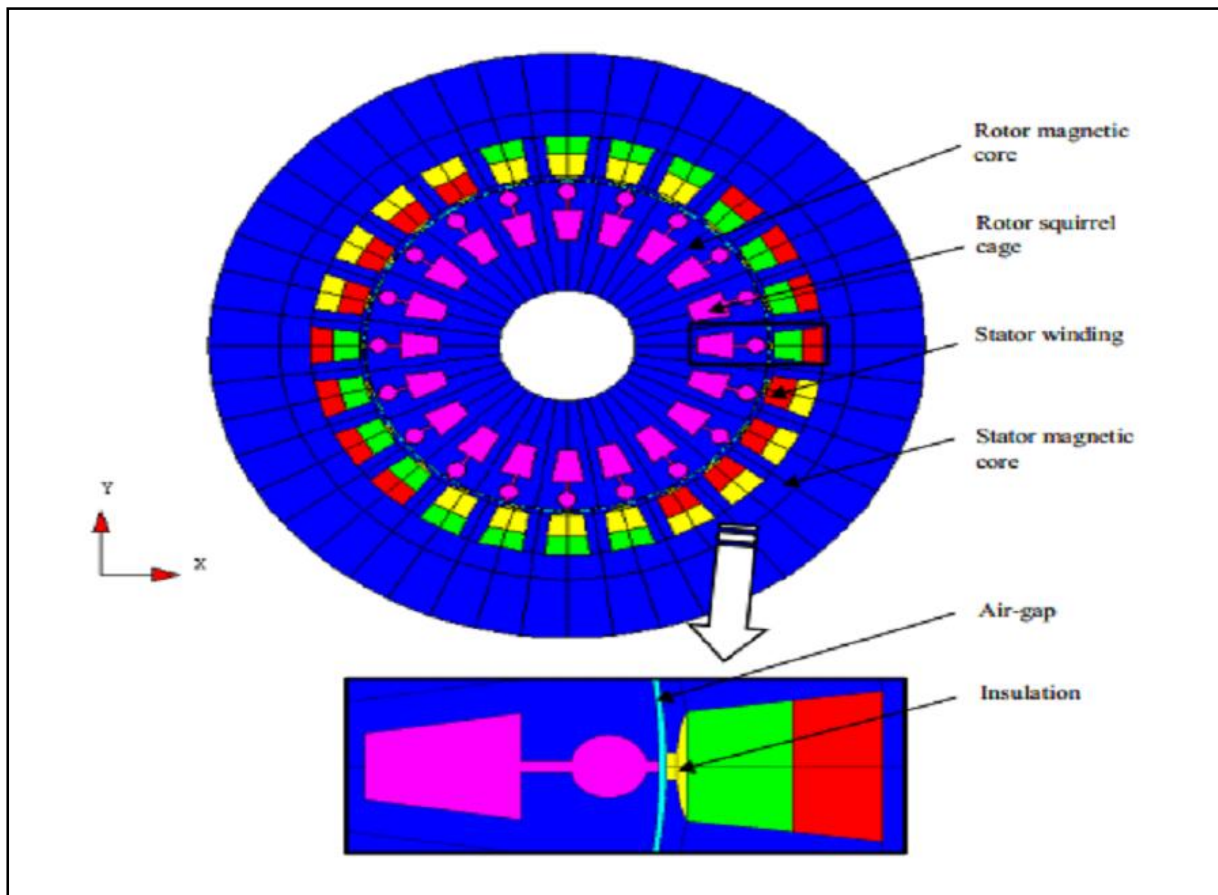


Figure. II.6: Circuit magnétique de la MASY

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

Paramètres		Valeurs
MACHINE	Puissance	7.5 KW
	Tension	380V
	Fréquence	50Hz
	Nombre de pôles	2
STATOR	Les encoches statorique	24
	Diamètre extérieur	212mm
	Diamètre intérieur	120mm
	Résistance par phase	9.5Ω
ROTOR	Nombre d'encoches rotorique	20
	Diamètre extérieur	119mm
	Diamètre intérieur	40mm
ENTREFER	Épaisseur	0.5mm

Tableau II.1 : Paramètres globales de la machine

II.6.2 Procédure de construction du modèle par FLUX2D

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.

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 va 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 construits 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 le 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. Le tableau suivant présente la taille des éléments qu'on a choisis :

Les points de maillage	La taille	Associés à
MRID	8mm	Diamètre intérieur du rotor
MRBOT	2mm	bas des barres
MRTOP	1.2mm	Têtes des barres
MAIRGAP	0.5mm	Deux limites de l'entrefer
MSTOP	2mm	Têtes des encoches
MSOD	8mm	Diamètre extérieur du stator

Tableau II.2: la taille des éléments du maillage

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 égal à $360/20$. Pour le stator on définit une transformation du même type avec un angle égal à $360/24$. On applique la première à la surface qui représente la barre rotative 19 fois et la deuxième à la surface de l'encoche statorique 23 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 23 fois en appliquant la même transformation de l'encoche statorique. Finalement on choisit la commande **Build Faces** pour créer le reste des surfaces.

La figure si dessous présente la géométrie avec les points du maillage.

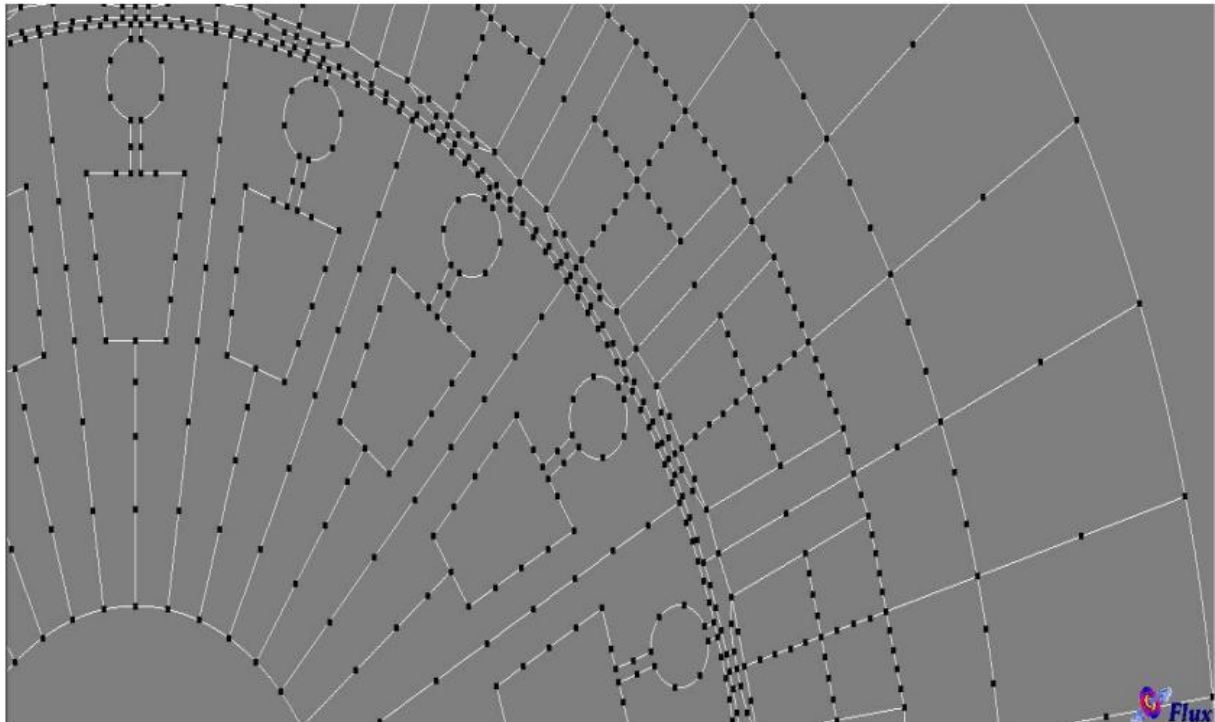


Figure II.7: Les points de maillage

Jusqu'à 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.8** représente le maillage effectué sur le circuit magnétique de la machine.

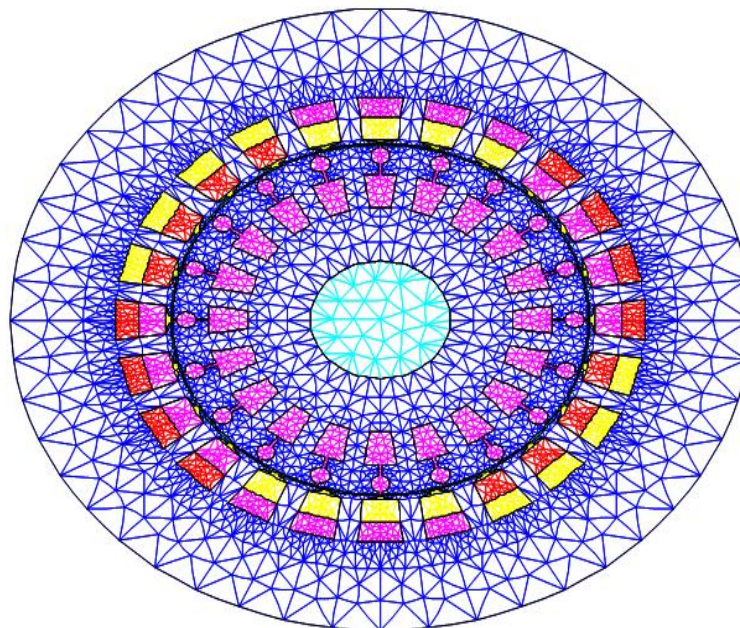


Figure II.8.: Répartition du maillage

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entre fer 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 [SK 12].

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).

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau II.3).

H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]	H [A/m]	B [T]
0	0	2000	1.61	7000	1.83	40000	2.14
300	0.66	3000	1.69	8000	1.85	50000	2.16
500	1.09	4000	1.73	10000	1.89	60000	2.18
1000	1.45	5000	1.76	20000	2.04	70000	2.1925
1500	1.56	6000	1.79	30000	2.11		

Tableau II.3: B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

La courbe B(H) du circuit magnétique est représentées ci –dessous

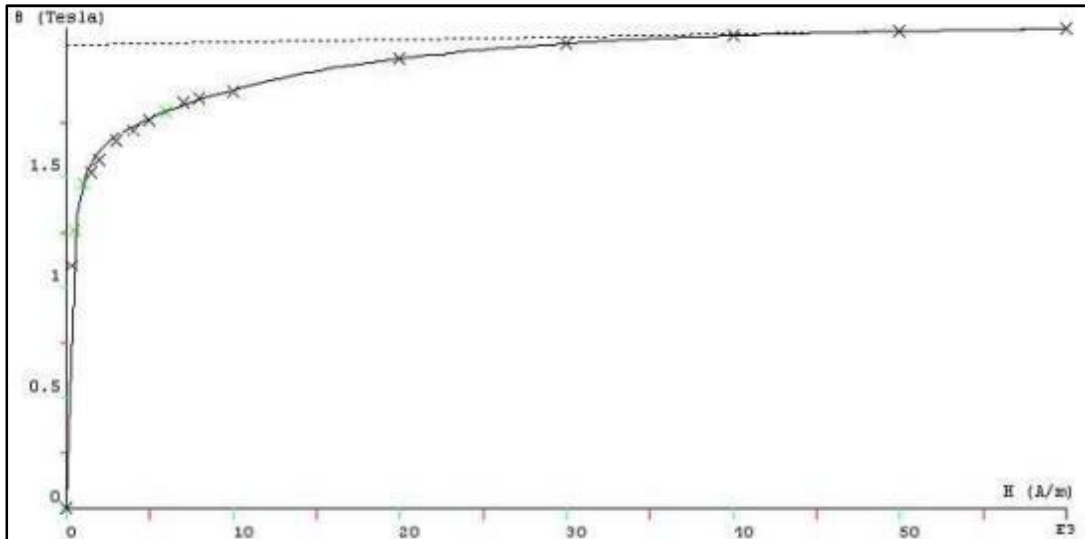


Figure. II.9: Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.

II.6.3 Le circuit électrique

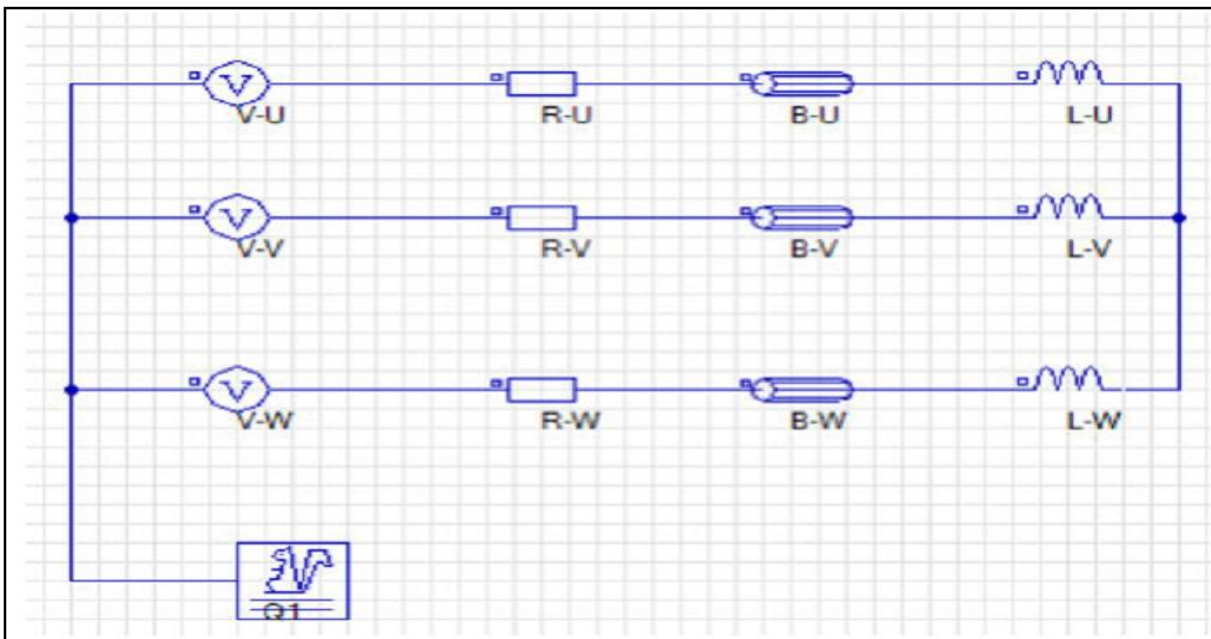


Figure. II.10 : CIR_VOLTAGE circuit pour voltage source de simulations.

Les paramètres du circuit électrique qui aimanté la machine a simulé :

$$R_U, R_V, R_W = 0.9 \Omega$$

$$L_U, L_V, L_W = 4.04 \text{ mH}$$

$$B_U, B_V, B_W = 1.54 \Omega$$

$$R_{\text{cage d'écureuil}} = 1.39\text{e-}6 \Omega$$

$$L_{\text{cage d'écureuil}} = 1.06\text{e-}8 \text{ H}$$

$$V_U = 380 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(314 \cdot \text{TIME})$$

$$V_V = 380 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(314 \cdot \text{TIME} - 2.094)$$

$$V_W = 380 \cdot \text{SQRT}(2) \cdot \text{SIN}(314 \cdot \text{TIME} + 2.09)$$

Nombre de barre de la cage d'écureuil=20barres

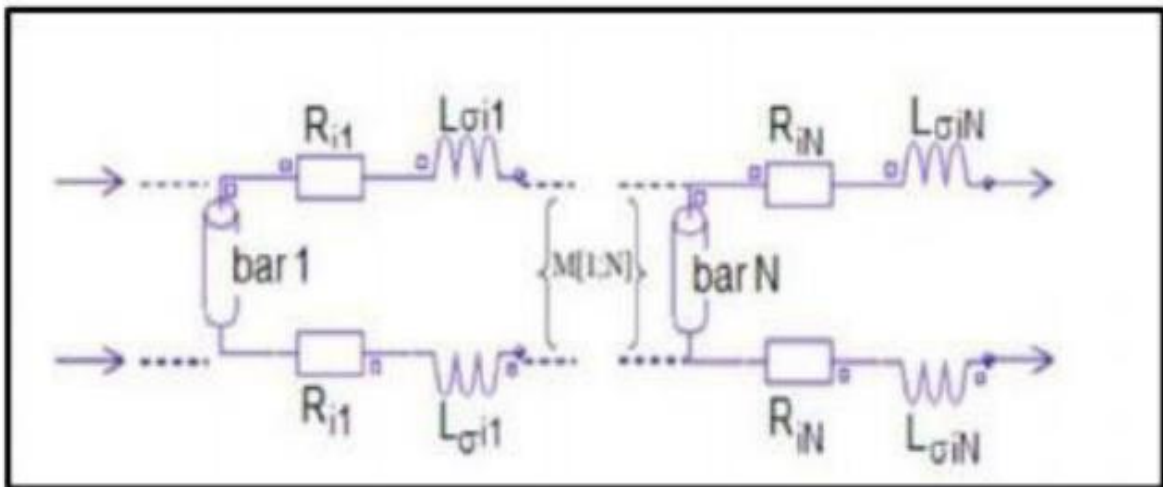


Figure II.11: Circuit équivalent de la cage rotorique.

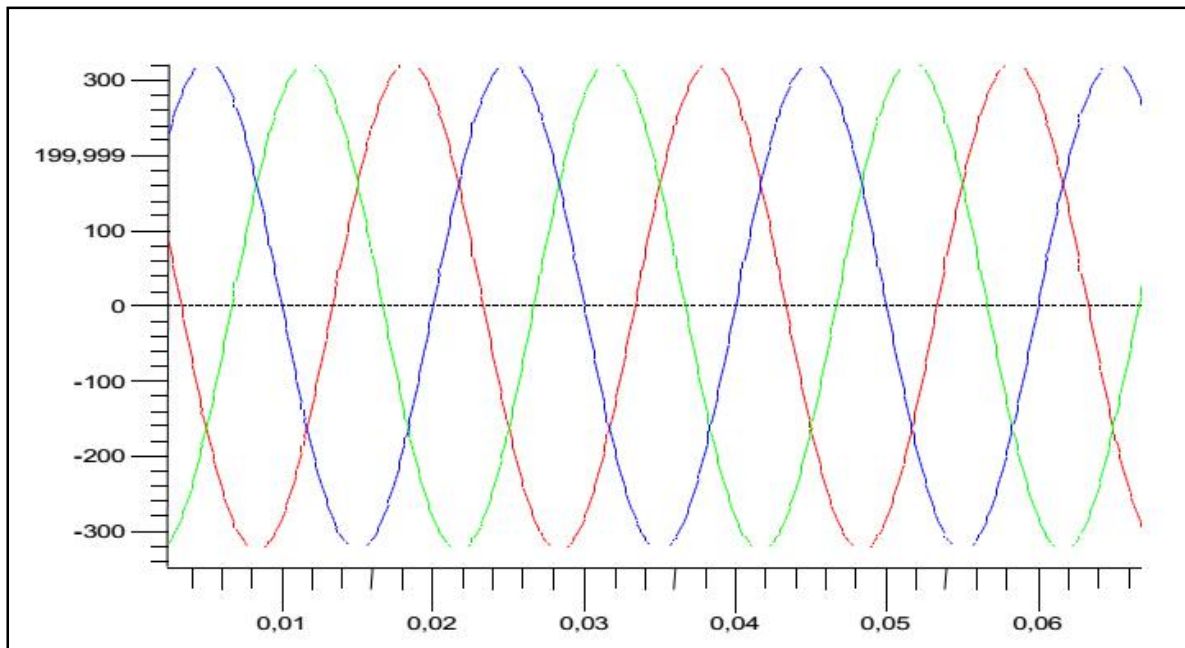


Figure II.12. les tensions d'alimentation V1, V2 et V3.

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 : définit les parties fixes du modèle.

En 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 définie par son nom, son type, matériel, l'élément électrique correspondant 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 regions 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.7.Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle numérique de la machine asynchrone, basé sur la méthode des éléments finis. 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. Puis on est passé à la description de principe de calcul et du logiciel utilisé.

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

Le prochain chapitre est dédié à la validation des simulations d'une machine asynchrone dans son état sain et dans son état ayant un défaut au niveau des barres rotoriques de la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil.

CHAPITRE III :

Diagnostic et simulation de la MASV

Triphasée à cage avec défaut : cassure de barre

III.1 INTRODUCTION

Comme il a été déjà mentionné précédemment, selon les enquêtes menées sur les différents modes de défaillance dans les machines asynchrones à cage d'écureuil, les défauts liés au rotor sont estimés à 20% du total des défaillances produites lors du fonctionnement de la machine où le défaut lié à la rupture de barres rotoriques occupe une place importante dans les défauts enregistrés.

Dans ce contexte et dans le but de présenter une étude liée aux défauts et dans un contexte lié à la prédiction et au diagnostic des défauts dans les machines électriques, nous allons présenter dans ce chapitre les résultats des simulations du comportement électromagnétique et mécanique de la machine dans son état sain et dans son état ayant un défaut produit principalement par la défaillance d'une des barres rotoriques.

Une étude comparative entre le comportement d'une machine saine et d'une machine portant un défaut permettra de déduire la présence de défaut. Dans cette comparaison, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques sont adoptées. Via cette comparaison, la différence entre le comportement d'une machine saine et d'une machine ayant un défaut permettra de déduire la présence du défaut et sa nature. Le recours vers l'utilisation des méthodes du traitement de signal permettra de donner une meilleure vision sur la présence du défaut et sur sa nature. Parmi ces méthodes, la méthode de transformée de Fourier (FFT) peut être exploitée.

Les simulations sont effectuées à partir d'un logiciel dédié à la modélisation des comportements : électromagnétiques, mécaniques et thermiques dans les cas, bidimensionnelles et tridimensionnelles. Il s'agit du logiciel Flux2D déjà présenté et qui adopte la méthode des éléments finis exploitée pour la résolution des problèmes électromagnétiques et mécaniques régissant par des équations aux dérivées partielles. Les paramètres physiques et géométriques de chaque partie de la MASY sont accessibles via des fenêtres implémentées sous le logiciel Flux 2D qui permettent facilement d'agir sur le comportement des matériaux utilisés dans la conception de la machine.

La simulation du défaut rotorique est introduite par l'augmentation de la résistance rotorique d'une barre où le défaut peut être introduit. En effet, une barre cassée signifie que le courant circulant dans celle-ci est soit nul, dans ce cas, il faut simuler le défaut par une résistance ayant une très grande valeur, soit il sera diminué et le courant qui circulait à travers cette barre se répartit sur les autres barres adjacentes et le défaut dans ce cas, sera

simulé par l'augmentation de la résistance rotorique. Ces derniers seront surchargés, ce qui provoquera leurs ruptures, et parfois un arrêt total de la machine.

III.2. Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage (machine à l'état sain).

Dans la partie ci-dessous nous présentons les résultats des simulations d'une machine asynchrone dans son état sain et dans son état ayant un défaut au niveau des barres rotoriques.

La machine présentée est considérée comme bipolaire est conçue à partir d'une cage d'écureuil ayant une puissance de 7.5Kw. La tension nominale entre phases est de 380V et les caractéristiques nominales de la machine ont été présentées précédemment. La vitesse nominale de la machine est estimée à 3000 tr/m. Les propriétés magnétiques de la machine ont été introduit sous forme de valeur pour décrire la première courbe d'aimantation e qui traduit la relation entre l'induction magnétique \mathbf{B} et le champ magnétique \mathbf{H} . Celle-ci peut traduire le comportement non-linéaire des machines qui est dû principalement aux tôles magnétiques.

- L'utilisation du logiciel Flux-2D a permis d'appliquer un modèle du type magnétique transitoire avec couplage d'un circuit et qui permet à l'étude des phénomènes créés par un champ magnétique variable dans le temps. Le Champ magnétique est lié à la présence des courants électriques variables. Cette application permet à la prise en compte des courants induits dans les régions conductrices (courants de Foucault). Les modèles proposés par flux 2D permettent aussi à la prise en compte, dans ces régions conductrices, des effets de peau et des effets de proximité.
- Dans le modèle électromagnétique adopté par flux-2D, le potentiel vecteur magnétique A est adopté comme variable à déterminer, où la formulation dans sa version bidimensionnelle ou tridimensionnelle est résolue par la méthode des éléments finis.
- Les équations différentielles à résoudre sont décrites à partir des équations de Maxwell et par le système d'équations différentielles données par la formulation en A :

$$\mathit{curl} \left[\frac{1}{\mu} \cdot \mathit{curl} A \right] + \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) / \rho = J_s (x, y, z, t)$$

$$\mathit{div} A = 0$$

Où μ représente la perméabilité magnétique du matériau, ρ est la résistivité électrique du matériau et J_s représente la densité de courant dans les encoches statorique. Le terme $(\partial A / \partial t) / \rho$ représente la densité du courant induit qui est non nulle uniquement dans les Régions correspondant aux conducteurs massifs des encoches rotoriques. Dans le modèle du

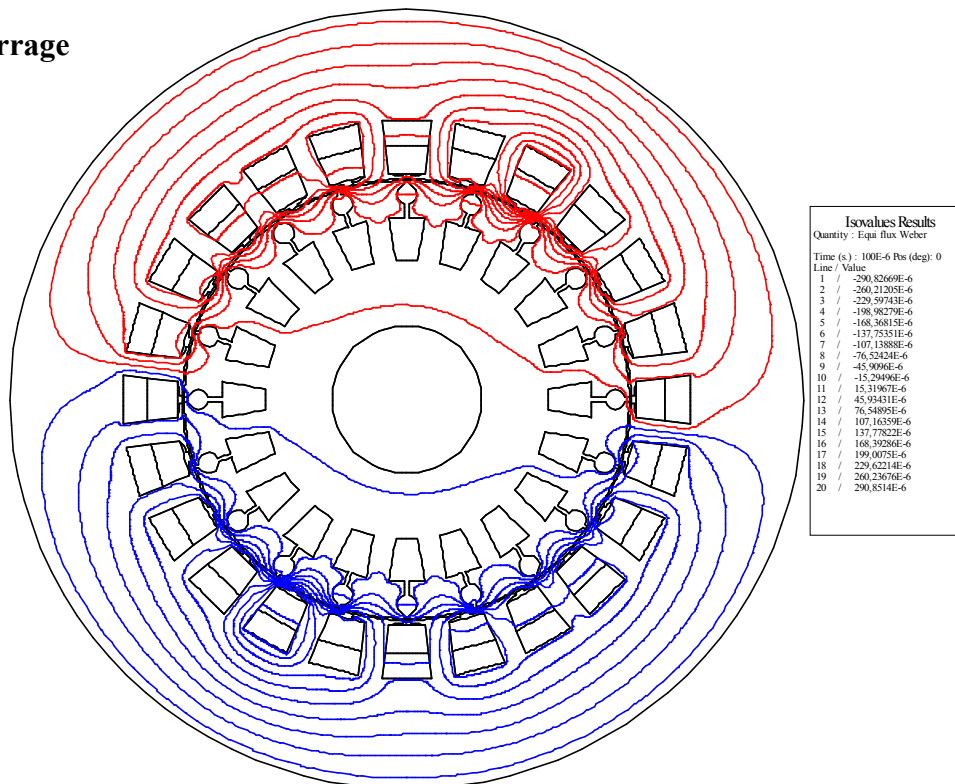
champ considéré pour cette étude, la source de densité de courant a la forme J_s $[0,0,J_s(x,y,z,t)]$.

III.2.1. Résultats des simulations de la MAS à l'état sain (à vide).

Les résultats des simulations caractérisant le fonctionnement de la MASY dans son état sain sont présentés aux figures, Fig.III.1-Fig.III.6. Dans ces résultats, la machine est supposée à vide (aucune liaison avec une charge mécanique à l'extérieur) et alimenté sous tension nominale de 380Volts. Dans ces résultats, nous avons d'abord présenté la répartition bidimensionnelle spatiale de l'induction magnétique à l'intérieur de la machine dans les deux cas, au démarrage et au régime permanent de la machine atteint à partir de l'instant $t = 0.45s$. (Fig.III.1-2). Le but est de mener une comparaison entre le comportement magnétique de la machine entre régimes, transitoire et permanent. Selon les résultats présentés on peut dire que la répartition de l'induction magnétique dépend de l'état de la machine. Dans un état transitoire, les lignes de champ ne peuvent pénétrer totalement la machine (une pénétration partielle du champ magnétique) ceci est dû principalement aux courants très élevés durant cette phase transitoire caractérisée par une inertie importante et qui nécessitent des courants de démarrage élevés. Au régime permanent, les courants deviennent moins importants, ainsi le champ magnétique pénètre totalement la culasse magnétique du rotor avec l'apparition de deux pôles magnétiques (une machine bipolaires). Les lignes de champ magnétique deviennent plus homogènes avec une parfaite symétrie au régime permanent.

La valeur du champ magnétique augmente progressivement pour atteindre son maximum au régime permanent. Bien-que le démarrage des machines électriques nécessite un courant élevé, ceci n'est pas le cas pour la valeur de l'induction magnétique où le champ magnétique pénètre progressivement la machine électrique en allant progressivement vers le régime permanent. Ceci peut être confirmé par la valeur des courants rotorique induit et qui doivent être très élevées au démarrage de la machine électrique, induisant ainsi, un fort couple électromagnétique.

a) Au démarrage



b) Au régime permanent

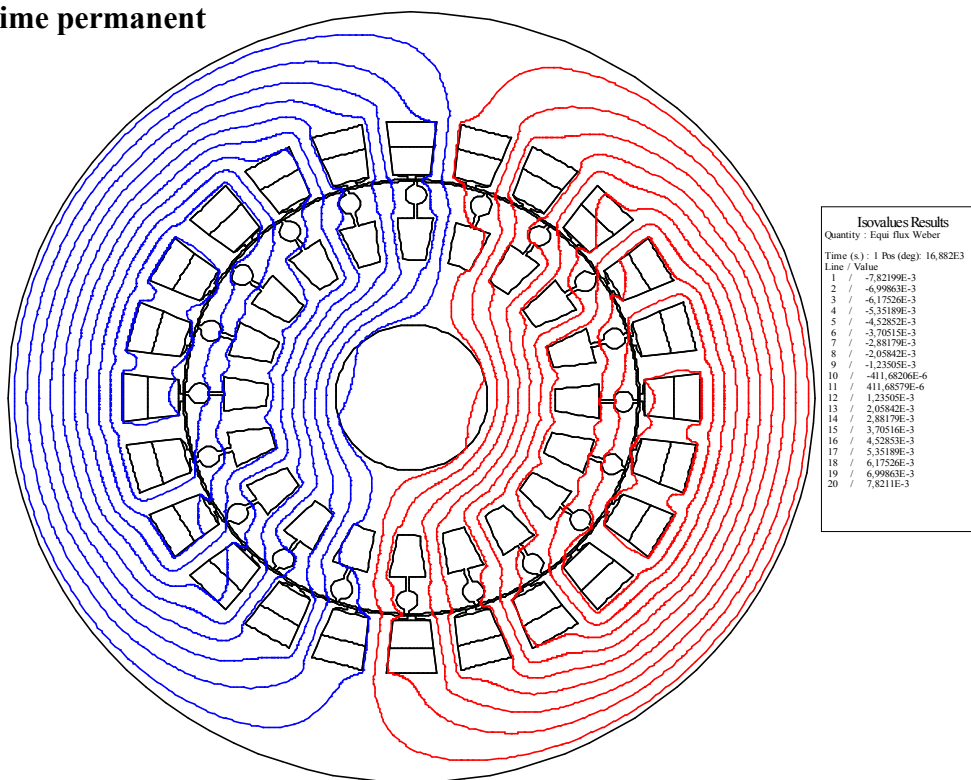


Figure III.1. Distribution des lignes du flux à vide, (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

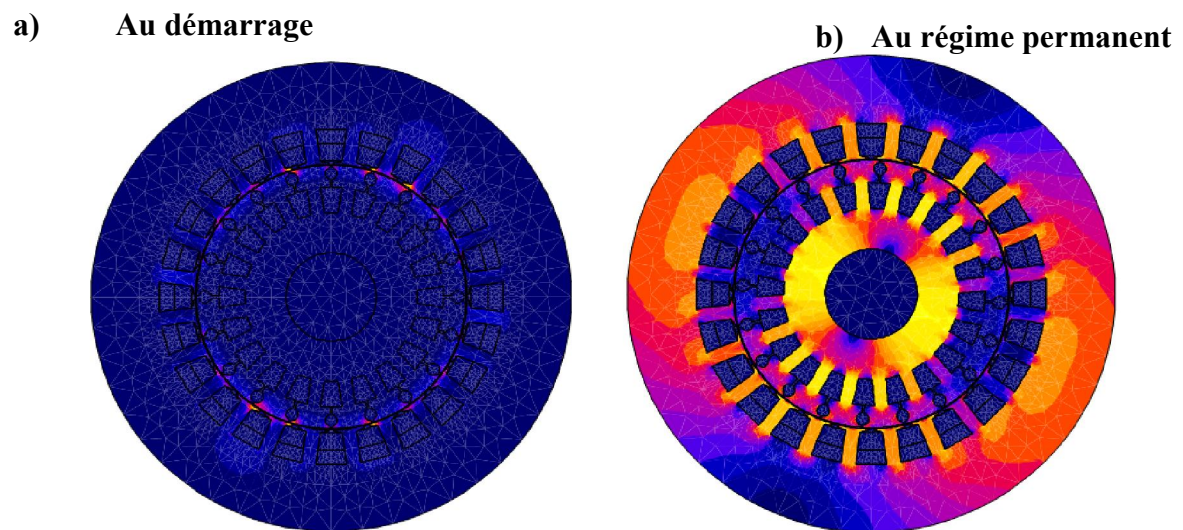


Figure III.2. Induction magnétique B à vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent.

Sur les figures Fig.III.3-4 nous avons présenté le comportement électrique de la machine dans son état sain n'ayant aucune charge mécanique (machine à vide). Dans ces figures, nous avons présenté la répartition temporelle respectivement, du courant statorique et du courant dans une barre rotorique. Selon les résultats présentés, on peut dire que la machine nécessite un courant statorique très élevé et qui peut atteindre un maximum de **70 A** au démarrage, soit une valeur de, presque, de sept fois le courant nominal. Durant cette phase considérée comme transitoire est lié principalement au démarrage de la machine, les courants dans les barres rotoriques est très élevés où il atteint un maximum de **4000 A**.

Ces courants créent un écrantage face à la pénétration du champ magnétique durant la phase de démarrage. Ces courants sont importants pour assurer le bon fonctionnement de la machine en particulier lors de démarrage de la machine électrique. Selon les allures des courants présentés on peut dire que le régime transitoire de la machine dure entre **0s et 0.45s**. Pour compléter la présentation des résultats, nous avons présenté aussi le comportement mécanique de la machine pour les mêmes conditions précédentes. Sur les figures, Fig.III.5-6 nous avons présentés l'évolution temporelle du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation de la machine électrique. La vitesse de la machine atteint une valeur inférieure à la vitesse de synchronisme estimé à **3000tr/min** où elle garde une valeur de **2980tr/min**. le couple électromagnétique de la machine subit un régime transitoire s'étalant entre **0s et 0.45s** ce dernier, englobe d'une part le régime transitoire magnétique et électrique.

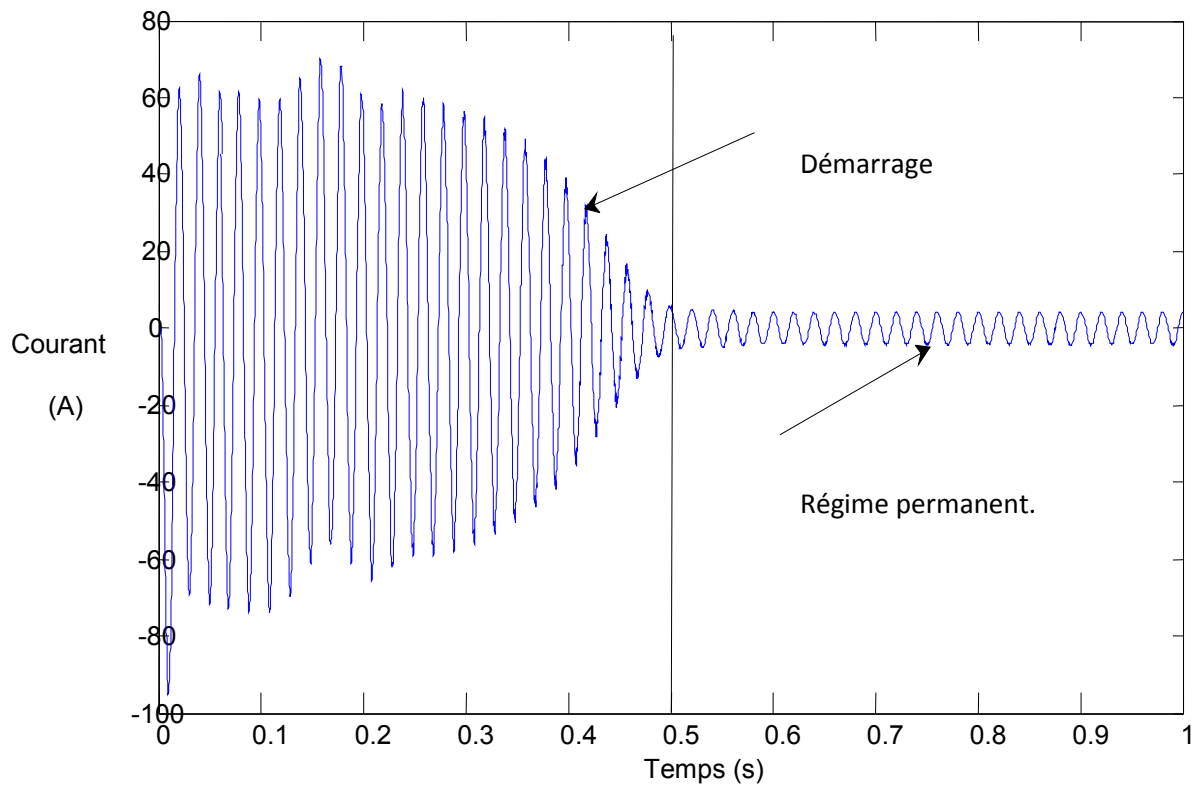


Figure III.3: Le courant statorique de la phase A à vide.

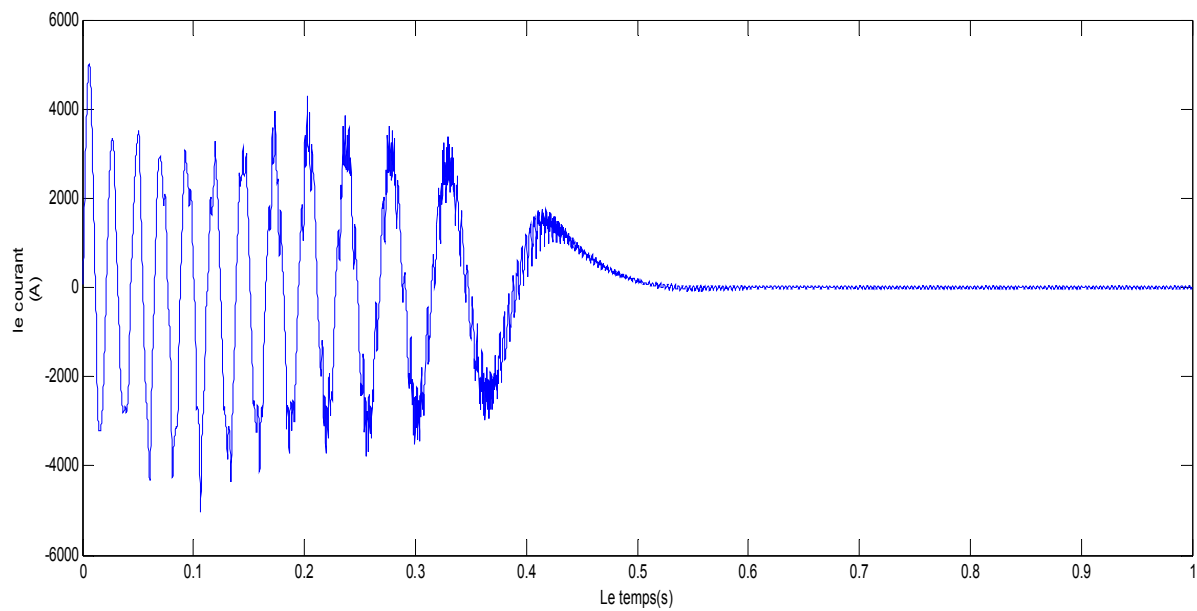


Figure III.4: Le courant dans la barre rotorique 1 à vide.

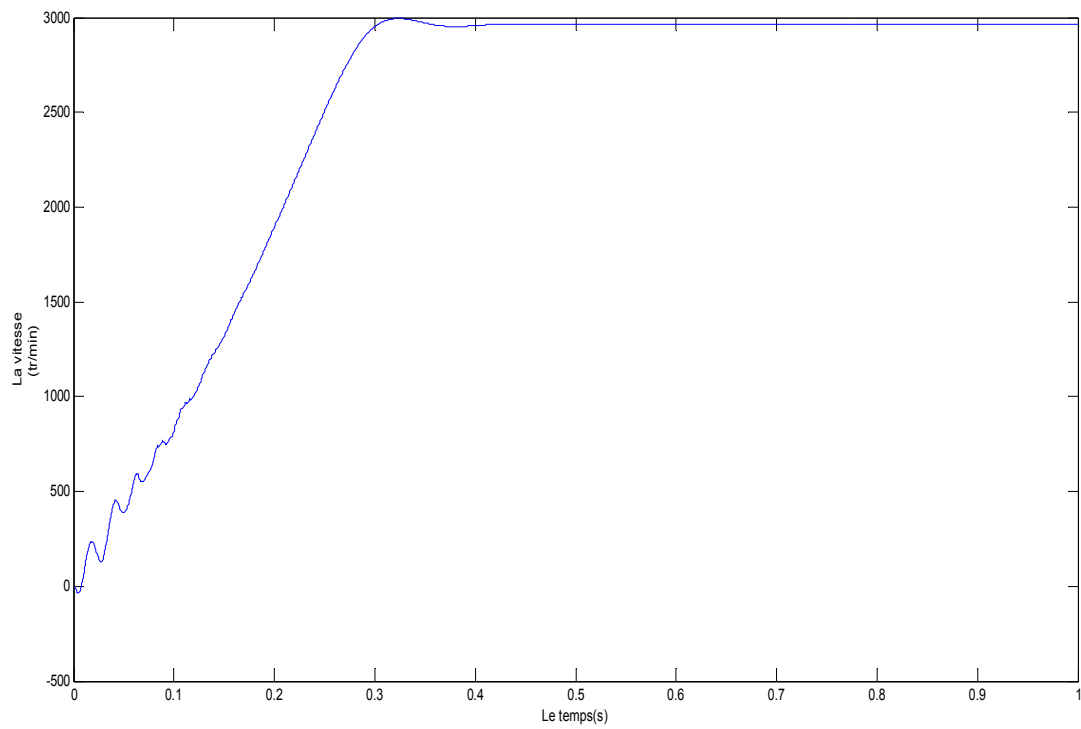


Figure III.5: La Vitesse de rotation à vide.

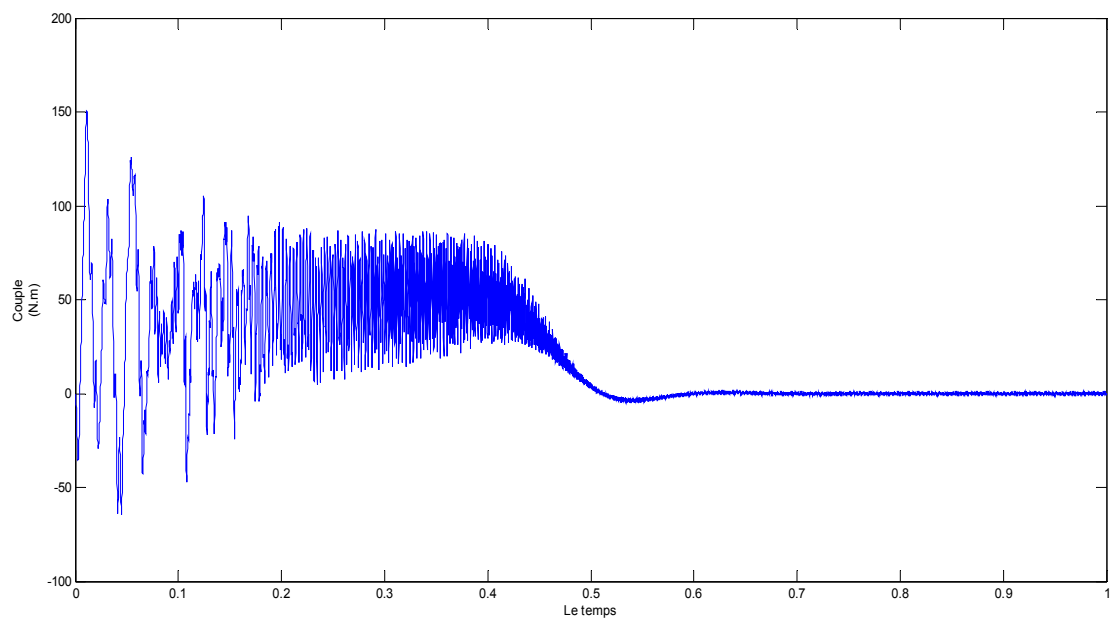


Figure III.6: Le Couple électromagnétique à vide.

III.2.2 Simulation de la MASY à l'état sain (en charge respectivement à 10 N.m et à 20 N.m)

A partir d'un modèle magnétodynamique pas à pas dans le temps, on peut obtenir des représentations de la répartition de lignes qu'équiflux, en fixant l'instant de la représentation, comme illustré dans la figure III.7. La distribution des lignes d'équiflux au début du calcul dans le régime transitoire (figure III.7.a) avant d'éteindre le régime permanent (figure III.7.b) montre que les lignes de champ magnétique traversent les barres perpendiculairement aux parois verticales et que la densité de courant est d'autant plus élevée que l'on se rapproche de l'entrefer (haut de la barre) (voir figure III.7.a).

Pour une vitesse de **2930 tr/min**, c'est-à-dire pour un glissement faible et quand la machine passe au régime permanent (figure III.7.b) les lignes de flux sont présentés jusqu'au l'intérieur du rotor. Nous remarquons bien la présence de paires de pôles, la distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. La répartition de la densité du flux magnétique dans le circuit magnétique de la machine au régime permanent est aussi quasi symétrique (voir figure III.8.b). Ainsi, la visualisation des autres répartitions comme la perméabilité magnétique et la densité du courant électrique dans le circuit magnétique sont disponibles à chaque instant.

Dans cette partie nous allons présenter les comportements, électriques, magnétique et mécaniques de la machine électrique dans son état sain mais entraînent une charge mécanique, respectivement de 10N.m et de 20 N.m. Le but est de mener une comparaison entre le comportement de la machine dans son état sain, avec et sans charge mécanique et aussi de voir l'influence de l'augmentation de la charge mécanique sur le comportement de la machine. Sur les figures, Fig.III.7-8 et Fig.III.9-10, nous avons présenté les résultats des simulations du comportement électromagnétique de la machine respectivement pour une charge mécanique de 10 N.m et de 20 N.m. Selon les résultats présentés on peut dire que le comportement magnétique des machines ne diffère pas où bien elle n'apparaît pas selon les résultats présentés, cependant et selon les résultats représentant l'évolution temporelle du courant statorique, on constate que celui-ci augmente au régime permanent avec l'augmentation de la charge mécanique. La durée du régime transitoire ne semble pas être influencée par la variation de la charge, cependant la valeur du couple électromagnétique dépendra de la valeur de la charge mécanique. L'augmentation de la charge est accompagné par l'augmentation du courant et par conséquent du couple développé par la même proportion ce qui est a entraîné un même temps du régime transitoire.

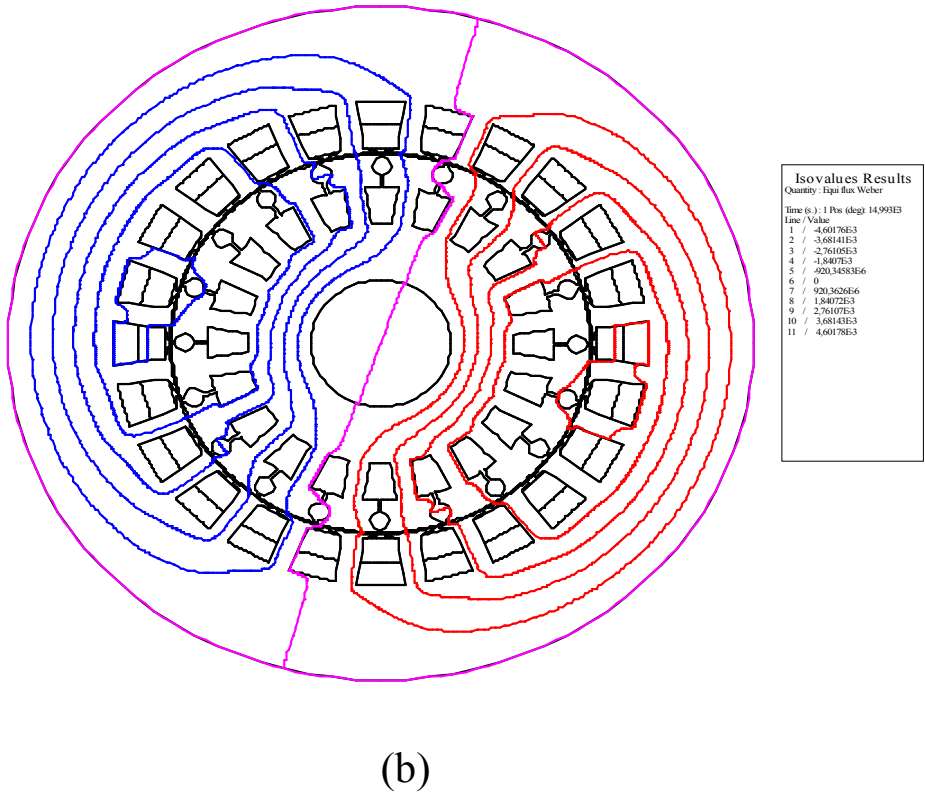
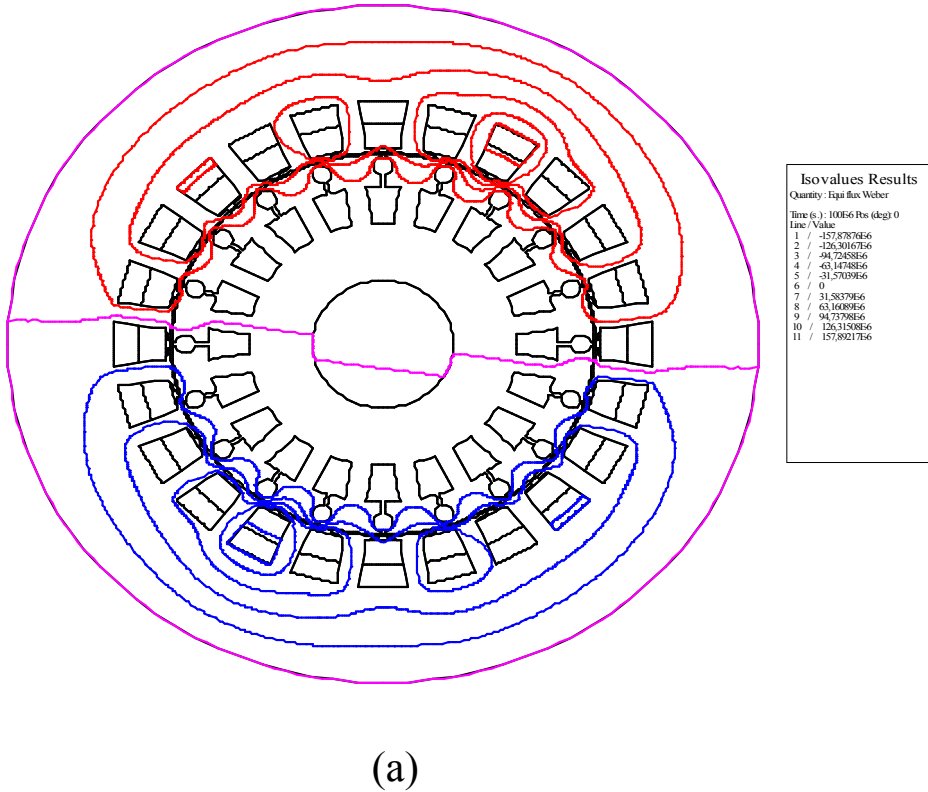
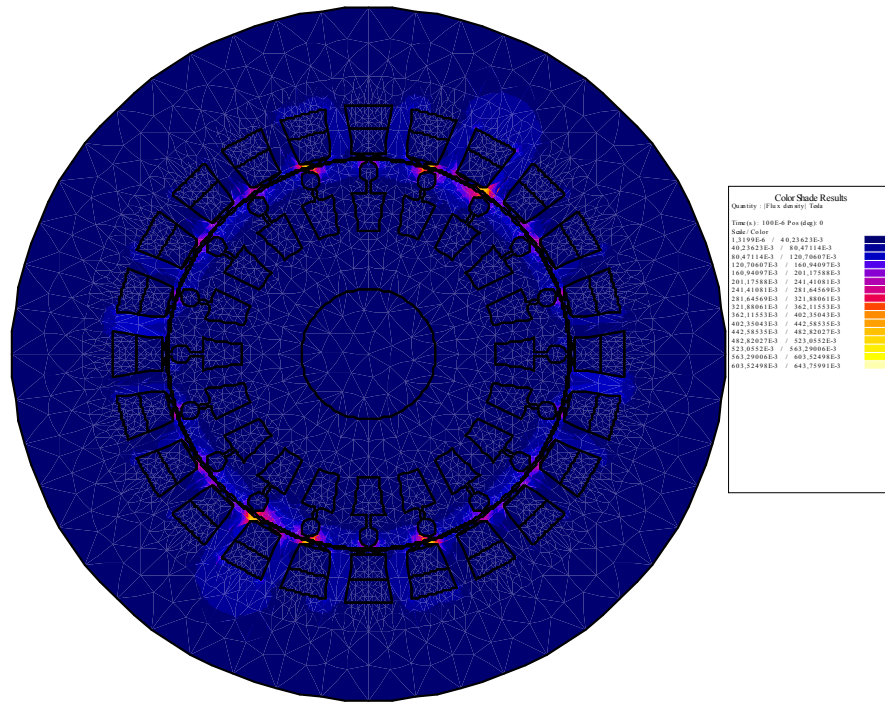
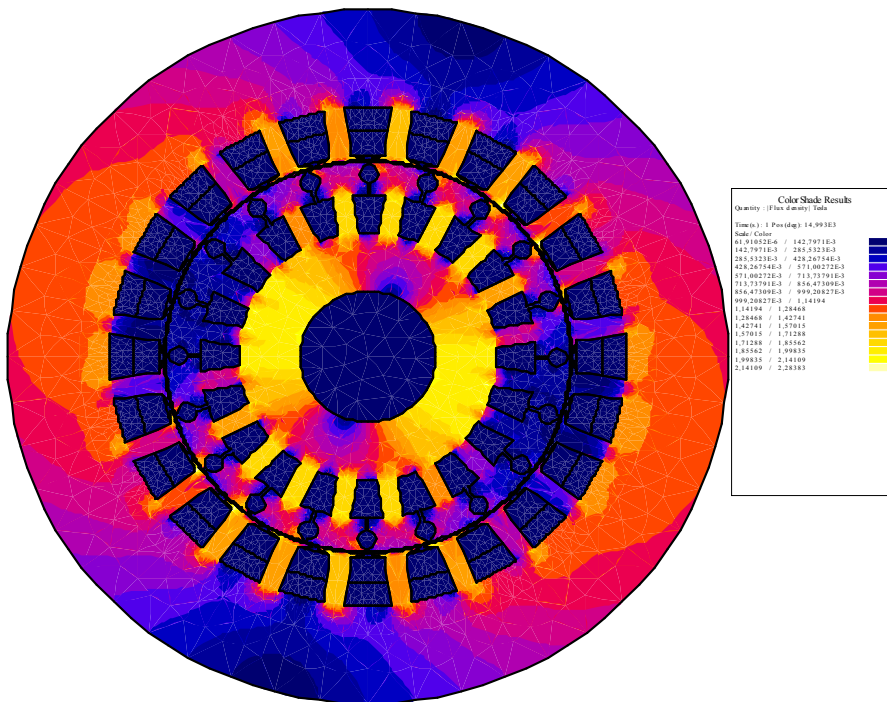


Figure III.7. La Distribution des lignes du flux en charge (a) et au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge mécanique de 10 N.m.



(a)



(b)

Figure III.8. L'induction B en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge mécanique de 10N.m

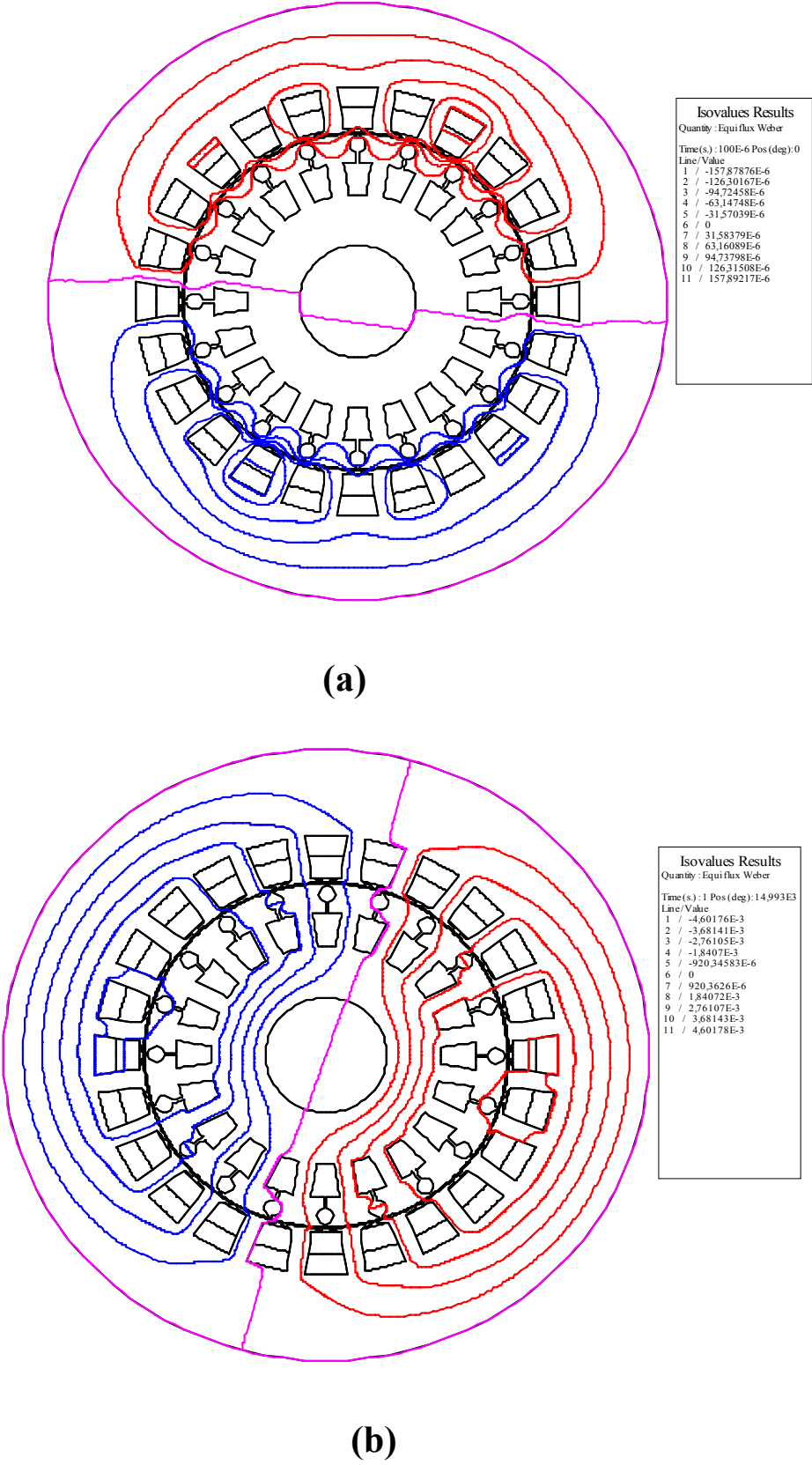


Figure III.9. Distribution des lignes du flux en charge (a) au démarrage ; (b) en régime permanent pour une charge mécanique de 20 N.m.

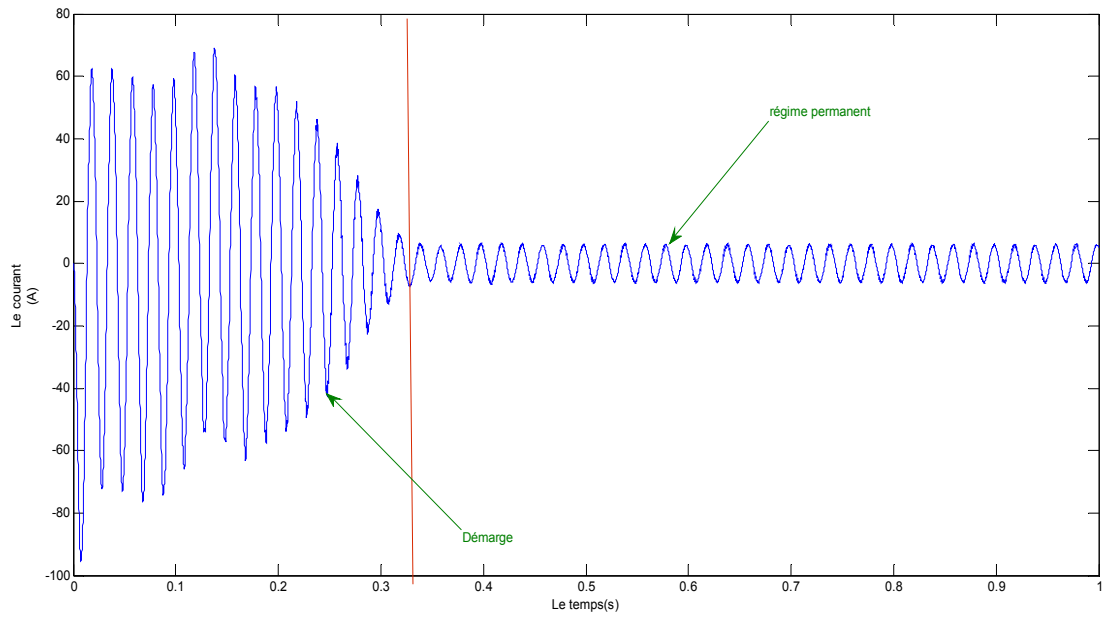


Figure III.10. Le courant statorique de la phase en charge (10N.m).

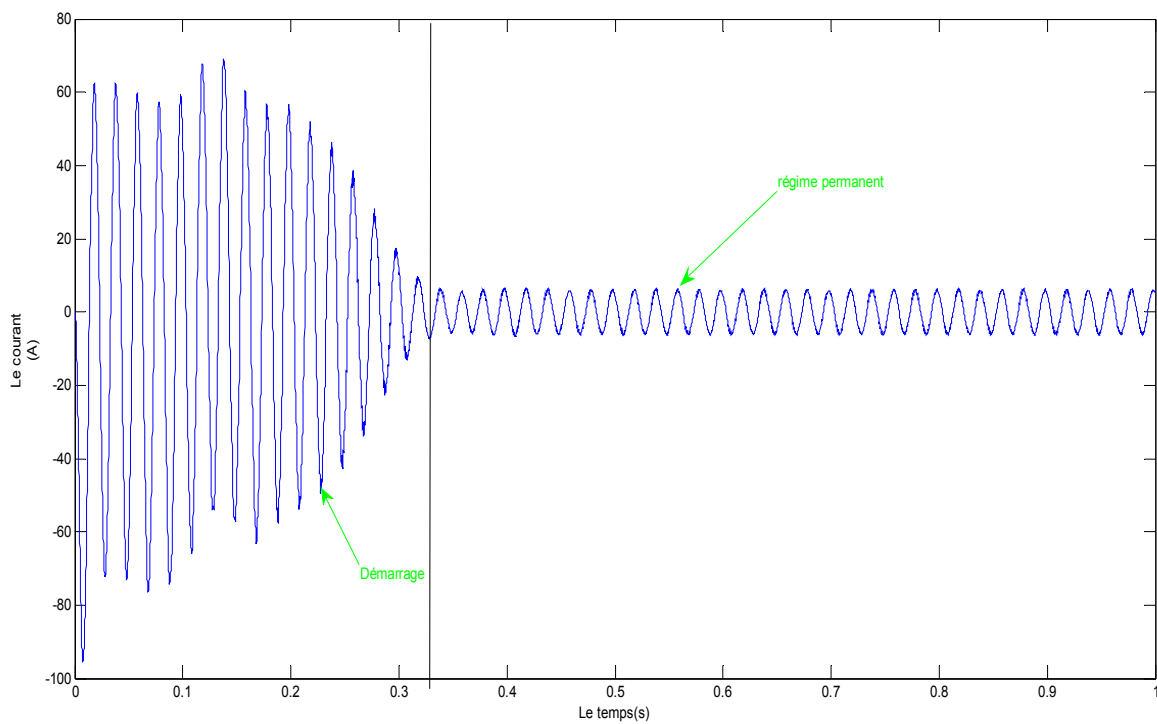


Figure III.11. Le courant statorique de la phase en charge (20N.m).

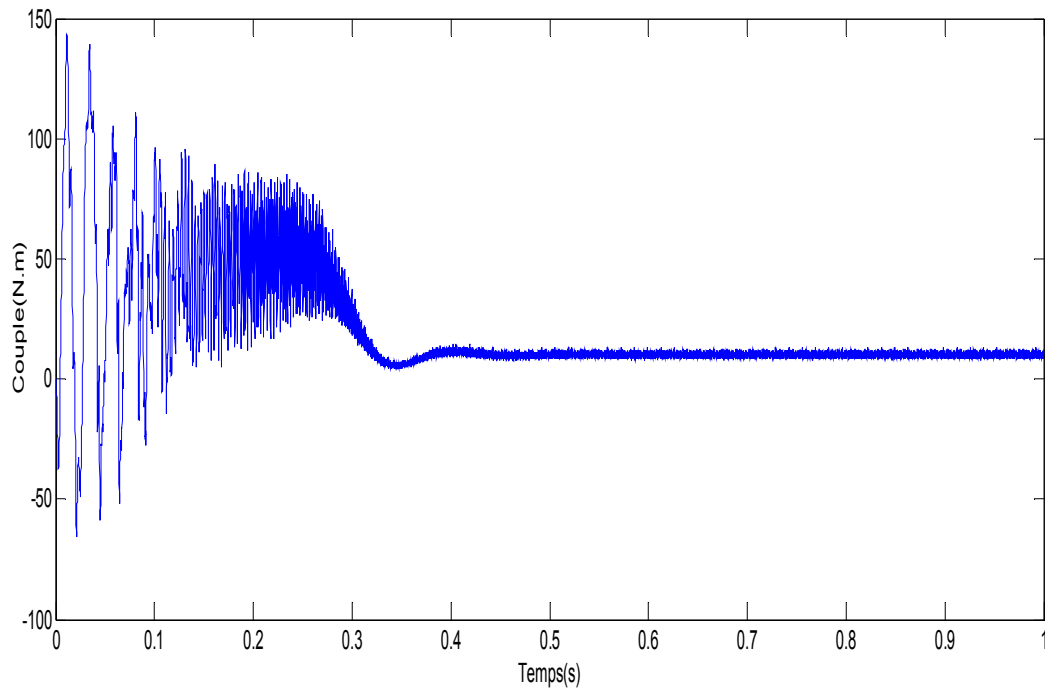


Figure III.12. Le couple électromagnétique en charge. (10N.m).

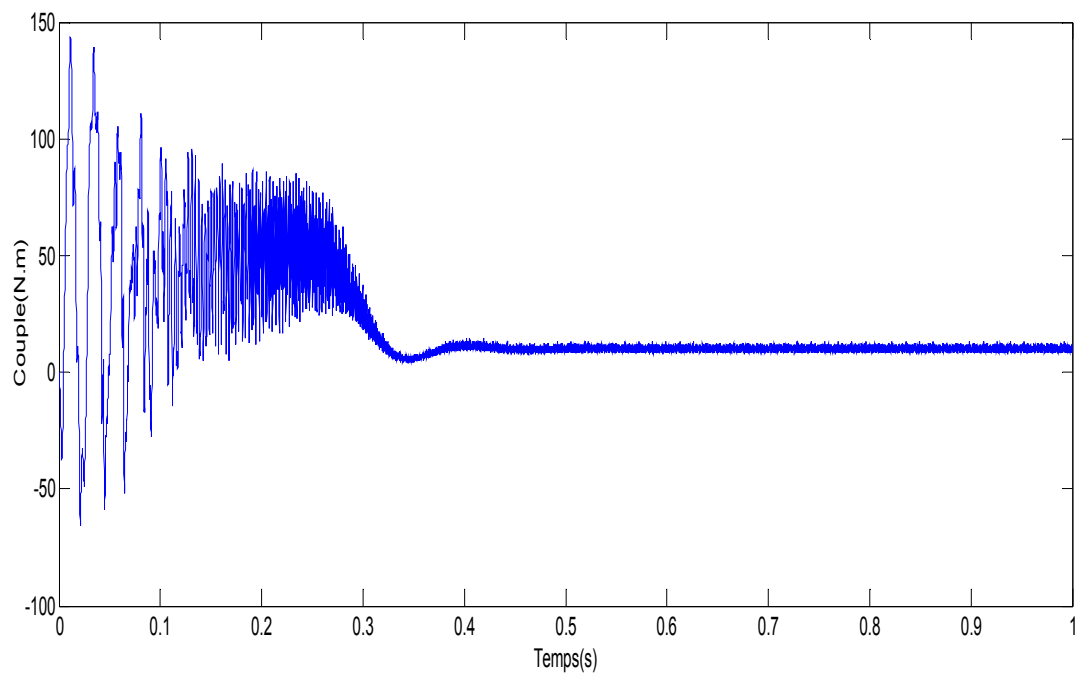


Figure III.13. Le couple électromagnétique en charge. (20N.m).

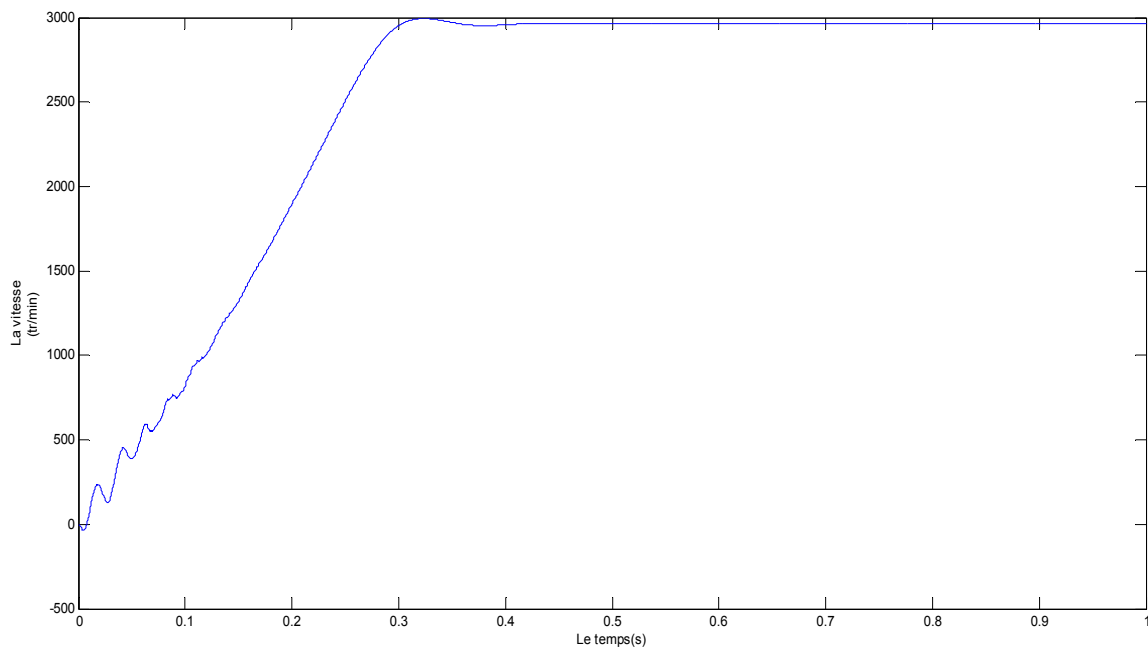


Figure III.14. La vitesse de rotation en charge.

III.2.3. Analyse spectrale du courant statorique

Très exploité dans le domaine du traitement de signal, l'analyse spectrale des signaux permettra de donner des interprétations sur quelques informations portées dans un signal et qui ne peuvent apparaître que dans le régime temporel. Elle a été adoptée dans l'analyse des signaux provenant d'une machine électrique dans le but de prédire la présence des défauts dans la machine. Le courant statorique a été largement adopté comme signal contenant plusieurs informations interprétant l'état de la machine. De plus, celui-ci peut être facilement exploité comparé à d'autres grandeurs électriques ou magnétiques. En effet, le courant statorique est facilement mesurable comparé à d'autres grandeurs liées au fonctionnement de la machine [SM 10].

En effet, pendant le fonctionnement de la machine asynchrone à cage, des phénomènes divers entrent en jeu affectent particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral. Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (FFT) dans cette étude nous permet d'analyser le courant statorique de la machine saine et avec défauts. C'est un outil mathématique très utilisée, et il permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence, ce qui se prête bien à notre application dans la mesure où de nombreux phénomènes associés aux défauts, se traduisent par l'apparition de nouvelles composantes fréquentielles liées directement au glissement où à la modification des amplitudes des harmoniques est déjà présente dans le spectre. Dans notre travail, les spectres de courant et de

l'induction magnétique sont visualisés dans une échelle logarithmique normalisée par rapport au maximum. Dans notre étude, la visualisation de tous les spectres sera réalisé dans l'intervalle 0 Hz et 1000 Hz afin de cerner tous les types d'harmoniques, en particulier les harmoniques principaux d'encoches rotoriques dont l'expression est établit aux limites inférieures de 1000 Hz.[HN 15].

III.2.3. L'influence de la charge

Tous les harmoniques prévus sont fortement apparus dans le spectre du courant statorique pris du modèle non -linéaire, ces harmoniques sont classés comme suivant:

➤ **Une série d'harmoniques de la saturation (saturation harmonicas):** qui sont localisées aux fréquences; 150 Hz, 450 Hz, et 750 Hz, ces fréquences sont tirées par la formule: $3k f_s$, avec k impair.

➤ **Une série d'harmoniques de la force magnétomotrice (fmm) (fmm harmonics):** ces harmoniques sont les plus éminents dans le spectre du courant statorique de la machine à induction, leur présence est conforme à la définition de la fmm, ce sont un résultat du courant qui traverse le bobinage statorique et donc c'est une conséquence de la nature discrète des enroulements statoriques. Les composantes fréquentielles de la fmm sont donnés par la formule;

$(6k \mp 1) f_s$, avec ($k = \mp 1, \mp 2, \dots$), ces harmoniques se situent aux fréquences: 50 Hz, 250 Hz, 350Hz, et 550 Hz

➤ **Une série des harmoniques d'encoches rotoriques RSHs (Rotor Slot Harmonics):** Leur existence ne dépend pas seulement de la fmm, la perméance du stator et du rotor et la denture de stator et de rotor, mais ils existent aussi dans le spectre du courant de statorique que pour un nombre combiné de pair de pôles et les barres rotoriques. Généralement les fréquences des RSHs sont données par la formule suivante :

$$f_H = |(\lambda \mp (kR + nd)(1-s)/P) f_s|$$

(III.1)

f_s : la fréquence du réseau d'alimentation.

λ : le rang des harmoniques du temps ($\lambda = \mp 1, \mp 3, \mp 5, \dots$).

R: le nombre de barre rotoriques.

s: le glissement.

P: le nombre de pair de pôles.

k et nd : sont des coefficients liés à l'excentricité, $nd= 0$ c'est le cas d'excentricité statique, $nd= 1,2,3 \dots$, c'est le cas d'excentricité dynamique (nd : est le rang des harmoniques d'excentricité).

Tableau III.1. Composantes fréquentielles du spectre du courant statorique de 20 harmoniques des encoches rotoriques et 06 harmoniques de fmm. Machine saine 7.5 kW en charge 20 N.m, $p =1$ et $R=20$.

$ \lambda f_s \mp R f_r $ $(\lambda = \mp 1, \mp 3, \mp 5, \dots)$	En charge (Hz) les Harmoniques des encoches rotoriques	
	Fréquence (Hz)	Amplitude (A)
$ f_s - R f_r $ L-PSH	938	0.41
$ f_s + R f_r $ U-PSH	1038.2	-
$ 3f_s - R f_r $	838	
$ 3f_s + R f_r $	1138	-
$ 5f_s - R f_r $	738	-
$ 5f_s + R f_r $	1238	-
$ 7f_s - R f_r $	638	-
$ 9f_s - R f_r $	538	-
$ 11f_s - R f_r $	438	-
$ 13f_s - R f_r $	340	-
$ 15f_s - R f_r $	238	-
$ 17f_s - R f_r $	138	-
$ 19f_s - R f_r $	38	-
$ 21f_s - R f_r $	88.8	0.026
$ 23f_s - R f_r $	162	-

$ 25f_s - R f_r $	262	-
$ 27f_s - R f_r $	362	-
$ 29f_s - R f_r $	462	-
$ 31f_s - R f_r $	562	-
$ 33f_s - R f_r $	835.4	0.043

$(6k \mp 1) f_s$ ($k = \mp 1, \mp 2, \dots$)	Harmoniques de la fmm	
	Fréquence a charge (Hz)	Amplitude (A)
$(6(1)- 1)f_s$	250	0.157
$(6(1)+1)f_s$	350	0.0113
$(6(2)- 1)f_s$	550	-
$(6(2)+ 1)f_s$	650	-
$(6(3)- 1)f_s$	850	0.0351
$(6(3)+ 1)f_s$	950	0.118

Pour $\lambda=1$ on obtient les harmoniques de premier ordre, appelés: les harmoniques principaux d'encoches rotoriques (Principal Slot Harmonics PSHs) symbolisés dans cette étude comme suit :

- a. **L-PSH:** le premier harmonique principal ou l'harmonique inférieur (Lower Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence **938Hz**.
- b. **U-PSH:** le deuxième harmonique principal ou l'harmonique supérieur (Upper Principal Slot Harmonic), qui est localisé à la fréquence **1038.2Hz**.

Le fait notoire à révéler est que la position des PSHs dans le spectre du courant statorique dépend de la charge de la machine, c'est à dire une relation directe avec la vitesse de rotation du rotor, ce qui explique l'utilisation fréquente de ces deux harmoniques pour estimer la vitesse de rotation des moteurs à induction.

Pour étudier le comportement de la machine à l'état sain et de vérifier ainsi la présence de certains harmoniques qui sont dus non au défaut de la machine mais à la nature de certaines grandeurs liées au fonctionnement naturel de la machine tel-que par exemple, la F.m.m de la machine ou bien à la présence d'un entrefer variable séparant le rotor et le stator et créant ainsi, une perméance variable dans l'entrefer. La présence de ces anomalies dans la machine ne reflète pas la présence d'un défaut mais ils traduisent le comportement réel de la machine sans la présence d'un défaut. Il est nécessaire alors de faire une analyse spectrale de certaines grandeurs électriques de la machine électrique et de mener une comparaison entre le spectre de ces grandeurs dans les deux cas de la machine, machine n'ayant pas de défaut et une autre ayant un défaut.

Les figures Fig.III.15-16 représentent le spectre du courant statorique pour une machine électrique dans un état sain n'ayant aucun défaut sous une charge mécanique respectivement de, 10N.m et de 20 N.m. Selon le spectre présenté il existe des harmoniques qui sont apparus, aux fréquences respectivement de, $f = 50\text{Hz}$, 250Hz ; 350 Hz, 653, 938 Hz. Ces harmoniques traduisent l'existence des encoches dans l'entrefer et des harmoniques qui sont liés à l'allure de la F.m.m. Ces harmoniques ne peuvent en aucun cas représenter un défaut qui peut apparaître dans le fonctionnement de la machine. Pour pouvoir étudier la machine électrique et de prédire son diagnostic, il est nécessaire alors de modéliser son comportement en provoquant des défauts spécifiques et de représenté sont spectre pour pouvoir déduire la signature du défaut dans chaque spectre en faisant apparaître d'autres harmoniques. Dans ce contexte nous nous engageons dans la partie ci-dessous à présenté les résultats des simulations d'une machine comportons certains défauts, principalement les cassures de barres. Via la FFT, nous allons montrer l'existence de certains harmoniques qui peuvent traduire l'existence de ce type de défaut.

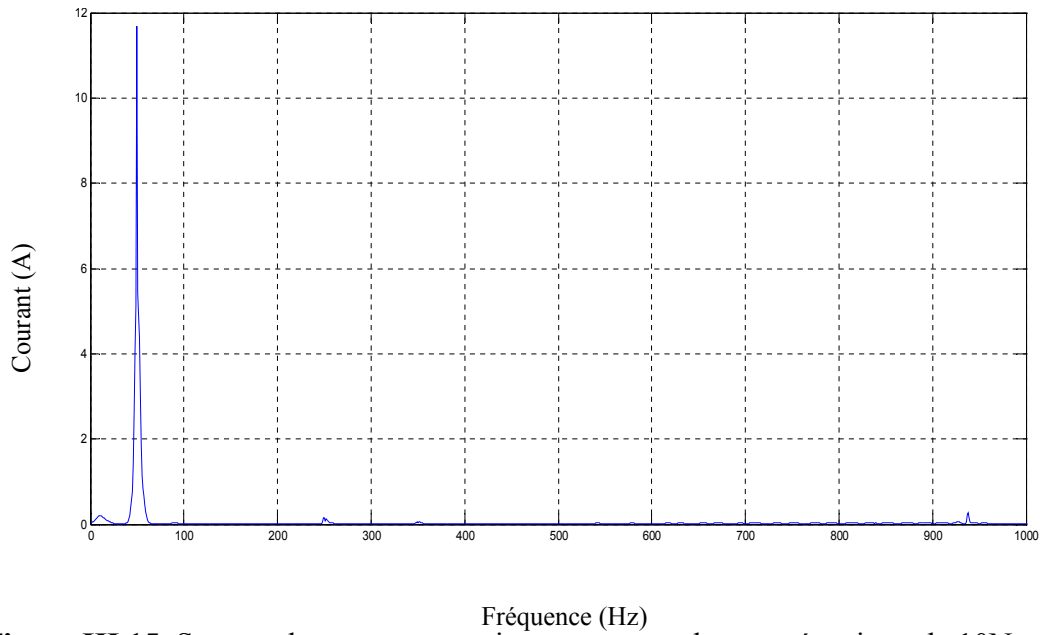


Figure.III.15. Spectre du courant statorique pour une charge mécanique de 10N.m.

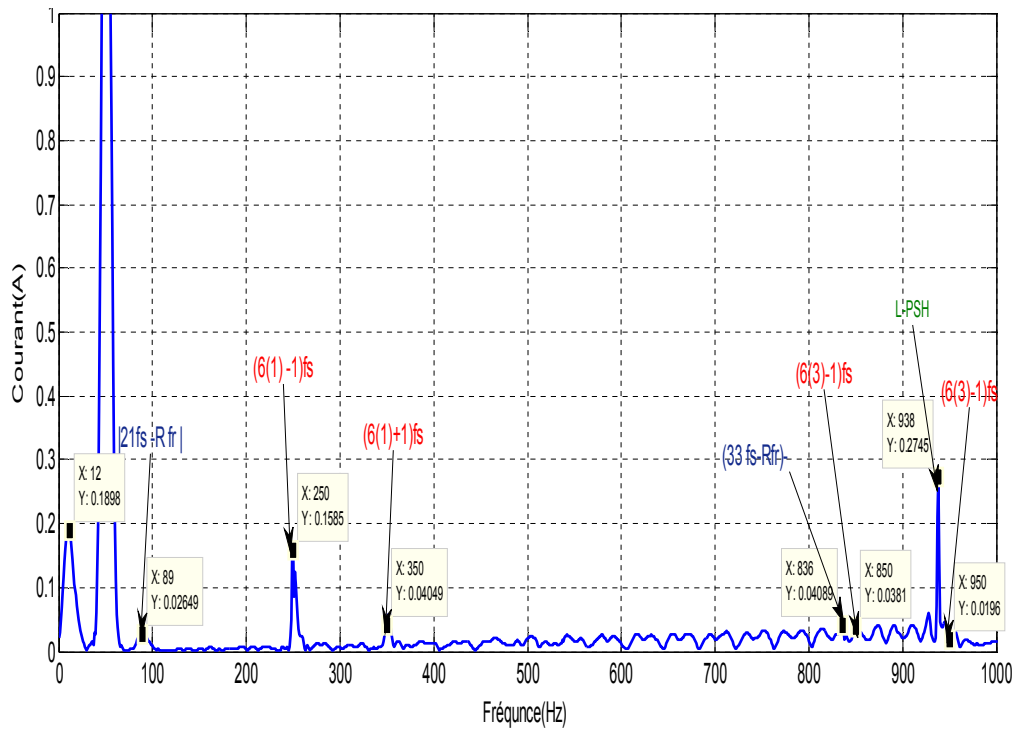


Figure.III.16. Spectre du courant statorique pour une charge mécanique de 20N.m.

III.3 Simulation de la machine asynchrone triphasée à cage (machine à L'état défaut).

III.3.1. Que se passe-t-il dans la machine asynchrone quand une barre rotorique est cassée ?

Couramment, le défaut de cassure de barres rotoriques est très connu par ces composantes fréquentielles $(1 \mp 2s)fs$ autour de la composante fondamentale dans le spectre du courant statorique. Des travaux publiés ont montré qu'en présence d'une barre rompue dans la cage rotorique, un courant de fréquence $(1-2s)fs$ sera induit dans les circuits statoriques, accompagné par une composante oscillatoire de fréquence $(2s fs)$ dans le couple électromagnétique et la vitesse de rotation ce qui donne naissance à de nouvelles composantes de courant aux fréquences $(1 \mp 2s)fs$ circulant dans les enroulements statoriques. Et, par un processus similaire, on obtient une série d'harmoniques de fréquences données par:

$$fb = (1 \mp 2ks) fs \quad (III.2)$$

Avec : $k=1,2,3,\dots$

L'origine des raies dues au défaut rotorique de barre cassée dans le spectre du courant statorique de la machine peut être justifiée comme suit: en conditions normales fonctionnement, le système triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer qui peut être direct. Ce champ tournant, direct, dans l'entrefer induit un courant dans les barres rotoriques d'une fréquence proportionnelle au glissement du rotor (s) [HN 15]. Les barres rotorique génèrent alors un champ tournant résultant direct. Pour une machine saine, il n'y aura pas de champ tournant résultant inverse. La figure III.17 illustre le phénomène de cassure de barres rotorique [HN 15].

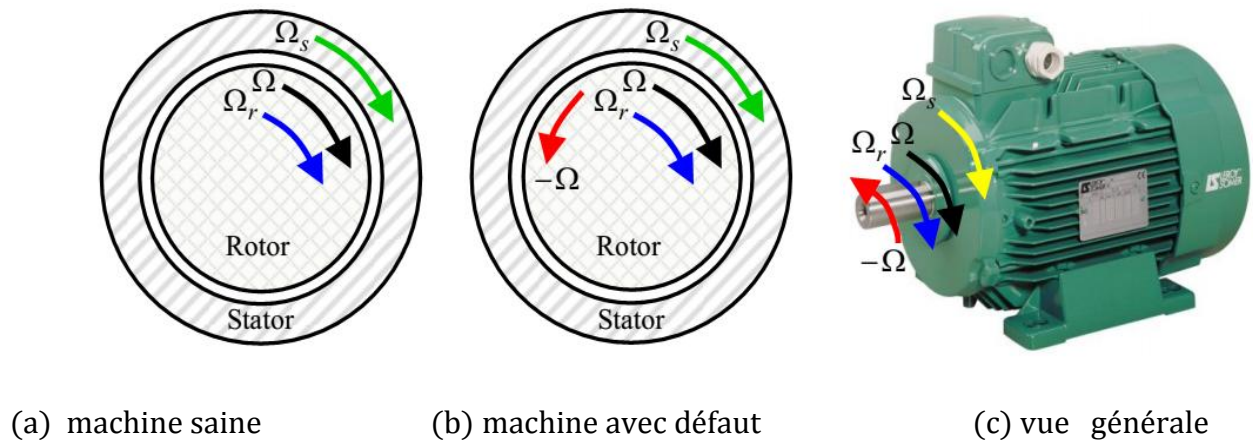


Figure III.17. Schéma de fonctionnement pour une machine saine et avec défaut.

Le fonctionnement de la machine saine est donc décrit par les relations suivantes (voir figure III.17.a):

- Vitesse synchrone : $\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}$
- Vitesse rotorique : $\Omega_r = \Omega_s (1-s)$
- Vitesse de glissement : $\Omega = \Omega_s - \Omega_r = s \cdot \Omega_s$, $s = \Omega_s - \Omega_r / \Omega_s$.

Si la machine présente un défaut de cassure de barres rotoriques (voir figure III.18.b), une dissymétrie au rotor apparaît. Dans ce cas, il se crée en plus du champ rotorique direct, un champ inverse qui tourne à la vitesse $-s\Omega_s$, créée par le déséquilibre des courants dans les barres. Cela est dû au fait que les courants rotoriques peuvent être associés à un système direct de valeur efficace I_d et à un système inverse de valeur efficace I_i . L'interaction de ce champ avec celui issu du bobinage statorique crée des ondulations de couple et aussi induit au stator des forces électromotrices de fréquences f_s et $(1 \mp 2s) f_s$ l'apparition de courants statoriques comportant ces composantes.

III.3.1. Simulation de MAS à l'état de défaut ayant de cassures de barres rotoriques

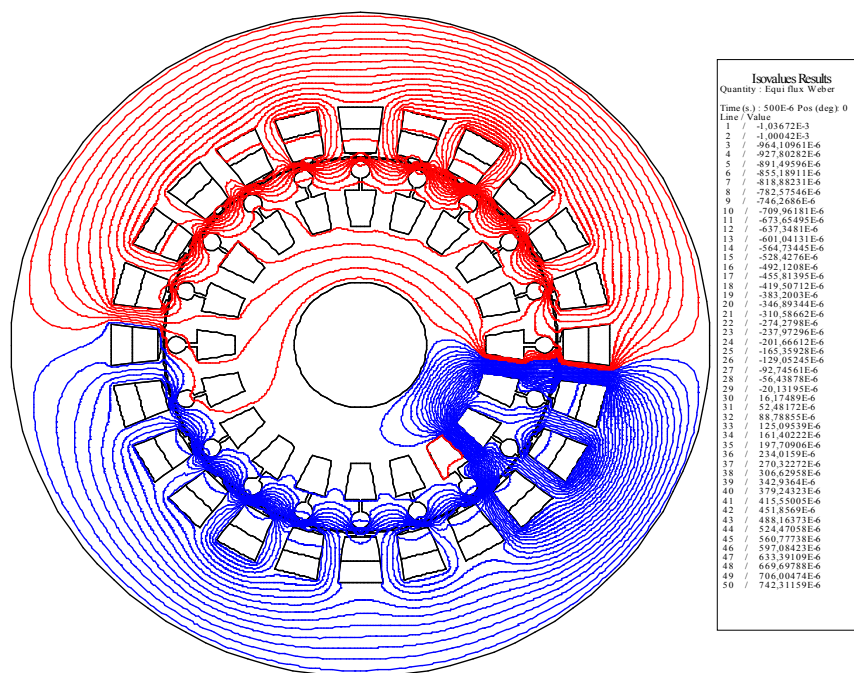
(à vide) :

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats des simulations d'une machine asynchrone ayant un défaut et qui consiste dans la cassure d'une des barres rotoriques. Dans les simulations présentées, le défaut est simulé par augmentation de la résistance de la barre rotorique concerné par le défaut. Nous allons présentés dans la partie ci-dessous les résultats des simulations où la machine est supposé dans un premier temps à vide ayant respectivement, deux et trois barres cassés. Le courant statorique sera adopté comme grandeur électrique pour représenté son spectre dans le but de déduire les harmoniques qui peuvent apparaitre avec la présence de ce type de défaut.

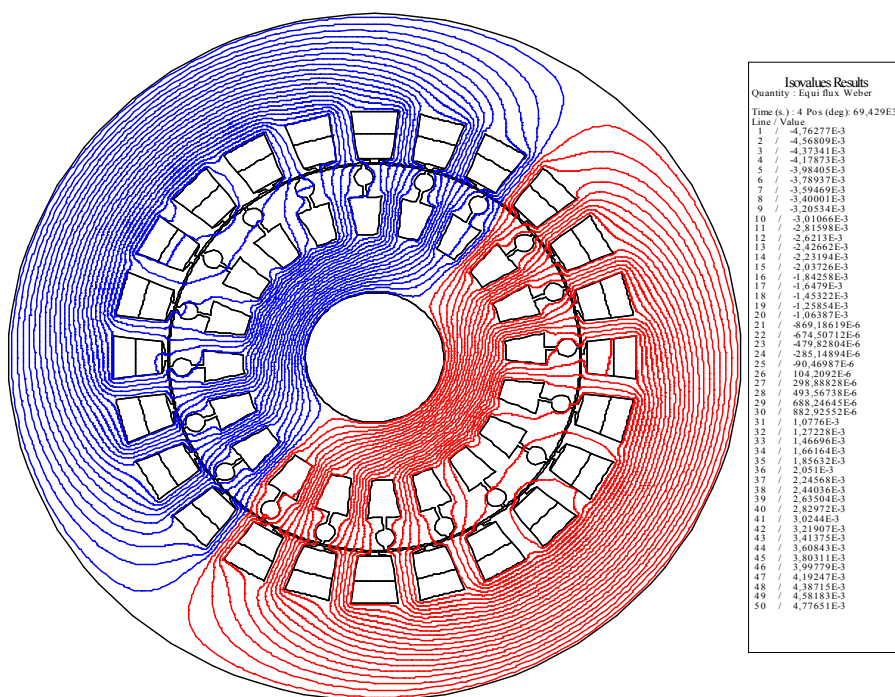
III.3.1.1. Modélisation de la machine asynchrone ayant trois barres cassées :

Nous présentons dans cette partie les résultats des simulations d'une machine asynchrone entrainé à vide et ayant un défaut rotorique et qui consiste dans la cassure de trois barres rotoriques. Les barres ayants les défauts sont choisies adjacentes l'une à l'autre. La Fig.III.18 représente la répartition des lignes du flux à vide à l'intérieur de la machine au démarrage et au régime permanent. Selon les résultats présentés dans ces figures on peut dire que :

- ✓ Au démarrage, la répartition des lignes de champ ne semble pas être parfaitement symétrique selon chaque pôle de la machine, ceci peut traduire soit la présence d'un défaut lié à la cassure d'une des barres rotoriques, comme il peut interpréter le régime transitoire de la machine. Ceci veut dire que le défaut peut influencer sur la répartition du champ magnétique à l'intérieur de la machine durant le démarrage de la machine.
- ✓ Au régime permanent, la répartition du champ magnétique semble être parfaitement symétrique avec l'apparition d'un pair de pôles et les lignes de champ magnétique pénètre totalement les tôles magnétiques constituant la culasse rotorique.
- ✓ Pour une machine avec défaut on peut remarquer que plus le nombre de barres rompues augmente; plus le déséquilibre de répartition des lignes de flux s'accroissent, ce qui entraîne le décalage des axes magnétiques de la machine asynchrone.
- ✓ Il est difficile d'adopter la répartition des lignes de champ magnétique à l'intérieur de la machine comme paramètre à adopter pour diagnostiquer la machine électrique. Ceci est dû à la complexité d'acquies cette répartition. Il sera alors plus intéressant d'adopter des grandeurs électrique ou magnétique accessible à l'utilisateur tel-que, le couple de la machine ou le courant statorique.



(a)



(b)

Figure III.18. La distribution des lignes du flux en vide (a) au démarrage ; (b) en régime permanent

La Fig.III.19 représente la répartition de l'induction magnétique à l'intérieur de la machine électrique entrainé à vide. Selon les résultats présentés on peut dire que le champ magnétique est très intense aux voisinages des barres rotoriques cassés, ceci peut être expliqué par les faibles courants rotoriques qui peuvent apparaitre dans les barres concernées au démarrage comparés aux courants dans les autres barres. Le courant diminue dans les barres rotoriques concernées vue l'augmentation de la résistance des barres rotoriques. Ceci diminue l'effet d'écrantage durant le régime transitoire caractérisant le démarrage de la machine électrique.

La Fig.III.23. Représente la variation temporelle du courant rotorique durant le démarrage et au régime permanent de la machine électrique. Selon les résultats présentés et comparé aux valeurs des courants rotorique pour une machine saine (Fig.III.4), on peut dire que le courant rotorique est largement affaibli par la présence du défaut.

Pour la vitesse représentée sur la Fig.III.22, on peut dire que la vitesse est autour de la vitesse de synchronisme où elle atteint une vitesse de valeur autour de 3000tr/min. l'ensemble des grandeurs présentés dans le régime temporelle ne peuvent dans aucun cas prédire la présence d'un défaut au sain de la machine, il est n'nécessaire alors d'envisagé la TF pour une meilleur analyse des signaux.

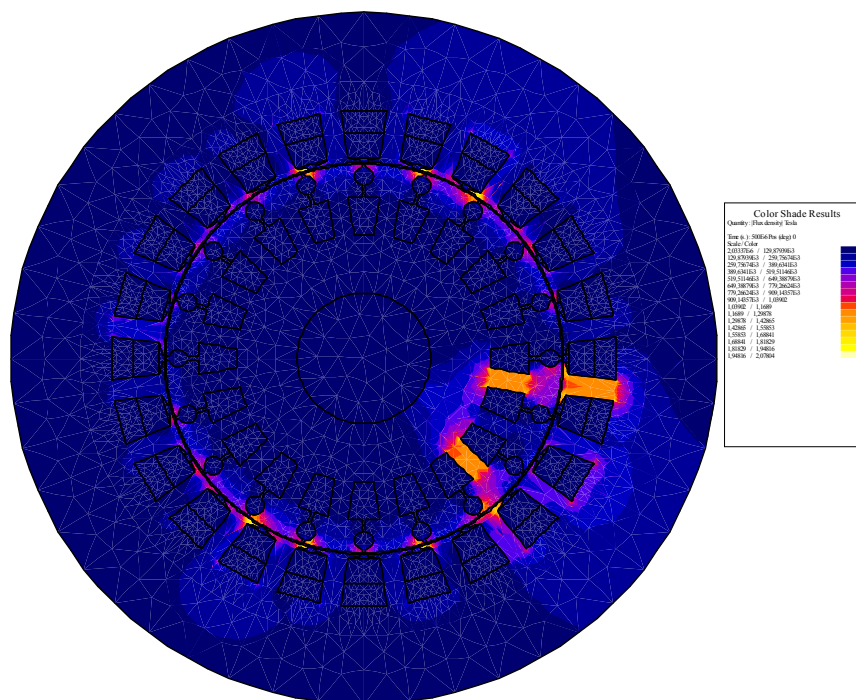


Figure III.19. Répartition de l'induction magnétique B à l'intérieur de la machine électrique entrainé à vide (régime transitoire)

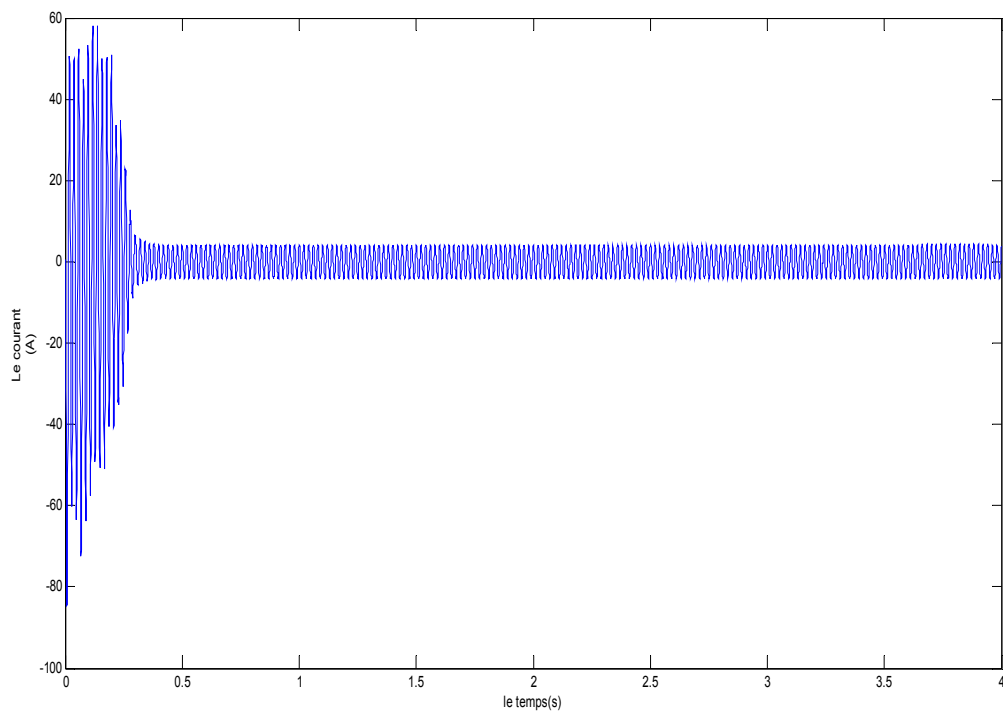


Figure III.20. Courant statorique de la phase à vide avec défaut 3 barre cassé

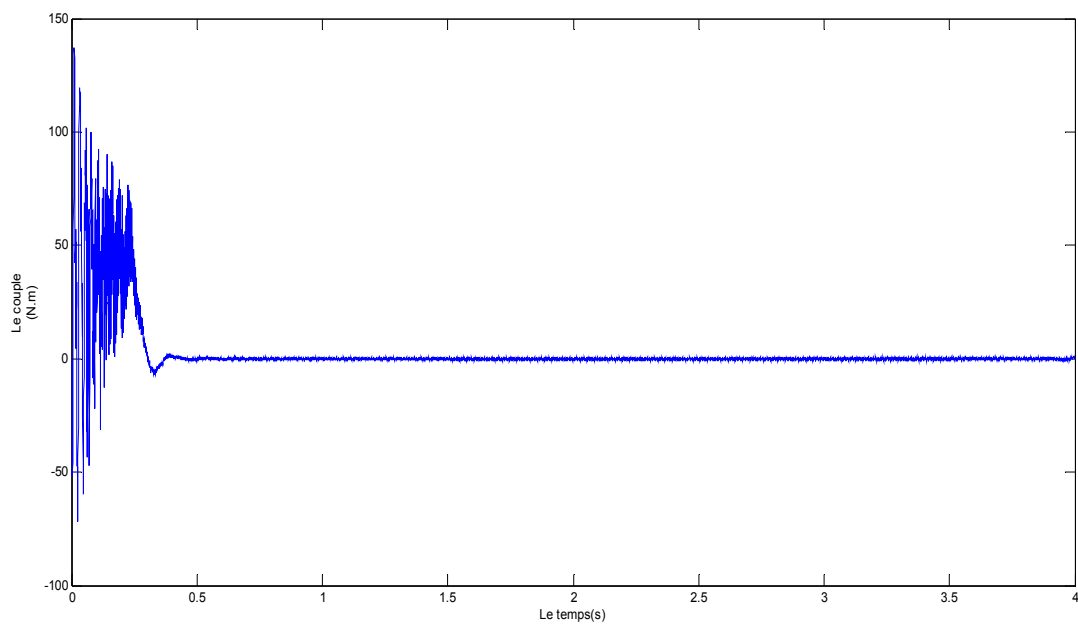


Figure III.21: Couple électromagnétique à vide (3barre cassée)

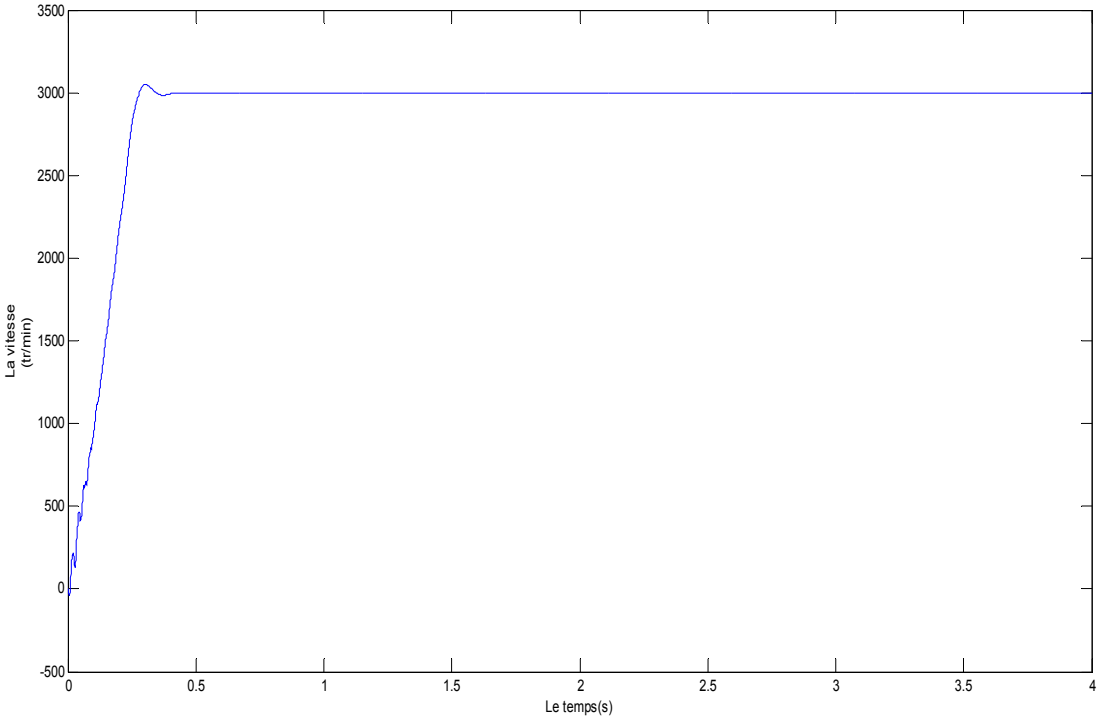


Figure III.22. La vitesse de rotation à vide.

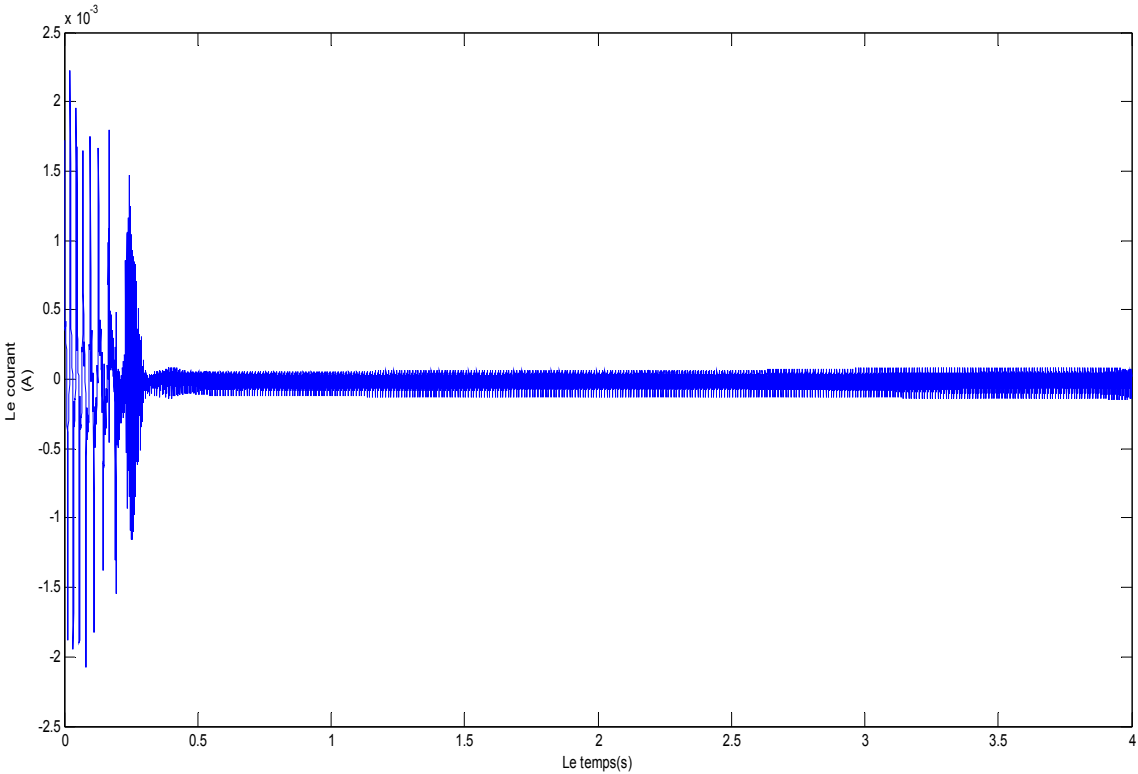


Figure III.23. Le courant dans les 3 barres cassées rotorique 1 à vide.

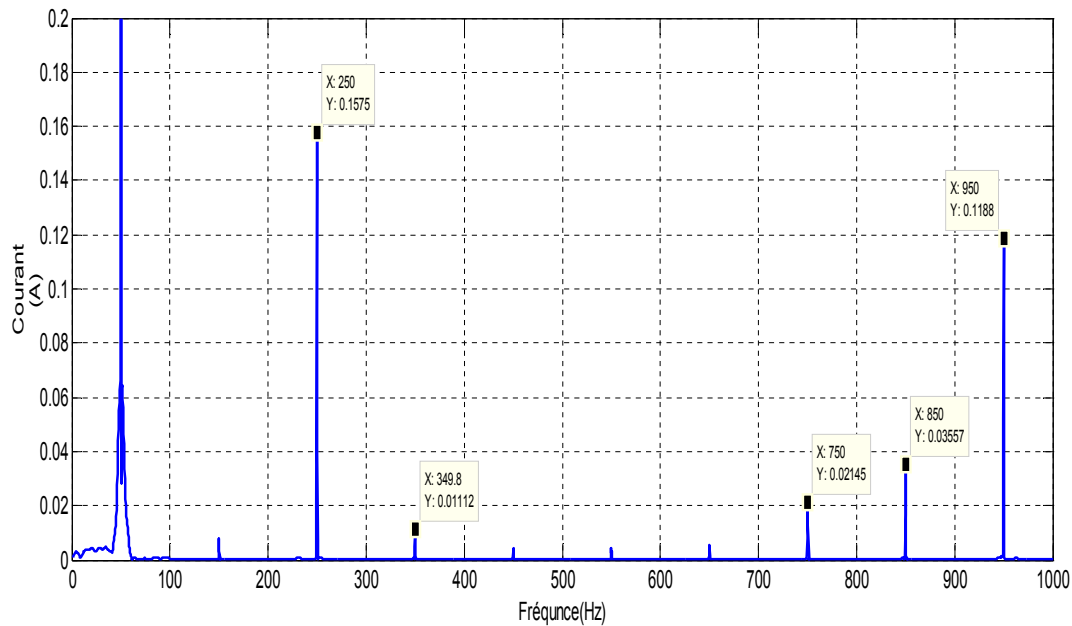


Figure.III.24. Spectre du courant statorique pour une machine asynchrone entraînée à vide et ayant trois barres cassées.

- ✓ Le spectre du courant statorique présenté dans la Fig.III.24 indique la présence de certains harmoniques qui sont apparus non par la présence du défaut. On peut dire alors qu'il est difficile de prévoir la présence d'un défaut au sein d'une machine entraînée à vide. Il est préférable alors de procéder au diagnostic de la machine sous une charge mécanique.

III.3.1.2 Modélisation de la machine asynchrone en charge et ayant un défaut rotorique avec deux barres cassées :

Dans la partie ci-dessous, nous présentons les résultats des simulations d'une machine asynchrone entraînée sous une charge mécanique et ayant un défaut rotorique qui consiste à la présence de défaut rotorique avec la cassure de deux barres rotoriques. La machine est chargée avec une charge mécanique respectivement de 10N/m et 15N/m. Le but est d'inspecter l'hypothèse de pouvoir diagnostiquer la machine électrique entraînée sous une charge mécanique. Les résultats des simulations du comportement électromagnétique de la machine seront largement présentés.

Selon les résultats présentés et comparés aux résultats des simulations présentés précédemment on peut dire :

- Le régime transitoire de la machine électrique et selon la répartition du champ magnétique, on peut clairement visualiser la présence du défaut rotorique qui se

traduit par une répartition non-homogène des lignes de champ magnétique. Les résultats présentés sont similaires à ceux présentés par la machine ayant un défaut et entrainé à vide.

- De même pour la répartition du champ d'induction magnétique ou nous remarquons une répartition très intense du champ magnétique aux voisinages des barres rotoriques cassées.
- Les autres allures représentant l'évolution temporelle du courant statoriques, du couple ou de la vitesse de la machine ne peuvent en aucun cas refléter correctement la présence de défaut. Il sera plus correct de procéder à la présentation les spectres des signaux traduisant le fonctionnement de la machine, tel-que par exemple le courant statorique.
- Les résultats représentant les distributions de l'induction montrent aussi l'accentuation du déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Nous remarquons qu'autour du défaut, l'induction est relativement élevée, ainsi que la saturation des dents autour des barres cassées faite à l'absence de la réaction magnétique démagnétisant, due à l'absence du courant induit dans les barres cassées. Ce qui provoque des pertes fer dans le stator et le rotor, localisées autour des barres cassées.
-

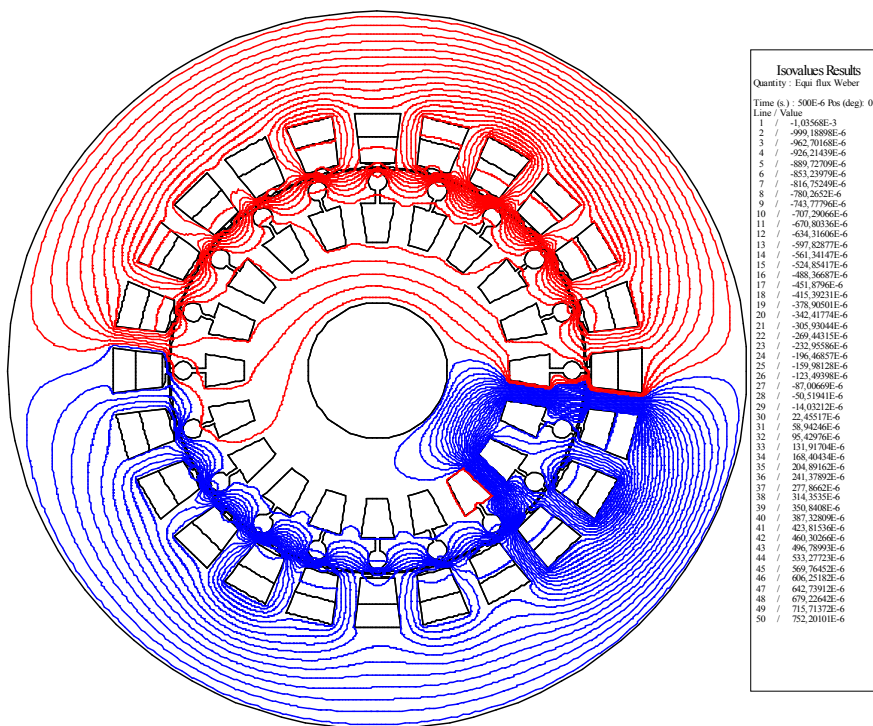


Figure III.25. La distribution des lignes du flux en charge (10N/m) au démarrage (régime transitoire)

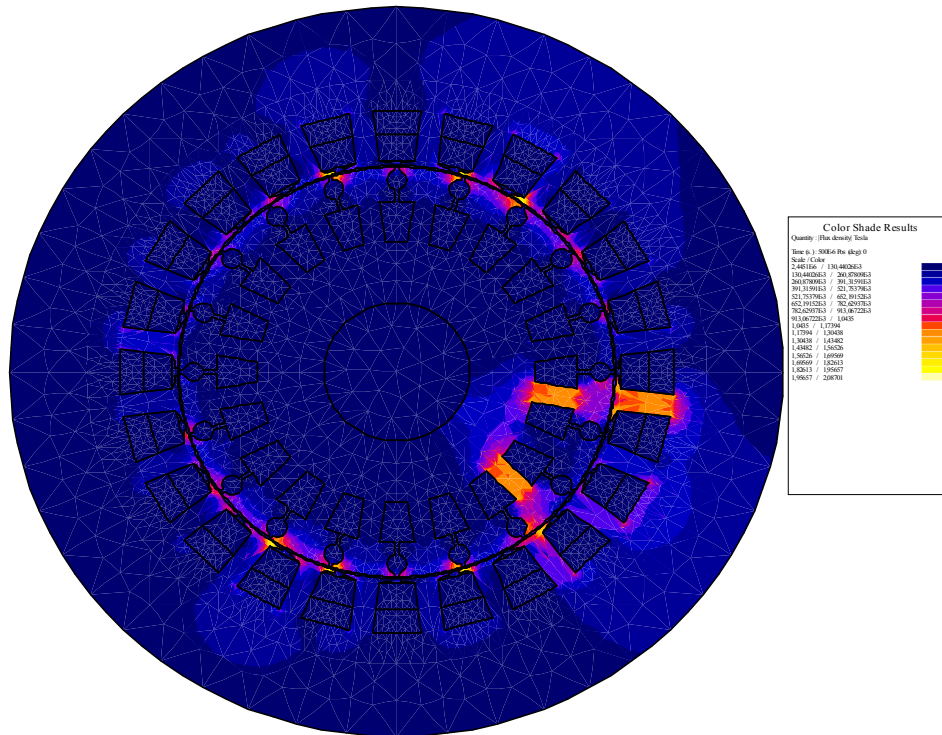


Figure III.26. L'induction magnétique B à l'intérieur de la machine électrique sous une charge mécanique de (10N/m) au (régime transitoire).

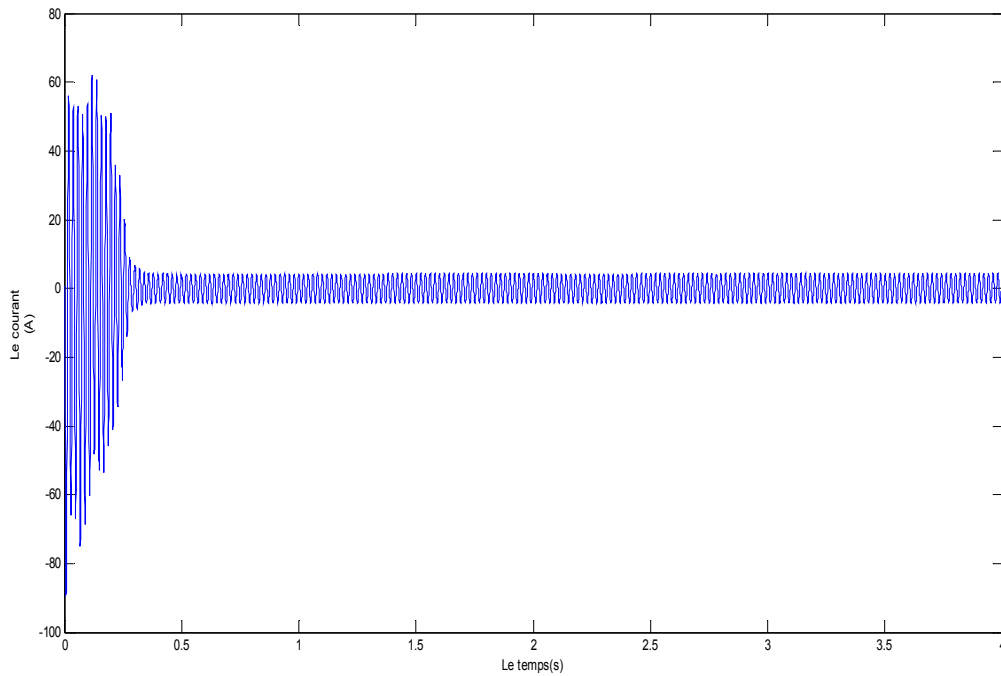


Figure III.27. Courant statorique de la phase d'une machine entraîné sous une charge mécanique de (10N/m)

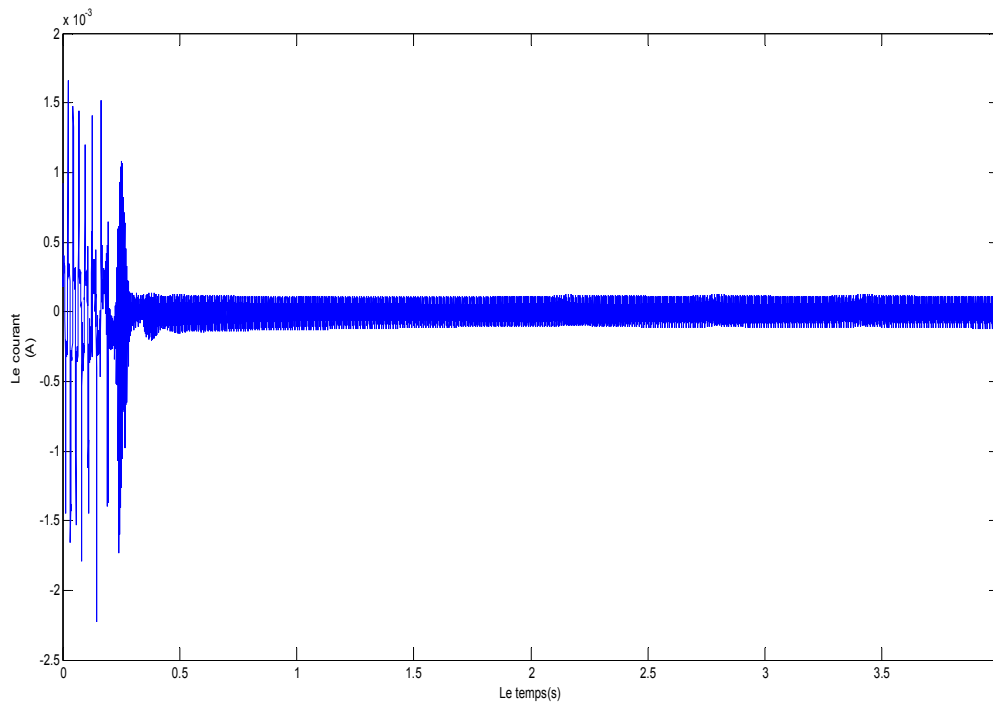


Figure III.28. Le courant dans la barre rotorique 2(cassée) de la machine entraîné sous une charge mécanique de (10N/m).

III.3.1. Simulation de MAS à l'état défaut cassure de barre (en charge 15 N.m) .

Dans cette partie nous présentons les mêmes résultats que précédemment à la différence d'une charge mécanique de 15N/m. Les résultats obtenus confirme les constatations précédentes à la différence d'avoir :

- Des amplitudes des oscillations plus intenses qui peuvent apparaitre dans les grandeurs électriques telles-que, le courant statorique et les grandeurs mécaniques telles-que, le couple de la machine et la vitesse de rotation du rotor de la machine.
- Selon les résultats présentés dans Fig.III.28 on peut dire que la rupture des barres provoque un déséquilibre du courant entre les barres du rotor et une augmentation de l'amplitude du courant dans les barres adjacentes aux barres cassées, Cette amplitude augmente avec le nombre de barres cassées, ce qui peut être constaté visiblement dans la répartition de la densité du courant dans les barres rotoriques. Notons que l'amplitude des oscillations est proportionnelle aussi au nombre de barres rotoriques cassées.
- La présence de défaut dans la machine électrique et qui sont caractérisé par les cassures de barres, influe considérablement sur la dynamique de la machine où nous avons remarqué l'apparition des oscillations dans la vitesse comparée à celle d'une machine n'ayant pas de défaut dans les barres rotoriques.

Le fig.III.30 représente le spectre du courant statorique d'une machine asynchrone entraînée sous une charge mécanique de 15N/m. dans cette machine nous avons provoqué deux cassures de barre on augmentant respectivement leurs résistances. Selon le spectre présenté on remarque la présence des harmoniques ayant les fréquences :

$$fb = (1 \mp 2ks) fs$$

$$k=1,2,3,\dots$$

Les fréquences et les amplitudes des harmoniques qui peuvent apparaître dans le spectre du courant statorique et traduisant la signature de la présence d'un défaut rotorique qui est due à la cassure d'une des barres rotoriques sont résumé dans le tableau Tab.III.2. Les résultats confirme la présence de ces harmoniques en particulier, ceux voisins à la fréquence de la fondamentale. On peut dire alors que le diagnostic de la machine asynchrone peut être établi par une analyse spectrale de certaines grandeurs électriques liées à la machine électrique. Ceci peut être correctement établi si la machine est chargée mécaniquement.

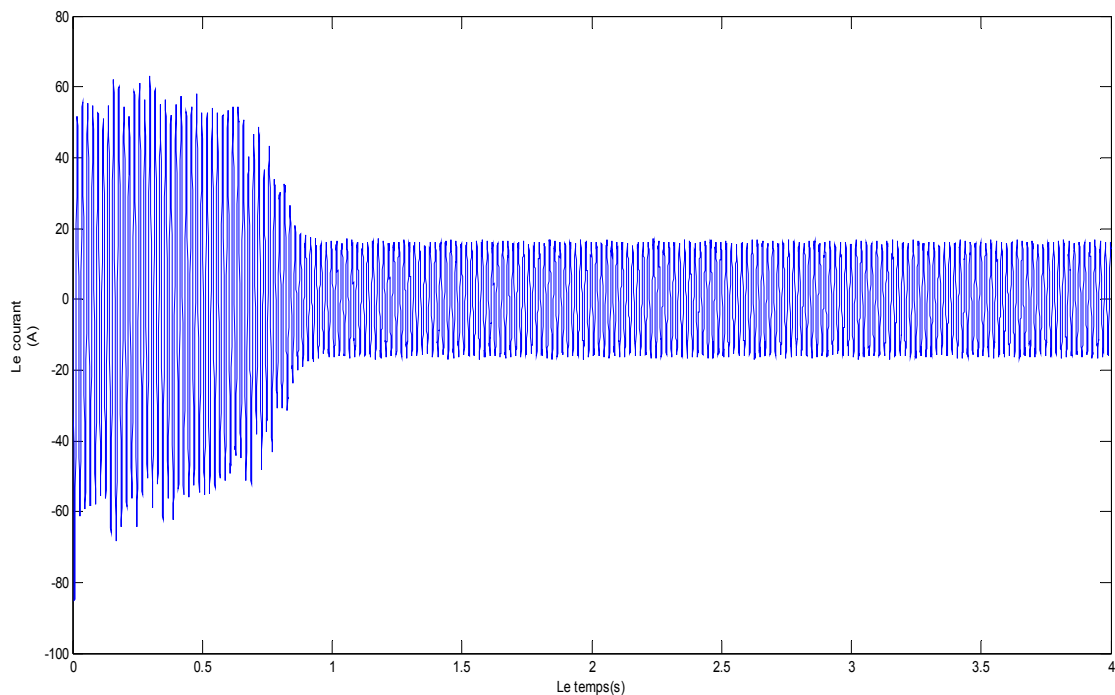


Figure III.29. Le courant statorique de la phase à charge (15N/m) avec défaut de 2 barre rotoriques cassés.

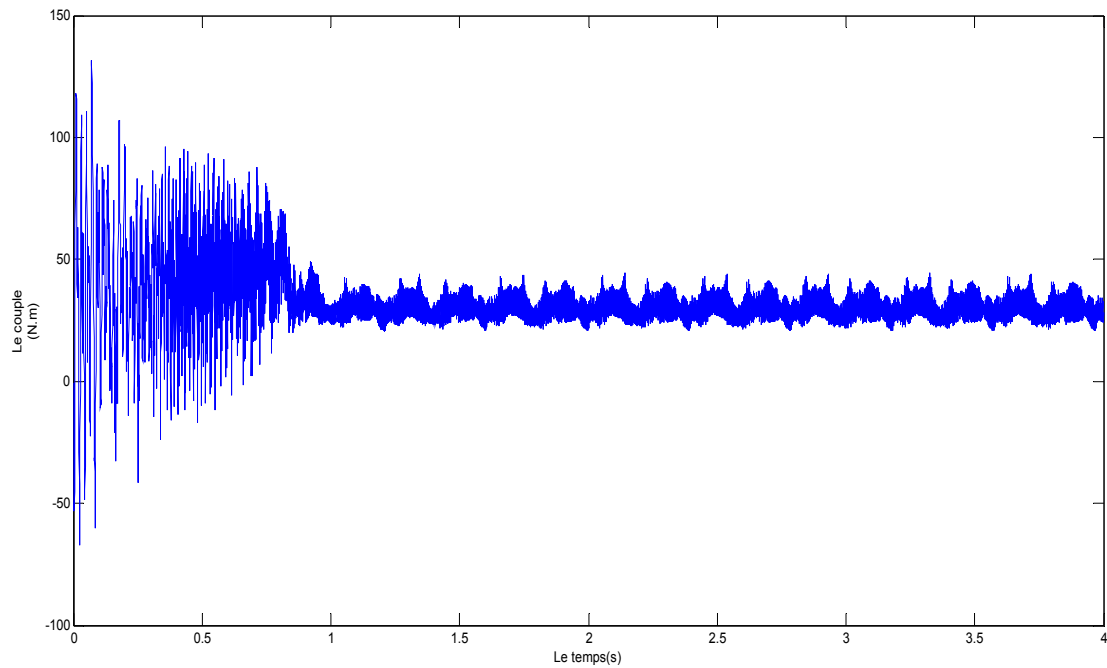


Figure III.30. Le couple électromagnétique à charge (2barre cassée)

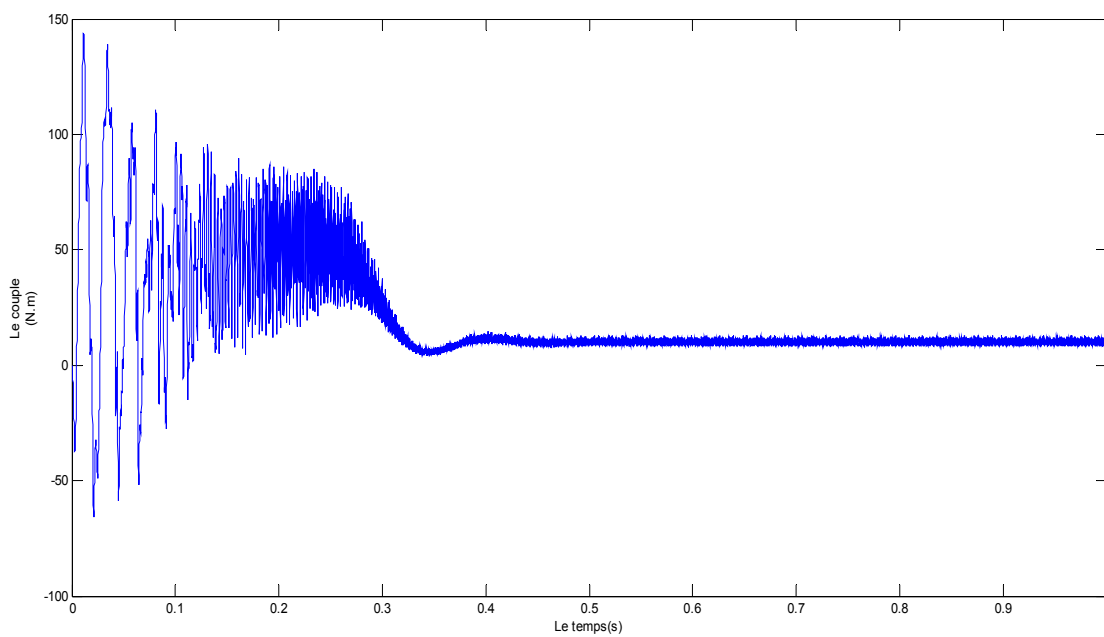


Figure III.31: Le couple électromagnétique à charge (machine saine).

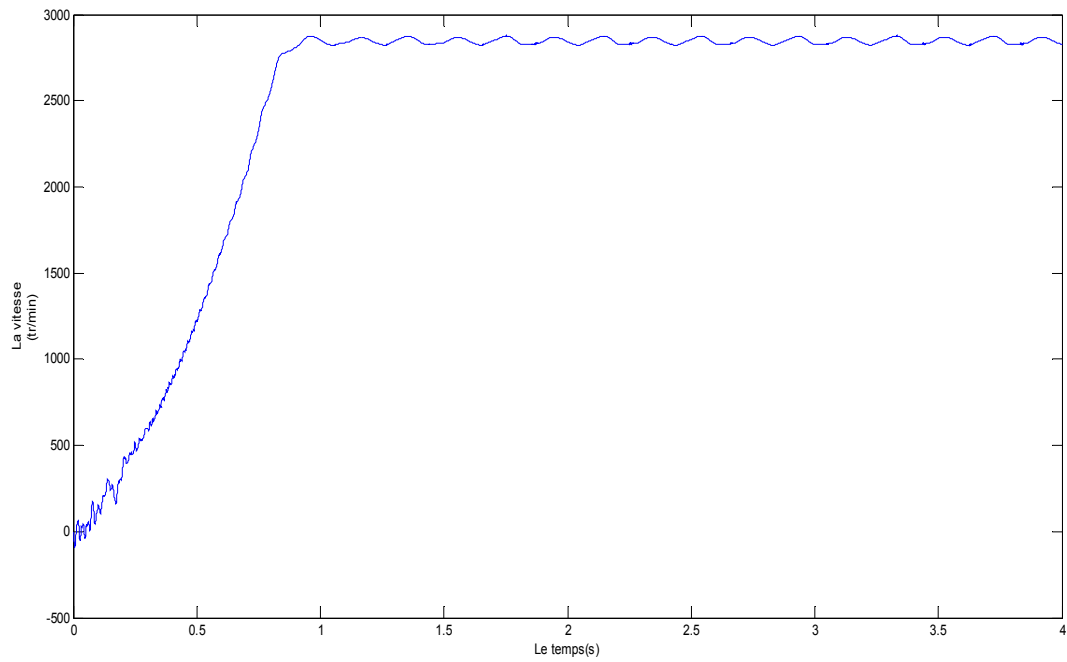


Figure III.32. La vitesse de rotation de la machine électrique en charge (15N/m) avec une machine ayant deux barres cassées.

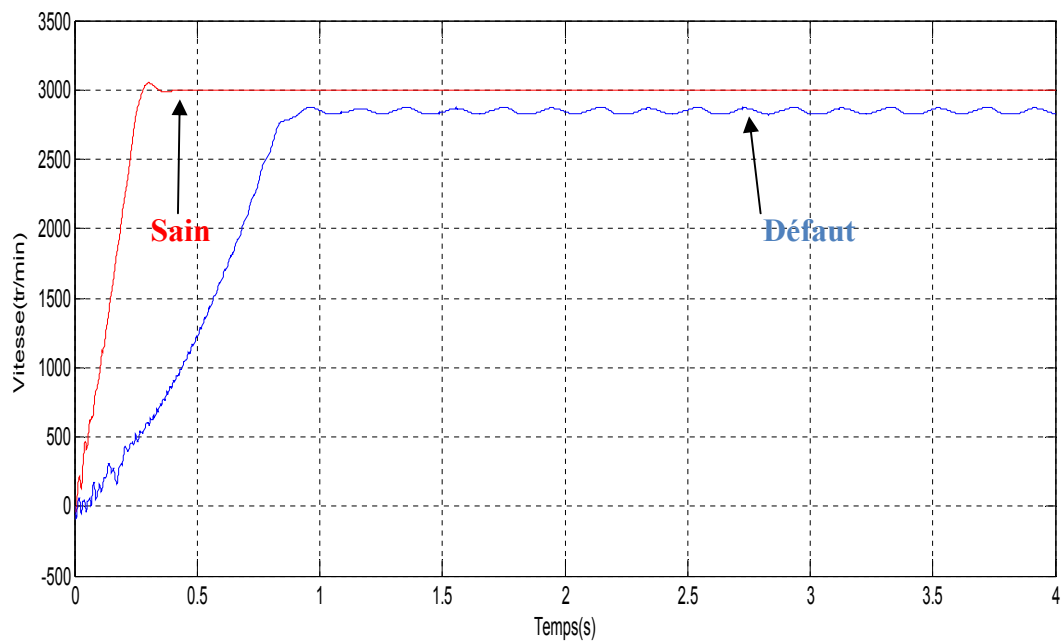


Figure III.33. La vitesse de rotation sans défaut et avec défaut.

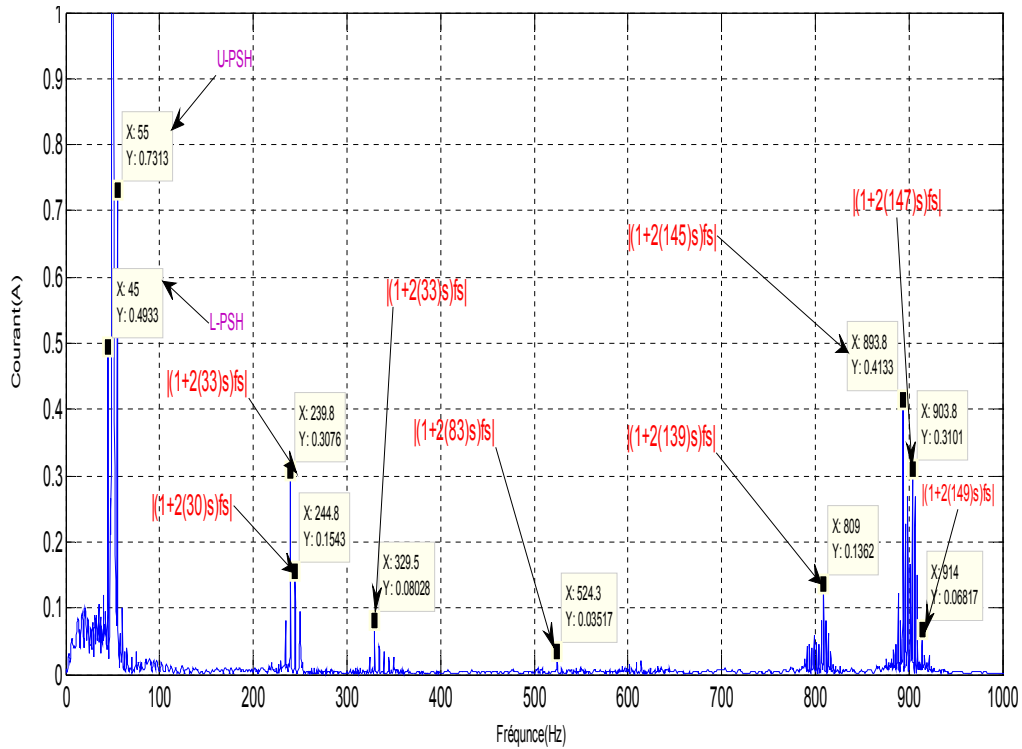


Figure.III.34. Spectre du courant statorique pour une machine asynchrone entraîné à charge 15N.m et ayant deux barres cassés.

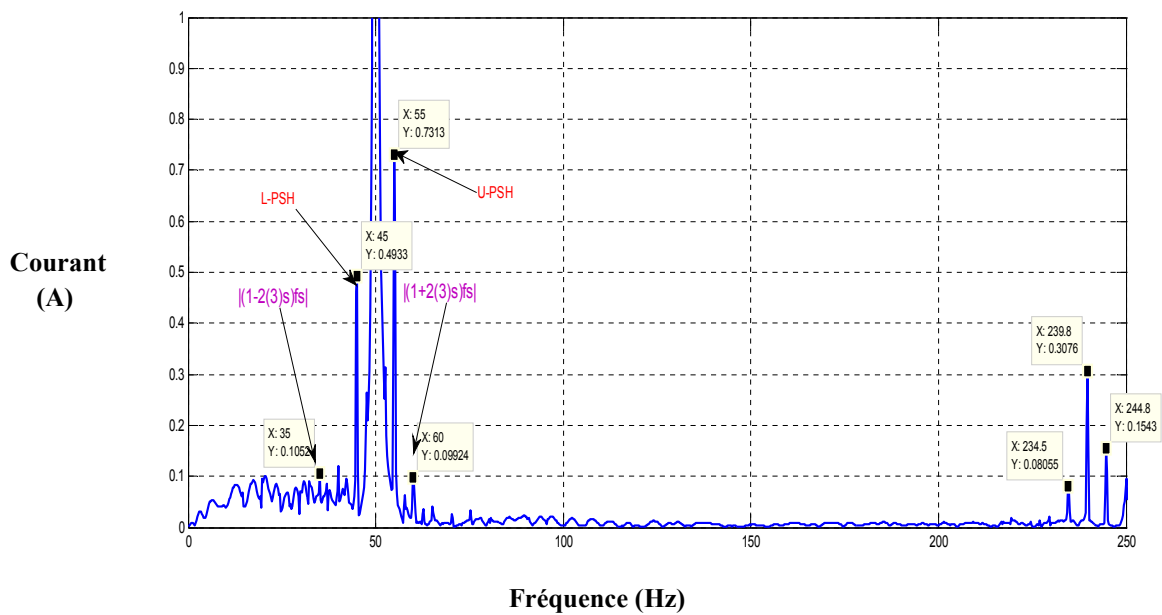


Figure.III.35. Spectre du courant statorique (zoom) pour une machine asynchrone entraîné à charge 15N.m et ayant deux barres cassés.

Tableau III.2. Composantes fréquentielles du spectre du courant statorique représenté dans la (Figure III.25 et figure III.26): machine avec défaut cassure de barre 7.5 kW en charge, $p=1$, $R = 20$, $S=0.058$. ($N=2826$ tr/min pour une défaut 2 barre cassée avec une charge 15 N.m

$fb=(1 \mp 2ks)fs$ K=1,2,3,...	En charge (Hz)	
	Fréquence (Hz)	Amplitude (A)
$ (1-2ks)fs $ L-PSH	44.90	0.493
$ (1+2ks)fs $ U-PSH	55.9	0.733
$ (1-2ks)fs $ $k=2$	38.4	-
$ (1+2ks)fs $ $k=2$	61.6	-
$ (1-2ks)fs $ $k=3$	35.6	0.105
$ (1+2ks)fs $ $k=3$	60.4	0.993
$ (1-2ks)fs $ $k=4$	26.8	-
$ (1+2ks)fs $ $k=4$	73.2	-
$ (1-2ks)fs $ $k=5$	21	-
$ (1+2ks)fs $ $k=5$	79	-
$ (1-2ks)fs $ $k=6$	12.2	0.083
$ (1+2ks)fs $ $k=6$	84.8	-
$ (1+2ks)fs $ $k=30$	244	-
$ (1+2ks)fs $ $k=33$	240	0.307
$ (1+2ks)fs $ $k=48$	328.7	0.080
$ (1+2ks)fs $ $k=83$	524	0.035
$ (1+2ks)fs $ $k=139$	808.2	0.136
$ (1+2ks)fs $ $k=145$	893.8	0.413
$ (1+2ks)fs $ $k=147$	903	0.310
$ (1+2ks)fs $ $k=149$	914.2	0.068

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a construit le diagnostic de la machine asynchrone à cage basé sur la méthode des éléments finis où nous pouvons inclure les défauts au rotor.

Une étude comparative entre comportement, d'une machine saine et d'une machine portant un défaut permettra de déduire la présence de défaut. Dans cette comparaison, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques sont adoptées. Le recours vers l'utilisation des méthodes du traitement de signal permettra de donner une meilleure vision sur la présence du défaut et sur sa nature. Parmi ces méthodes, la méthode de transformée de Fourier (FFT) peut être exploitée.

Enfin, l'analyse spectrale de courant statorique représenté dans (FFT) et présentée par la méthode des éléments finis montre que c'est une méthode efficace et peu coûteuse pour étudier l'influence des défauts rotorique sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor. par contre, le seul inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très long(6 heures..1jours...3jours) et qui demande un ordinateur très puissant, élément non disponible en notre possession.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans cette mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. 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 affecter 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, la technique d'analyse des signaux spectrale la manifestation de tous les harmoniques qui caractérisent la nature du moteur tel que les harmoniques de saturation et les harmoniques de l'effet d'encoche. Avec l'amélioration constante liée à l'avancement de la technologie, et au regard de sa fidélité au comportement électromagnétique de la machine, la méthode des éléments finis bien qu'exigeante en matière de temps et de moyen, semble être unanimement adoptée notamment pour utiliser la technique d'analyse spectrale en vue de détection des différents défauts dans la machine asynchrone triphasée. C'est l'une des raisons qui a motivé l'étude que nous avons menée avec cette méthode.

La modélisation de la machine asynchrone saine par la méthode des éléments finis réalisée dans ce travail est dédiée à la simulation de la machine asynchrone saine et avec défaut. Malgré que cette modélisation soit très onéreuse en temps de calcul (6 heures....12 heures...1 jour...3 jours..), elle montre une grande fidélité au comportement de la machine. Cette caractéristique est bien argumentée par les différents résultats obtenus au sein du chapitre III, où un regard particulier a été porté au cours de l'étude sur le contenu spectrale du courant statorique à l'état sain et sous différents effets: effet de la saturation, la force magnétomotrice (fmm) et l'effet harmoniques des encoches rotoriques.

Les résultats trouvés sont très satisfaisants et sont conformes avec ceux de la littérature. Nous avons pu observer les ondulations sur les grandeurs (courant, couple et vitesse) ainsi que leur accroissement lors de l'augmentation des la charge mécanique et du nombre de barres cassée par l'augmentation de la résistance rotorique.

L'analyse spectrale du courant statorique a été focalisée sur la gamme des très basses fréquences, les composantes traditionnelles ($1 \pm 2s$) F_s autour du fondamental ont été détecté pour un nombre différents de barres cassées, et pour différentes charges.

Nous avons utilisé le programme de la transformée de Fourier rapide **FFT** du "Editeur Matlab", pour exploiter le contenu spectral des courants statoriques et de leurs transformés et par conséquent de déterminer les composantes ($1 \pm 2kg$) fs caractérisant le défaut de barres rotoriques. Ensuite, nous avons montré l'influence du nombre de barres cassées sur ces composantes. Nous avons trouvé que l'amplitude de ces harmoniques augmente avec le nombre de barres cassées. Ceci, donne une indication sur la sévérité du défaut.

L'inconvénient de cette méthode (éléments finis-Flux 2D) reste le temps de calcul qui est très long (12 heures ...1 jours...3jours..) et qui demande un calculateur très puissant, élément non disponible dans notre possession.

Comme perspectives, nous proposons à court terme d'étudier l'impact de la rupture des barres ainsi que les oscillations de charge lorsque le nombre de barres cassées augmente (l'augmentation de la résistance rotorique).

Enfin, il nous semble intéressant d'avoir Une étude comparative entre comportement, d'une machine saine et d'une machine portant un défaut permettra de déduire la présence de défaut. Dans cette comparaison, les grandeurs électromagnétiques et mécaniques sont adoptées.

Le recours vers l'utilisation des méthodes du traitement de signal permettra de donner une meilleure vision sur la présence du défaut et sur sa nature. Parmi ces méthodes, la méthode de transformer de Fourier (FFT) peut être exploité.

Bibliographie

Bibliographie

[AM 17] Pr A.Menacer « Cours diagnostic de la machine asynchrone 2017 ».

[A.B 97] A. Barbour, W.T. Thomson, "Finite element study of rotor slot designs with respect to Current monitoring for detecting static air-gap eccentricity in squirrel cage induction motors," in *Proceeding of IEEE Industrial Application Society*, Annual meeting, NewOrleans, Louisiane, Octobre 5-8, 1997.

[ABO 05] A. Aboubou, M. Sahraoui, S.E. Zouzou, N. Harid, H. Razik et A. Rezzoug, "Comparaison de Trois Techniques Dédiées au Diagnostic des Défauts Rotoriques dans les Moteurs Asynchrones Triphasés à Cages", *Revue Internationale de Génie Electrique (RIGE)*, vol. 8, no. 3/4, 2005, pp. 557-576.

[AHM 08] I. Ahmed and M. Ahmed, "Comparison of Stator Current, Axial leakage Flux and Instantaneous Power to Detect Broken Rotor Bar Faults in Induction Machines", in *Proc. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08)*, 2008, pp. 1-6

[BAS 09] S.Bazine, «Conception et implémentation d'un méta-modèle de machines asynchrones en défauts» thèse de doctorat, Université de Poitiers 2009.

[BLO 06] Martin BLÔDT and al. "Mechanical Load Fault Detection in Induction Motors by Stator Current Time-Frequency Analysis", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 42, no. 6, Nov./Dec. 2006, pp. 1454-1463 135

[BL 01] D. Bispo, L. M. Neto, J. Tarcísio de Resende, and D. Alves de Andrade, "A New Strategy for Induction Machine Modeling Taking Into Account the Magnetic Saturation", *IEEE Trans. on Industry Applications*,

[DED 04] G.Dedier, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances» thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2004.

[HN 15] HALEM Noura « Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis » mémoire de doctorant Electrotechnique université de Mohamed Khaider Biskra 2015.

[JL 94] J. Penman, J. Sedding, H.G. Lloyed, B.A. Fink, "Detection and localisation of interturn short circuits in the stator winding of operating motors," *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, December 1994, pp. 652-658.

[KHA 09] A. Khezzar and al., "Induction Motor Diagnosis Using Line Neutral Voltage Signatures", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, Nov. 2009, pp. 4581-4591.

[KHL 15] L.khaled «MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN PRESENCE DE DEFAUTS PAR FLUX 2D » mémoire de master, Université de Biskra2015.

[NAN 02] S. Nandi and al., "Novel Frequency Domain Based Technique to Detect Incipient Stator Inter-turn Faults in Induction Machines Using Stator Induced Voltage After Switch-Off," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 1, pp. 101–109, Jan./Feb. 2002.

[MAI 92] R. Maier, "Protection of Squirrel-Cage Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 2, March/April 1992, pp. 376-380.

[M.G.A 00] M. G. Joksimovic, J. Penman and N. Arthur, "The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, October 2000, pp. 1078-1084.

[M.A.S.M.S 15] M.Doula, A. Boukadoum, S. Leulmi, M. Mardjaoui, F. Boukhenoufa

Contribution à l'étude par éléments finis du comportement électrique - mécanique - circuit des machines, Université du 20 Août 1955 – Skikda

[OUM 07] M.E.K. Oumaamar and al. "Neutral Voltage Analysis for Broken Rotor Bars Detection in Induction Motors Using Hilbert Transform Phase", in Proc. IEEE IAS'07 Annual Meeting Conf.2007, pp.1940-1947.

[RC 92] Roland CASIMIR « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes » thèse de doctorat Ecole Centrale de Lyon, 2003. Français

[SM 10] M. Sahraoui, «Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones» thèse de doctorat, Université de Biskra 2010.

[S Kh 12] Samia. Khelif, «Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique», mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012.

[SK 12] Samia. Khelif, «Modélisation de la machine asynchrone en vue diagnostic prise en compte adéquate du circuit magnétique», mémoire de magistère, Electrotechnique Université de Mohammed Khaider Biskra, 2012.

[W.T 01] W.T. Thomson, M. Fenger, "Current signature Analysis to detect induction Motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, july/August 2001, pp. 26-34.

[Z.M.A 04] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Aboubou, A. Ghoggal, "Etude comparative entre deux méthodes du diagnostic des cassures de barres dans les moteurs à induction," in *Proceeding of the 3rd Conference on Engineering*, Batna, Algeria, Octobre, 2004.