الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N°...../2026

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

SPECIALITE : Electrotechnique industrielle

Thème

Diagnostic et caractérisation du défaut d'excentricité dans une MAS par analyse du flux magnétique

Présenté Par : Kherkhache Anis
Benamoura Mohammed Amine

Encadré Par : Ferkha Nassira

Date de soutenance : 01/07/2026

Jury de Soutenance

President : Hafsaoui Ilhem	**Garde MCA**	**Univ MSB jijel**
Encadreur : Ferkha Nassira	**Garde MCB**	**Univ MSB jijel**
Examinateur : Kimouche Abdelghani	**Garde MCB**	**Univ MSB jijel**

Promotion : 2025 /2026

Résumé

Ce travail porte sur le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans les moteurs à induction. Ce défaut, dû à la non-uniformité de l'entrefer entre le stator et le rotor, perturbe la distribution du flux magnétique et affecte les performances de la machine. L'étude repose sur l'analyse du flux magnétique associée à une modélisation par la méthode des éléments finis afin d'identifier les signatures caractéristiques du défaut d'excentricité. Une approche basée sur les algorithmes génétiques est utilisée pour estimer les paramètres du défaut et améliorer sa caractérisation. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de cette méthode pour la détection et la caractérisation du défaut d'excentricité, contribuant ainsi à l'amélioration de la fiabilité et de la maintenance prédictive des moteurs à induction.

Mots-clés : Machine asynchrone, excentricité, analyse de flux, méthode des éléments finis, algorithmes génétiques, diagnostic.

Abstract

This work focuses on the diagnosis and characterization of eccentricity faults in induction motors. This fault, caused by the non-uniformity of the air gap between the stator and the rotor, disrupts the magnetic flux distribution and affects machine performance. The study relies on magnetic flux analysis combined with finite element modeling to identify the characteristic signatures of the eccentricity fault. A genetic algorithm-based approach is used to estimate the fault parameters and improve its characterization. The results obtained demonstrate the effectiveness of this method for detecting and characterizing eccentricity faults, thus contributing to improved reliability and predictive maintenance of induction motors.

Keywords: Induction motor, eccentricity, flux analysis, finite element method, genetic algorithms, diagnosis.

ملخص

يركز هذا العمل على تشخيص وتوصيف أعطال اللامركزية في المحركات الحثية. ينتج هذا العطل عن عدم انتظام الفجوة الهوائية بين الجزء الثابت والجزء الدوار، مما يؤدي إلى اضطراب توزيع التدفق المغناطيسي والتأثير سلبًا على أداء المحرك. تعتمد الدراسة على تحليل التدفق المغناطيسي بالتزامن مع نمذجة العناصر المحدودة لتحديد السمات المميزة لعطل اللامركزية. كما يُستخدم أسلوب الخوارزمية الجينية لتقدير معلمات العطل وتحسين توصيفه. تُظهر النتائج المُتحصل عليها فعالية هذه الطريقة في الكشف عن أعطال اللامركزية وتوصيفها، مما يُسهم في تحسين موثوقية المحركات الحثية وصيانتها التنبؤية

الكلمات المفتاحية: محرك حث، لامركزية، تحليل التدفق، طريقة العناصر المحدودة، الخوارزميات الجينية، التشخيص


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits et Sa grâce. Que la paix et les bénédictions soient sur notre Prophète Mohammed (Salla Allahou Alayhi Wa Sallam).

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur, ***Dr N. Ferkha****, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa disponibilité, son suivi rigoureux ainsi que ses encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants de la Faculté des Sciences et Technologies, en particulier ceux du département d'Électrotechnique, pour la qualité de leur enseignement et les connaissances qu'ils nous ont transmises.

Nos remerciements vont également au chef de département, ***Pr M. Lefouili****, ainsi qu'au doyen de la Faculté,* ***Pr M. R. Mekideche****, pour leurs efforts et leur contribution au bon déroulement de notre formation universitaire.*

Enfin, nous exprimons notre gratitude à nos familles, à nos proches et à nos amis pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence tout au long de notre parcours universitaire et de la réalisation de ce travail de fin d'études

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ma très ***chère mère*** *et* ***mon père*** *qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie. Que dieu puisse m'aider à l'honneur. La servir et la combler.*

A mes très ***chers frères*** *et* ***sœurs***

A toute la famille ***Kherkhache***

A tous mes amis du long parcours scolaire et Universitaire : ***Kimouche amine, Later amine, Wail, Moumen, Chamsso, Khalil, Baha, Hichame, Kamer, Idris, Tarek, Aziz, Amir*** *et tous ceux qui m'aiment.*

A mon binôme ***Mohammed Amine*** *qui a contribué à la réalisation de ce Modeste travail.*

Anis

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents,

Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis tout au long de mes années d'études. Ils n'ont jamais cessé de croire en moi, de me soutenir et de m'encourager.

Leur amour, leur patience et leur confiance ont toujours été ma plus grande source de motivation. Ils ont été, après Dieu, la principale raison de ma réussite. Je prie Dieu de leur accorder santé, bonheur et longue vie.

À mes très chères sœurs,

Pour tous les efforts et les sacrifices qu'elles ont consentis pour moi durant toutes ces années, pour mon éducation et ma formation.

À mes frères : Midou ; abdelnour
Pour tous les efforts qu'ils ont déployés pour moi depuis mon enfance

À mon meilleur ami : Bensabera bassem

À tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire et mes collègues de la promotion électrotechnique

À mon cher binôme ***Anis***

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime

Amine

Sommaire

Liste des figures i
Liste des Tableaux ii

Chapitre I
Défauts des machines électriques : État de l'art

Introduction générale 1
Introduction 3
I.1. Défaillances des machines électriques : Généralités 3
I.2. Quelques statistiques 4
I.3. Présentation de quelques défauts dans les ME 6
I.3.1. Défauts de roulements 6
I.3.2. Défauts rotoriques 7
I.3.2.1. Rupture de barres 7
I.3.2.2. Ruptures d'anneaux de court-circuit 8
I.3.2.3. Excentricité 9
I.3.2.4. Désaimantation 9
I.3.3. Défauts statoriques 9
I.3.3.1. Défauts d'isolant dans un enroulement 11
I.3.3.2. Court-circuit entre spires 12
I.3.3.3. Court-circuit entre phases 12
I.3.3.4. Circuit ouvert sur une phase 13
I.3.3.5. Court-circuit avec le bâti 13
I.4. Défauts des machines asynchrones 14
I.5. Excentricité 15
I.5.1. Effets de l'excentricité 16
I.5.2. Inconvénients techniques et économiques de l'excentricité dans les MAS 17
I.5.2.1. Risque de frottement rotor-stator et destruction rapide 17
I.5.2.2. Augmentation des pertes et de la consommation d'énergie 17
I.5.2.3. Vieillissement prématuré de l'isolation et des roulements 17
Conclusion 18

Chapitre II
Techniques de diagnostic et du CND du défaut d'excentricité dans les machines électriques

Introduction 19

II.1. Diagnostic et surveillance des machines électriques 19
II.1.1. Définition 19
II.1.2. Etapes 20
II.2. Contrôle non-destructif 21
II.2.1. Définition 21
II.2.2. Méthodes du CND 22
II.2.2.1. Ressuage 22
II.2.2.2. Magnétoscopie 23
II.2.2.3. Radiographie 24
II.2.2.4. CND par courants de Foucault 25
II.2.2.5. Analyse par thermographie infrarouge 25
II.2.2.6. Analyse vibratoire 27
II.2.2.7. Analyse du flux 28
Conclusion 32

Chapitre III
Approches mathématiques pour la modélisation et le CND par analyse du flux des défauts de la machine à induction

Introduction 33
III.1. Principe général du CND des défauts des machines électriques par analyse du flux magnétique 33
III.1.1. Modélisation: Calcul du flux magnétique 33
III.1.2. Mesure du flux magnétique 34
III.1.2.1. Flux axial de fuite 34
III.1.2.2. Flux radial de fuite 34
III.1.3. Analyse et diagnostic 34
III.2. Calcul du flux magnétique dans les machines électrique 34
III.2.1. Calcul du champ électromagnétique 34
III.2.1.1. Equations de Maxwell 35
III.2.1.2. Formulations électromagnétiques 35
III.2.1.3. Méthodes de résolution 39
III.2.1.4. Autres méthodes de résolution 43
III.2.2. Calcul de l'induction magnétique 43
III.2.3. Détermination du flux magnétique 43
III.3. Diagnostic et CND des défauts d'une machine électrique 44
III.3.1. Minimisation d'une fonction objective en se basant sur une méthode d'optimisation 46
Conclusion 48

Chapitre IV
Application des modèles développés pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine asynchrone

Introduction 49
IV.1. Problématique et objectifs 49
IV.2. Description de la machine d'étude 50
IV.3. Détermination du flux magnétique par modélisation numérique 53
IV.4. Modélisation et diagnostic de la MAS dans le cas défectueux 59
IV.4.2. Diagnostic du défaut d'excentricité dynamique par analyse du flux magnétique 64
IV.5. Caractérisation du défaut d'excentricité statique par analyse du flux 69
IV.5.1. Caractérisation de l'excentricité statique due à un défaut de fabrication 69
IV.5.2. Caractérisation de l'excentricité induite par l'effet du poids du rotor 71
Conclusion 73
Conclusion générale 74
Références bibliographiques 76

Liste des figures

N°	*Thème*	*Page*
Figure I.1	Proportion des défauts dans les machines asynchrones de moyenne puissance	**4**
Figure I.2	Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances	**5**
Figure I.3	Répartition des pannes dans les machines de grandes puissances.	**5**
Figure I.4	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture de barres.	**8**
Figure I.5	Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture d'anneau de court-circuit.	**8**
Figure I.6	Durée de vie d'un isolant en fonction de la Température de fonctionnement	**11**
Figure I.7	Défauts des enroulements statoriques	**14**
Figure I.8	Types d'excentricité. **(a)** rotor centré, **(b)** excentricité statique, **(c)** excentricité dynamique	**16**
Figure II.1	Etapes du diagnostic industriel	**20**
Figure II.2	Synoptique schématisé du contrôle non destructif	**21**
Figure II.3	Etapes du ressuage	**23**
Figure II.4	Contrôle par magnétoscopie	**24**
Figure II.5	Détection des défauts par radiographie	**24**
Figure II.6	Principe du CND par les courants de Foucault	**25**
Figure II.7	Thermographie infrarouge d'un équipement électrique	**26**
Figure II.8	Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge	**26**
Figure II.9	Mesure et analyse vibratoire d'un moteur électrique	**27**
Figure II.10	Schéma de principe d'un capteur à effet Hall	**30**
Figure II.11	Schéma de principe d'un capteur Fluxgate	**31**

Figure II.12	Schéma de principe d'un capteur magnéto-résistif	**32**
Figure III.1	Éléments classiques en une et deux dimensions	**41**
Figure III.2	Organigramme du code de calcul développé pour le calcul du flux Magnétique	**44**
Figure III.3	Processus du CND par analyse du flux magnétique	**46**
Figure III.4	Principe de base de l'algorithme génétique : Cycle génétique	**47**
Figure IV.1	Vue éclatée de la machine d'étude	**51**
Figure IV.2	Configuration géométrique de la MAS à étudier	**51**
Figure IV.3	Bobinage de la MAS a étudié	**53**
Figure IV.4	Maillage éléments finis adopté à cette étude	**55**
Figure IV.5	Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique	**56**
Figure IV.6	Evolution des composantes de l'induction suivant un contour passant par les dents statoriques	**57**
Figure IV.7	Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques	**58**
Figure IV.8	Evolution du flux magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques	**58**
Figure IV.9	Spectre du flux magnétique	**59**
Figure IV.10	Procédure du diagnostic du défaut d'excentricité dans une MAS par analyse du flux magnétique	**60**

Figure IV.11	Excentricité statique. Cas du décalage du rotor à droite	**61**
Figure IV.12	Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité.	**61**
Figure IV.13	Spectre du flux magnétique en présence d'une excentricité statique. Décalage du rotor à droite	**62**
Figure IV.14	Excentricité statique. Cas du décalage du rotor vers le bas	**63**
Figure IV.15	Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité. Décalage du rotor vers le bas	**63**
Figure IV.16	Contenu spectral du flux magnétique en présence d'une excentricité Décalage du rotor vers le bas statique.	**64**
Figure IV.17	Deux positions d'excentricité dynamique. Position1 : rotor décalé à Position 2 : rotor décalé à droite gauche,	**65**
Figure IV.18	Deux positions d'excentricité dynamique. Position 3 : rotor décalé en Position 4 : rotor décalé vers le bas haut,	**66**
Figure IV.19	Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique en présence du défaut d'excentricité dynamique,	**67**
Figure IV.20	Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité dynamique.	**68**
Figure IV.21	Spectres fréquentiels du flux magnétique obtenus en présence d'une excentricité dynamique. Pour 4 cas d'excentricité	**68**
Figure IV.22	Evolution de la fonction objective du problème de caractérisation d'un défaut d'excentricité statique dû à la fabrication	**70**
Figure IV.23	Flux magnétique calculé et supposé mesurer, sur les dents statoriques, en présence du défaut d'excentricité statique dû à la fabrication	**71**
Figure IV.24	Evolution de la fonction objective. Cas du décalage du rotor vers le bas	**72**
Figure IV.25	Flux magnétique calculé et supposé mesurer, sur les dents statoriques, en présence du défaut d'excentricité dû au poids du rotor	**73**

Liste des Tableaux

Tableau IV.1	Caractéristiques de la MAS à cage à étudier	**52**
Tableau IV.2	Paramètres obtenus du défaut d'excentricité, 1^{ier} cas	**71**
Tableau IV.3	Paramètres obtenus du défaut d'excentricité, 2^{iéme} cas	**72**

Introduction générale

Introduction générale

Les moteurs asynchrones occupent une place centrale dans l'industrie moderne en raison de leur robustesse, de leur simplicité de conception, de leur faible coût et de leur grande fiabilité. On les retrouve dans de nombreuses applications : pompes, ventilateurs, compresseurs, convoyeurs et lignes de production automatisées. Par conséquent, leur bon fonctionnement est essentiel pour garantir la continuité de la production et réduire les pertes économiques liées aux arrêts non planifiés **[1].**

Cependant, ces machines subissent pendant leur service des sollicitations électriques, thermiques et mécaniques susceptibles d'entraîner l'apparition de défauts. Parmi ces anomalies, l'excentricité rotor-stator est l'une des plus fréquentes et des plus critiques. Elle se traduit par une inhomogénéité de l'entrefer entre rotor et stator, perturbant la distribution du champ magnétique et du flux dans la machine. Si elle n'est pas détectée rapidement, l'excentricité peut provoquer une augmentation des vibrations, des efforts mécaniques supplémentaires, une dégradation des performances et une réduction de la durée de vie de la machine **[2].**

Dans ce contexte, le développement de méthodes efficaces de surveillance, de diagnostic et de caractérisation des défauts constitue un enjeu majeur en maintenance prédictive. Plusieurs techniques ont été proposées pour la détection d'anomalies dans les machines électriques. L'analyse du flux magnétique apparaît comme une méthode non invasive et prometteuse pour identifier le défaut d'excentricité. Elle repose sur l'étude des perturbations que génère le défaut sur les flux de fuite et sur la reconnaissance de signatures fréquentielles caractéristiques, obtenues notamment par la Transformée de Fourier Rapide (FFT).

Ce mémoire porte sur le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine à induction, en s'appuyant sur l'analyse du flux magnétique. L'objectif principal est d'étudier l'influence de l'excentricité sur le comportement électromagnétique de la machine, d'identifier les signatures qui lui sont associées et d'évaluer l'efficacité de la méthode proposée pour sa détection et sa caractérisation.

Pour atteindre ces objectifs, ce travail suit trois étapes principales: une revue bibliographique sur les machines asynchrones et les techniques de diagnostic; le développement d'un modèle électromagnétique, basé sur les équations de Maxwell et résolu par la méthode des éléments finis, pour déterminer la distribution du flux magnétique; l'application de la FFT pour l'analyse des signaux de flux simulés et l'extraction d'indicateurs pertinents pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité. Donc, pour présenter ce travail de fin d'études, ce mémoire va être structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre concerne la présentation des principaux défauts rencontrés dans les machines électriques tout en portant plus d'importance au défaut d'excentricité. Il expose leurs origines, leurs mécanismes d'apparition ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des machines.

Le deuxième chapitre vise les techniques de diagnostic des défauts dans les machines électriques, avec une attention particulière portée aux méthodes de contrôle non destructif et aux approches utilisées en maintenance prédictive.

Les approches mathématiques nécessaires pour la modélisation de la machine asynchrone ainsi que pour le diagnostic et la caractérisation de ses défauts et plus particulièrement du défaut d'excentricité, par analyse du flux magnétique, feront l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est dédié à l'exploitation des modèles développés pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine à induction. Les deux types d'excentricité : statique et dynamique vont être traités.

Enfin, ce mémoire va être clôturé par une conclusion générale et des perspectives qui proposent des pistes d'applications plus compliquées et des améliorations pour mener à mieux les méthodes de diagnostic et de caractérisation du défaut d'excentricité dans les machines électriques.

Chapitre I

Défauts des machines électriques : État de l'art

Chapitre I
Défauts des machines électriques : État de l'art

Introduction

Au cours de leur exploitation, les machines électriques sont soumises à diverses contraintes électriques, mécaniques, thermiques et environnementales pouvant entraîner l'apparition de défauts susceptibles d'affecter leurs performances, de réduire leur durée de vie et, dans certains cas, de provoquer des arrêts de production coûteux.

Ce chapitre présente un état de l'art des principaux défauts rencontrés dans les machines électriques. Il expose leurs origines, leurs mécanismes d'apparition, leurs conséquences sur le fonctionnement des machines ainsi que quelques statistiques existantes dans la littérature scientifique.

I.1. Défaillances des machines électriques : Généralités

Dans les machines électriques (ME), une défaillance correspond à tout événement ou anomalie qui entraîne un fonctionnement inhabituel de la machine. Ce comportement anormal peut, à court ou à long terme, provoquer une détérioration ou un endommagement du système.

Les défaillances des machines électriques peuvent avoir plusieurs origines, notamment électriques, mécaniques ou encore magnétiques. Les causes de ces défaillances sont nombreuses et peuvent généralement être regroupées en trois catégories principales **[4]** :

- ✓ *Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts*: il s'agit des éléments qui provoquent directement l'apparition d'un défaut, comme la surchauffe du moteur, les défauts électriques tels que les courts-circuits, les surtensions d'alimentation, les problèmes d'isolation électrique, l'usure de certains composants mécaniques comme les roulements à billes, ou encore la rupture de certaines fixations,
- ✓ *Les facteurs amplificateurs de défauts*: ce sont des conditions qui favorisent l'aggravation des défauts existants, par exemple les surcharges répétées, les vibrations mécaniques, un environnement humide, un échauffement permanent, un mauvais graissage ou encore le vieillissement des composants,

- ✓ *Les défauts liés à la fabrication ou aux erreurs humaines*: ils peuvent provenir de défauts de fabrication, de composants défectueux, de systèmes de protection mal adaptés ou encore d'un mauvais dimensionnement de la machine.

I.2. Quelques statistiques

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones (MAS) de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et le reste (18%) dans les autres régions de la machine tels que les roulements (figure I.1) **[5]**.

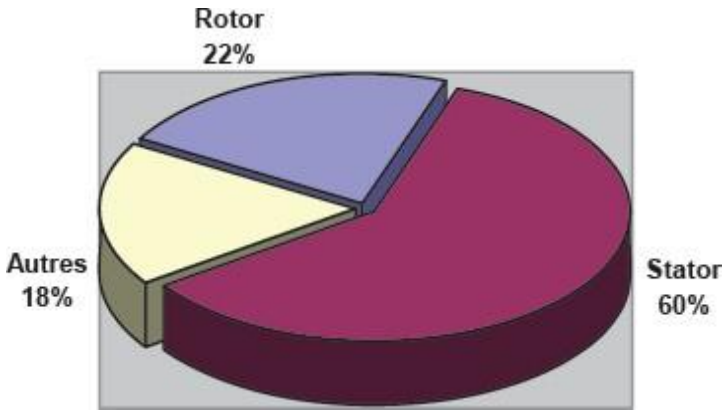


Figure I.1: Proportion des défauts dans les machines asynchrones de moyenne puissance

D'autre part, la même étude montre qu'entre 1973 et 1988, les pannes au stator sont passées de 78% à 60% et les pannes au rotor sont passées de 12% à 22%. Ces variations sont dues à l'amélioration des isolants sur cette période.

La répartition des pannes dans les différentes parties des moteurs asynchrones de faibles et moyennes puissances est donnée par la figure ci-dessous.

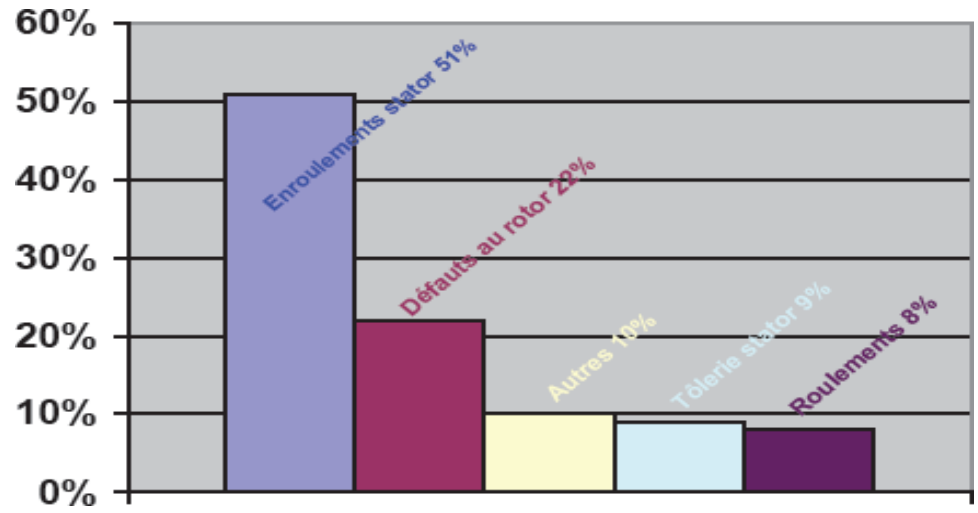


Figure I.2: Répartition des pannes dans les machines de faibles et moyennes puissances

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) a montré que pour cette gamme de puissance, les pannes les plus fréquentes se situent sur les roulements. Le stator et le rotor sont le siège de 13% et 8% des pannes respectivement (figure I.3) **[6]**. Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Ceci exige une maintenance mécanique accrue.

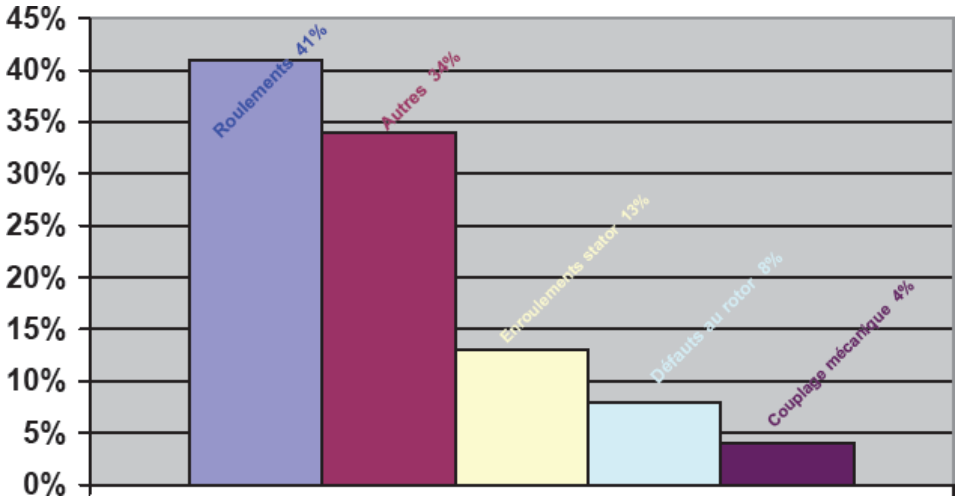


Figure I.3: Répartition des pannes dans les machines de grandes puissances

De ces études, nous constatons que les défauts dans le stator sont plus fréquents dans les machines de moyenne puissance. Par contre, dans les machines de grandes puissances, les roulements sont la partie la plus concernée par les défauts/pannes. Evidemment, ces statistiques évoluent avec le type de la machine, le type d'alimentation (par exemple l'alimentation par

onduleur), l'augmentation de la vitesse et l'environnement de fonctionnement de la machine.

Il est à noter qu'actuellement les machines électriques synchrones ou asynchrones sont souvent alimentées par des onduleurs de tension dont la fréquence de commutation de leurs composants augmente de plus en plus. Les bobinages de ces machines subissent des surtensions De niveaux plus élevés, ce qui entraîne le vieillissement prématuré de leur isolant et augmente ainsi le taux d'apparition de défauts électriques dans ces bobinages notamment ceux statoriques.

I.3. Présentation de quelques défauts dans les ME

I.3.1. Défauts de roulements

Les roulements à billes constituent l'élément mécanique qui assure la liaison entre le rotor et le stator. Ils ont pour fonction principale de supporter l'arbre de la machine et de garantir une rotation stable et régulière du rotor.

Comme mentionné précédemment, les défauts liés aux roulements figurent parmi les pannes les plus fréquentes, en particulier dans les machines de forte puissance. Ces défaillances sont généralement dues à l'usure progressive des roulements, notamment la détérioration des billes ou de la piste de roulement. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette dégradation, tels que le vieillissement naturel, une température de fonctionnement excessive, un manque de lubrification, la contamination de l'huile par des particules métalliques issues de l'usure des éléments du roulement, un mauvais montage ou encore la présence de courants d'arbre **[7,8,9]**.

La présence d'un roulement endommagé se manifeste souvent par des oscillations du couple de charge, une augmentation des pertes mécaniques ainsi qu'un jeu entre les bagues interne et externe du roulement. Ce phénomène provoque des vibrations dues aux déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Dans les situations les plus critiques, la dégradation avancée du roulement peut même conduire au blocage complet du rotor.

I.3.2. Défauts rotoriques

Au niveau du rotor, les défaillances peuvent apparaître à cause de plusieurs facteurs **[10,11,12]**. Ces problèmes peuvent être d'origine thermique, par exemple lors d'une surcharge qui entraîne une élévation excessive de la température. Ils peuvent également être liés à des contraintes électromagnétiques dues aux forces générées par le champ magnétique. D'autres défaillances peuvent provenir de contraintes résiduelles comme certaines déformations mécaniques, ou encore de phénomènes dynamiques liés à l'arbre de transmission. Enfin, l'environnement de fonctionnement de la machine peut aussi jouer un rôle important dans l'apparition de certains défauts.

Parmi les défauts les plus fréquents observés au niveau du rotor, on peut citer la rupture de barres et celle d'une partie de l'anneau de court-circuit, dans les machines asynchrones, ainsi que les problèmes d'excentricité statique ou dynamique entre le rotor et le stator. Dans le cas des machines synchrones à aimants permanents, un autre défaut possible est la désaimantation des aimants.

I.3.2.1. Rupture de barres

La rupture de barres constitue l'un des défauts les plus fréquents au niveau du rotor des machines asynchrones. Cette défaillance peut apparaître soit au niveau de l'encoche de la barre, soit à son extrémité, là où elle est reliée à l'anneau de court-circuit.

La dégradation ou la cassure des barres (figure I.4) entraîne une diminution de la valeur moyenne du couple électromagnétique et provoque une augmentation des oscillations du couple. Ces oscillations se répercutent directement sur la vitesse de rotation, ce qui peut générer des vibrations mécaniques et perturber le fonctionnement normal de la machine. Lorsque l'amplitude de ces oscillations devient importante, elle peut accélérer le processus de détérioration des différents composants de la machine. De plus, la diminution du couple devient plus marquée lorsque le nombre de barres cassées augmente, ce qui crée un effet cumulatif de la défaillance. Ainsi, l'impact d'une rupture de barre s'amplifie rapidement avec l'augmentation du nombre de barres endommagées **[13,14,15]**.

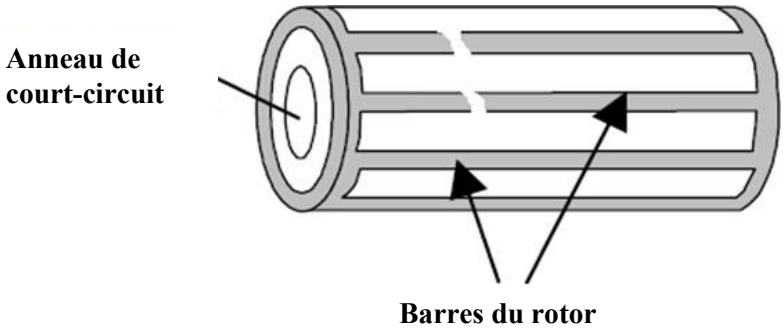


Figure I.4: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture de barres

I.3.2.2. Ruptures d'anneaux de court-circuit

La rupture d'une partie de l'anneau de court-circuit dans une machine asynchrone à cage représente un défaut relativement fréquent, comparable à la cassure des barres. Ce type de défaillance peut être causé par des défauts de fabrication, comme la présence de bulles lors de la coulée, ou par les dilatations thermiques différentes entre les barres et les anneaux.

Étant donné que ce défaut est difficile à identifier avec précision, il est souvent associé ou confondu avec la rupture de barres dans certaines études statistiques. Les anneaux de court-circuit transportent généralement des courants plus importants que ceux circulant dans les barres du rotor. Par conséquent, un mauvais dimensionnement, des conditions de fonctionnement défavorables (température élevée, humidité, etc.) ou encore une surcharge peuvent provoquer leur rupture. Cette défaillance entraîne un déséquilibre dans la répartition des courants dans les barres rotoriques et produit un effet de modulation sur les courants statoriques, similaire à celui observé lors d'une cassure de barre **[16,17]**. La figure ci-dessous présente un rotor à cage d'écureuil avec une rupture dans un des anneaux de court-circuit.

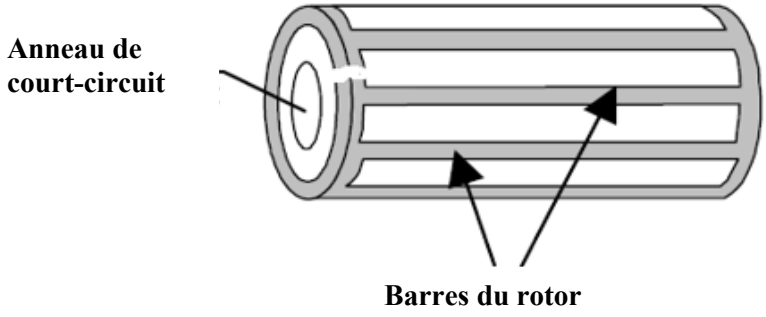


Figure I.5: Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : rupture d'anneau de court-circuit

I.3.2.3. Excentricité

L'excentricité des machines électriques désigne un défaut de centrage entre le stator et le rotor, qui entraîne une épaisseur d'entrefer non uniforme autour de la circonférence. Elle est généralement classée en trois types [**18]**:

- *Excentricité statique*: le centre du rotor est décalé par rapport au centre du stator, mais ne tourne pas avec le rotor. L'entrefer minimum reste fixe dans l'espace,
- *Excentricité dynamique*: le rotor tourne autour d'un axe différent de son propre centre géométrique, donc la zone d'entrefer minimum tourne avec le rotor,
- *Excentricité mixte*: combinaison des deux défauts (statique et dynamique en même temps).

I.3.2.4. Désaimantation

La désaimantation constitue un problème important dans les machines utilisant des aimants permanents. Ce phénomène est généralement lié aux pertes au niveau du rotor et à l'élévation de la température des aimants, souvent accentuée par un champ de réaction d'induit important. La majorité des études se concentrent sur le comportement des aimants permanents en charge et leur capacité à supporter un champ magnétique intense dû à des courants élevés.

Deux situations principales peuvent être distinguées. La première concerne les aimants permanents de type **Nd-Fe-B**, dont les caractéristiques magnétiques diminuent lorsque la température augmente. Par exemple, lors du processus de collage des aimants, une élévation de température supérieure à 100°c peut provoquer une désaimantation partielle. La seconde situation concerne certains moteurs modulaires dans lesquels les aimants peuvent être exposés à un champ démagnétisant dans l'air. Dans ce cas, l'utilisation de matériaux comme les ferrites peut poser problème, car leur champ coercitif diminue avec la température.

I.3.3. Défauts statoriques

L'armature statorique, équipée de son bobinage, constitue une partie essentielle de la machine électrique. Elle est soumise à plusieurs contraintes qui peuvent affecter son fonctionnement, notamment en raison de la complexité de sa structure et de la sensibilité de certains éléments comme les matériaux isolants. Dans le stator, les défaillances apparaissent généralement à la suite de différents types de contraintes telles que **[10]** :

❖ **Contraintes thermiques:**

L'isolation des enroulements est conçue pour fonctionner pendant une durée de vie déterminée à la température nominale. Toutefois, lorsque la température dépasse cette valeur, le vieillissement de l'isolant s'accélère fortement et sa durée de vie diminue rapidement (voir figure I.6). Cette élévation de température peut être provoquée par plusieurs facteurs tels qu'un déséquilibre ou une variation de la tension d'alimentation, des démarrages répétés dans un intervalle de temps court, des surcharges prolongées, une ventilation insuffisante ou encore une température ambiante élevée.

❖ **Contraintes électriques :**

L'application d'une tension supérieure à la valeur nominale ou la présence de fortes variations de tension, généralement causées par la commutation des interrupteurs dans les convertisseurs statiques, peut entraîner une dégradation progressive du diélectrique assurant l'isolation des bobines. Dans ces conditions, un champ électrique interne important peut apparaître et provoquer des décharges partielles dans les cavités de l'isolant. Ces décharges entraînent la formation de zones carbonisées qui perturbent la répartition du champ électrique et accentuent localement les contraintes électriques.

❖ **Contraintes mécaniques :**

Les démarrages fréquents de la machine provoquent une élévation cyclique de la température dans les conducteurs en cuivre des enroulements statoriques et dans la cage du rotor. Ce phénomène engendre des cycles répétés de dilatation et de contraction des matériaux isolants. À long terme, ces variations peuvent entraîner l'apparition de fissures dans l'isolant, lesquelles peuvent s'étendre progressivement et conduire à un court-circuit interne. Par ailleurs, les forces mécaniques exercées sur les tôles et les conducteurs comportent des composantes alternatives qui génèrent des vibrations dans la structure de la machine. Ces vibrations peuvent provoquer une usure progressive de l'isolant par abrasion ou érosion **[10,19]**.

❖ **Environnementales:**

Les conditions environnementales jouent également un rôle important dans la dégradation du stator. La présence d'humidité ou de substances chimiques dans l'air ambiant peut altérer les propriétés de l'isolant et favoriser l'apparition de défauts au niveau des enroulements. Les premières phases de dégradation se traduisent souvent par l'apparition de courants de fuite qui accélèrent la détérioration de l'isolation jusqu'à provoquer un court-circuit. De plus, la formation d'ozone et d'oxydes d'azote peut se produire, lesquels, en présence d'humidité, peuvent former de l'acide nitrique susceptible d'endommager davantage l'isolant.

Ainsi, les défauts les plus fréquemment rencontrés au niveau du stator sont principalement: le défaut d'isolement, le court-circuit entre spires, le court-circuit entre phases, le court-circuit entre phase et bâti, le déséquilibre d'alimentation ainsi que les défauts liés au circuit magnétique.

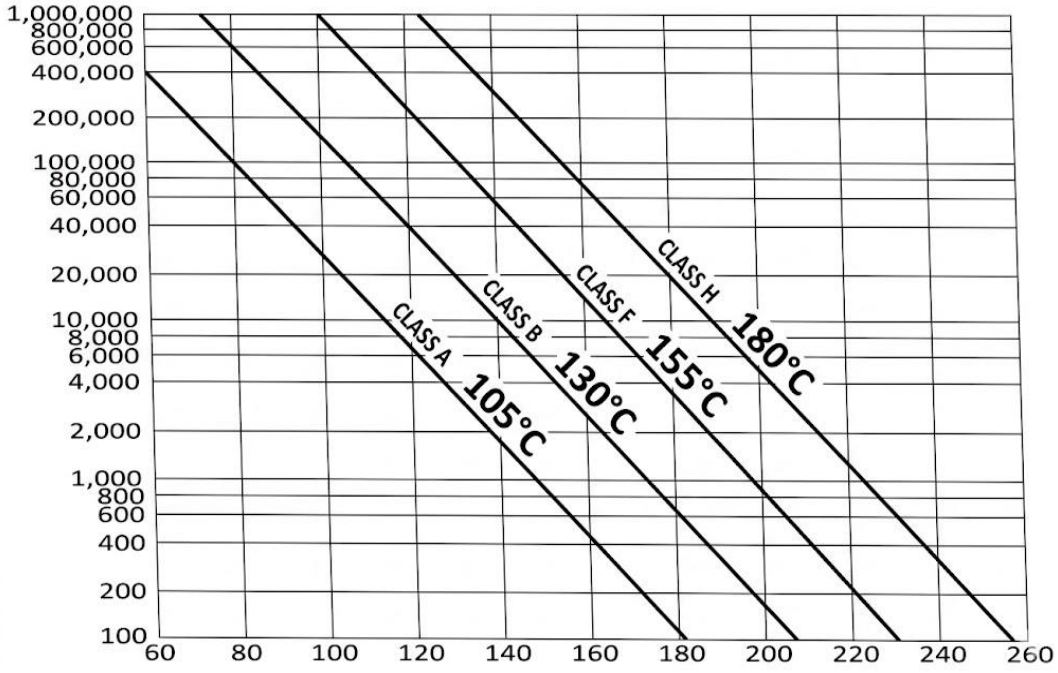


Figure I.6: Durée de vie d'un isolant en fonction de la température de fonctionnement

I.3.3.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique) engendrent une augmentation de la température des différents constituants de la machine. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Si cette limite sera dépassée, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes causes pour ce type de défaut sont **[10]** :

- ✓ Dégradation de l'isolant à la fabrication,
- ✓ Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation,
- ✓ Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge,
- ✓ Vibrations mécaniques,

- ✓ Vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation normale, l'isolant finit naturellement par se dégrader,
- ✓ Fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase-masse). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires).

Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différentes. La détérioration simultanée et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes (défaut phase-phase). Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi influencée par ces défauts.

La figure I.7 présente les différents défauts qui peuvent survenir dans les enroulements d'une machine électrique.

I.3.3.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre les spires d'une même phase est un problème courant. Cela arrive quand l'isolation d'un enroulement est endommagée. Ce défaut cause une hausse des courants statoriques dans la phase touchée, une petite variation de l'amplitude sur les autres phases, change le facteur de puissance et augmente les courants dans le circuit rotorique pour les machines asynchrones **[10, 19]**.

La température du bobinage monte, ce qui abîme plus vite les isolants et peut causer d'autres courts-circuits. Le couple électromagnétique moyen reste presque le même, mais les oscillations de couple augmentent à cause du déséquilibre des courants de phases créé par le défaut **[20]**.

I.3.3.3. Court-circuit entre phases

Ce genre de problème peut survenir partout dans le bobinage, mais l'endroit où il se produit change les conséquences. C'est pourquoi il est dur d'étudier l'impact de ce défaut sur le système.

Si un court-circuit entre phases se produit près de l'alimentation, cela crée des courants très forts qui peuvent faire fondre les câbles d'alimentation ou faire déclencher les protections. Par contre, si un court-circuit entre deux phases se produit près du neutre, les conséquences sont

moins graves: cela crée un déséquilibre des courants de phases, mais le risque de voir les câbles fondre est plus faible.

Pour les machines asynchrones, les courants dans les barres et dans les anneaux augmentent quand ce type de défaut apparaît. On peut détecter ce problème en regardant si les courants de phases sont déséquilibrés **[21]**.

I.3.3.4. Circuit ouvert sur une phase

Un circuit ouvert dans une phase a des conséquences moins graves qu'un court-circuit. L'ouverture d'une des phases ne fait pas circuler de courant de faute et ne pose donc pas de problème d'échauffement pouvant détériorer le reste de la machine.

De même, ce défaut ne crée pas de couple résistant lorsqu'un champ variable est appliqué à la bobine. Le seul problème est donc la perte d'une phase et donc de production de couple **[21]**.

I.3.3.5. Court-circuit avec le bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut **[21]**.

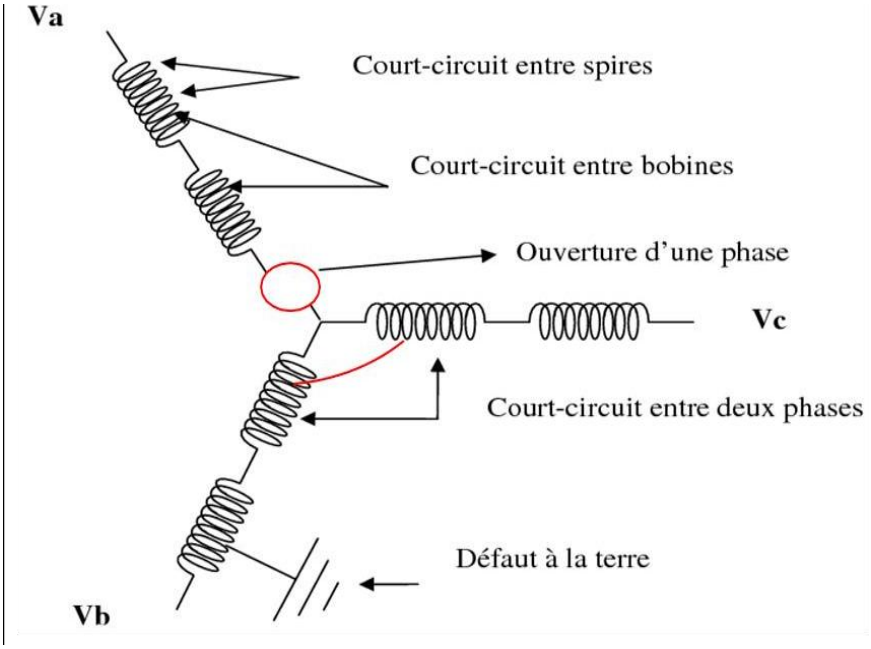


Figure I.7: Défauts des enroulements statoriques

I.4. Défauts des machines asynchrones

Comme nous l'avons présenté précédemment, plusieurs défauts peuvent apparaître dans les machines électriques, notamment les défauts des roulements, ceux au niveau du rotor ainsi que les défauts liés au stator et aux enroulements.

Ces différents types de défaillances peuvent également se produire dans les machines asynchrones, puisque celles-ci appartiennent à la famille des machines électriques tournantes et possèdent des structures et des principes de fonctionnement similaires.

Parmi ces différents défauts, l'excentricité occupe une place particulièrement importante dans les machines asynchrones. En effet, ce phénomène correspond à un mauvais centrage entre le rotor et le stator, ce qui entraîne une non-uniformité de l'entrefer et peut provoquer des vibrations, des efforts électromagnétiques supplémentaires et une dégradation progressive des performances de la machine. Pour cette raison, l'excentricité est considérée comme un défaut significatif dans les machines asynchrones et mérite une étude plus détaillée **[22]**.

I.5. Excentricité

Par conception, l'entrefer d'une machine asynchrone est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances. Donc, la MAS sera la plus sensible aux excentricités. En outre, lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité **[23,24]**.

La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement.

Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine. En effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux.

Le point extrême de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine.

Trois catégories d'excentricité, tel qu'il été déjà mentionné précédemment, sont généralement distinguées **[23]**:

- ✓ ***L'excentricité statique***:

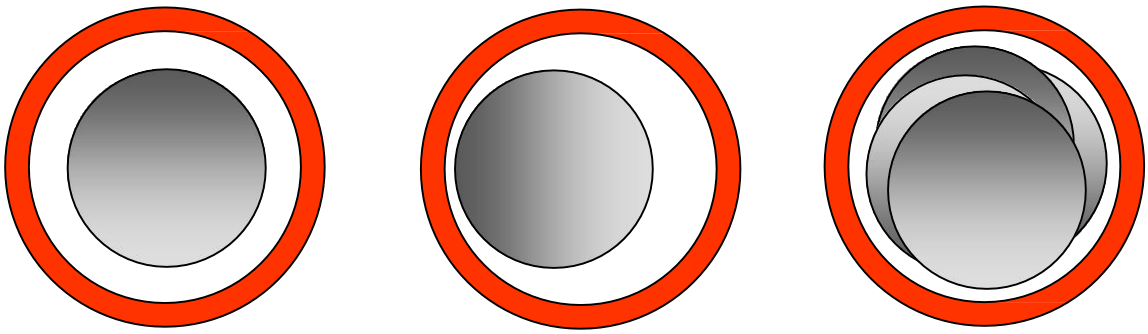
  Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. Elle résulte d'un défaut de centrage des flasques et se manifeste même dans des machines fabriquées récemment en raison des méthodes de fabrication et d'assemblage (figure I.8.b).

- ✓ ***L'excentricité dynamique***:

  Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes. Elle correspond au décalage du centre de rotation du rotor par rapport au centre géométrique du stator, avec en plus, une rotation du centre du rotor autour du centre géométrique de ce stator (voir figure I.8.c).

- ✓ ***L'excentricité mixte***:

  En réalité, les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Un niveau inhérent d'excentricité statique existe toujours, même dans des machines de fabrication récentes. Cela provoque des efforts réguliers d'attraction magnétiques non compensés dans une seule direction, et avec le temps cela peut conduire à la flexion d'un arbre et la dégradation de roulement. Tout cela entamant une excentricité dynamique. Sans détection précoce, l'excentricité devient suffisamment grande pour développer des forces radiales déséquilibrées qui peuvent créer un frottement entre le stator et le rotor, ce qui mène à une panne très grave de la machine.



(a) (b) (c)

Figure I.8: Types d'excentricité. **(a)** rotor centré, **(b)** excentricité statique, **(c)** excentricité dynamique

I.5.1. Effets de l'excentricité

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements.

Donc, comme conséquences de ce défaut, on peut citer **[25]** :

- ✓ **Déséquilibre magnétique**: L'entrefer inégal crée une force d'attraction magnétique unilatérale (Unbalanced Magnetic Pull - UMP) qui tente de rapprocher davantage le rotor du stator.
- ✓ **Vibrations et bruits:** Les forces magnétiques déséquilibrées génèrent des vibrations mécaniques importantes et un bruit magnétique caractéristique.

- ✓ **Défaillance des roulements:** La charge supplémentaire sur les roulements due à l'attraction magnétique réduit leur durée de vie (les défauts de roulements sont la cause principale de défaillance, souvent liée à l'excentricité).
- ✓ **Courants de circulation:** Des courants parasites peuvent apparaître dans l'arbre et les roulements, provoquant des piqûres et une usure prématurée.
- ✓ **Effets sur le stator:** Un échauffement accru et des contraintes mécaniques sur les enroulements du stator.

I.5.2. Inconvénients techniques et économiques de l'excentricité dans les MAS

I.5.2.1. Risque de frottement rotor-stator et destruction rapide

L'excentricité génère une force magnétique déséquilibrée (Unbalanced Magnetic Pull) qui attire le rotor vers le stator. Cette force augmente avec l'excentricité, créant un effet d'emballement pouvant conduire au contact physique entre le rotor et le stator. Ce frottement provoque une destruction rapide de la machine par échauffement intense et dégradation mécanique **[26]**.

I.5.2.2. Augmentation des pertes et de la consommation d'énergie

L'excentricité modifie la répartition du champ magnétique dans l'entrefer, créant des zones de saturation locale. Cela entraîne une augmentation des pertes fer (jusqu'à +10,96%), une diminution du couple utile (jusqu'à -12,3%) et une baisse du rendement global d'environ 1,16%, se traduisant par une surconsommation d'énergie électrique **[27]**.

I.5.2.3. Vieillissement prématuré de l'isolation et des roulements

Pour l'isolation**,** les vibrations causées par l'excentricité provoquent une abrasion progressive des isolants (fretting). L'échauffement localisé accélère le vieillissement thermique des matériaux, réduisant considérablement la durée de vie de l'isolation.

Pour les roulements**,** les efforts radiaux supplémentaires et variables sollicitent anormalement les roulements, accélérant la fatigue des matériaux et provoquant une dégradation prématurée **[28]**.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des différents défauts qui peuvent exister dans les machines électriques et plus précisément dans les machines asynchrones. Donc, nous avons donné un aperçu sur ces défauts en présentant leurs causes ainsi que les conséquences qu'ils engendrent dans les ME.

Plus d'importance a été considérée pour le défaut d'excentricité qui est le sujet de ce travail de fin d'études.

Chapitre II

Techniques du diagnostic et du CND du défaut d'excentricité dans les machines électriques

Chapitre II
Techniques de diagnostic et du CND du défaut d'excentricité dans les machines électriques

Introduction

Aujourd'hui, le secteur industriel est de plus en plus confronté à des défis en matière de sûreté de fonctionnement de ses équipements. Ces défis, causés par diverses défaillances, sont motivés par des impératifs de production. Il ne s'agit plus seulement de vendre un produit, mais de garantir un taux de disponibilité.

Pour répondre à ces attentes, les politiques de conception et de maintenance doivent évoluer. Auparavant, la maintenance était principalement corrective pour les applications standards et préventives pour les applications critiques. Désormais, il est essentiel d'adopter une approche prédictive, qui permet d'optimiser les coûts liés à l'immobilisation et au remplacement des pièces.

Pour ce faire, différentes techniques de surveillance et de diagnostic des défaillances sont utilisées, toutes non destructives et non intrusives. Ce chapitre sera consacré à la présentation de quelques techniques du diagnostic des défauts dans les machines électriques et plus précisément du défaut d'excentricité.

II.1. Diagnostic et surveillance des machines électriques

II.1.1. Définition

La surveillance et/ou le diagnostic d'un équipement de machine est assuré en relevant périodiquement la valeur d'un indicateur d'état de dégradation ou de performance. Il existe différentes techniques d'analyse tels que:

- L'analyse de la signature du courant,
- L'analyse d'huile,
- L'analyse du flux axial et/ou radial,
- L'analyse des vibrations,

- L'analyse de température,
- etc.

Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter. On peut établir une courbe d'évolution de l'indicateur choisi au cours du temps. Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts **[29]**. Aussi, le flux axial/radial est un bon indicateur du défaut d'excentricité dans les machines électriques.

II.1.2. Etapes

La procédure du diagnostic de défaillances et de dégradations susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel est résumée dans la figure ci-dessous **[30]**.

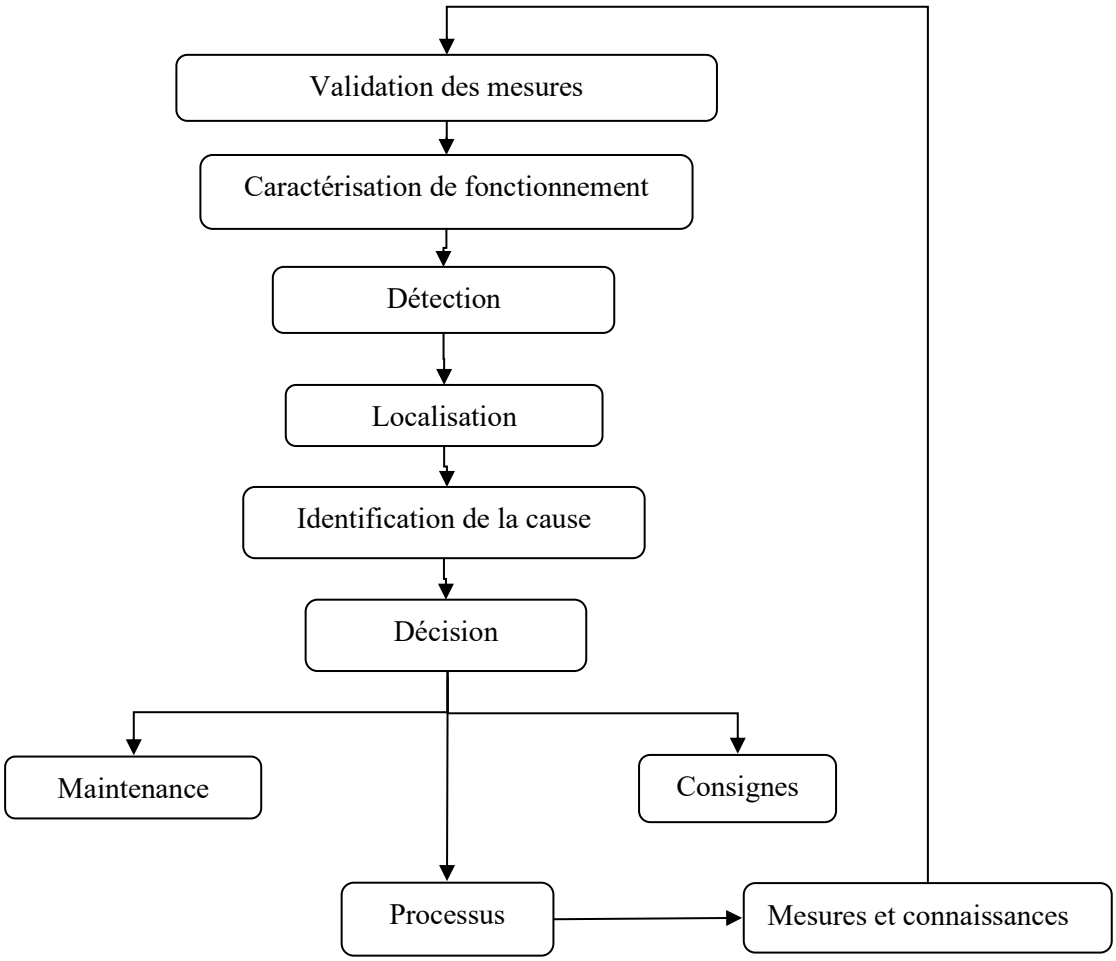


Figure II.1: Etapes du diagnostic industriel

En résumé, le diagnostic industriel s'articule autour des étapes suivantes :

- L'extraction des informations à partir de moyens de mesures appropriées ou d'observations réalisées lors des rondes par les personnels de surveillance,
- L'élaboration des caractéristiques et des signatures associées à des symptômes,
- La détection d'un dysfonctionnement,
- La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet,
- La prise de décision (arrêt de l'installation ou reconfiguration).

II.2. Contrôle non-destructif

II.2.1. Définition

Le Contrôle Non Destructif (CND) consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant de juger « sans destruction » l'état de santé des installations et des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction pour laquelle elles sont destinées **[31]**.

Le principe général d'un CND est présenté dans la figure ci-dessous. La cible à analyser se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité.

La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape d'inversion, plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce considérée **[32].**

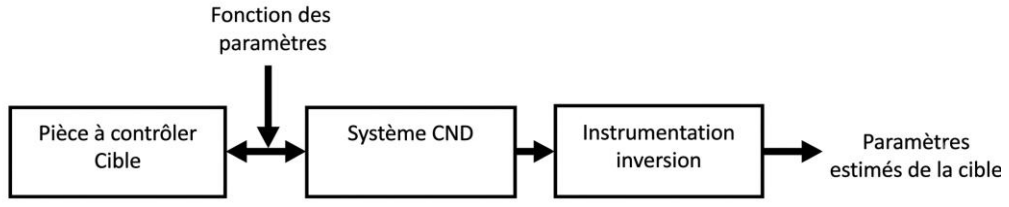


Figure II.2: Synoptique schématisé du contrôle non destructif

Le CND a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce et la caractérisation des défauts.

Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux ces critères : rapidité d'exécution, coût, reproductibilité, fiabilité, sensibilité et résolution **[33].**

II.2.2. Méthodes du CND

L'opération de contrôle non destructif va au-delà de la simple détection de défauts. Même si le procédé, la méthode et le matériel ont été choisis à l'avance, une procédure complète est nécessaire pour atteindre ces objectifs: fiabilité de l'examen, reproductibilité, localisation des défauts, identification et caractérisation (notamment par leur taille), classement, présentation visuelle, décision sur l'affectation de la pièce, et archivage des résultats et conditions d'examen.

Parmi les méthodes du CND, on peut citer : le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, le CND par courants de Foucault, l'analyse par thermographie infrarouge, l'analyse vibratoire, l'analyse du flux magnétiques ainsi que d'autres méthodes **[31]**.

II.2.2.1. Ressuage

Cette méthode consiste à appliquer un liquide d'imprégnation coloré ou fluorescent sur la surface de la pièce, préalablement nettoyée et séchée. Par capillarité, le liquide pénètre dans les ouvertures des défauts. Après un temps suffisant pour la pénétration, l'excès de liquide en surface est éliminé par lavage. Un révélateur est ensuite appliqué: il attire le liquide retenu dans les défauts, renforçant leur indication visible. L'observation se fait généralement à l'œil nu.

Cette technique s'applique à tous les matériaux non poreux et ne détecte que les défauts débouchant en surface. La figure II.3 illustre le principe du ressuage par liquide pénétrant, qui se résume comme suit:

- Application et pénétration du pénétrant dans les fissures,
- Nettoyage de l'excès de pénétrant,
- Application du révélateur,
- Le révélateur extrait le pénétrant retenu dans les fissures.

L'efficacité du contrôle repose sur la détection précise des discontinuités. Pour améliorer la détectabilité, le pénétrant contient un colorant visible à la lumière blanche ou un produit fluorescent visible sous lumière noire (ultraviolet) **[34]**.

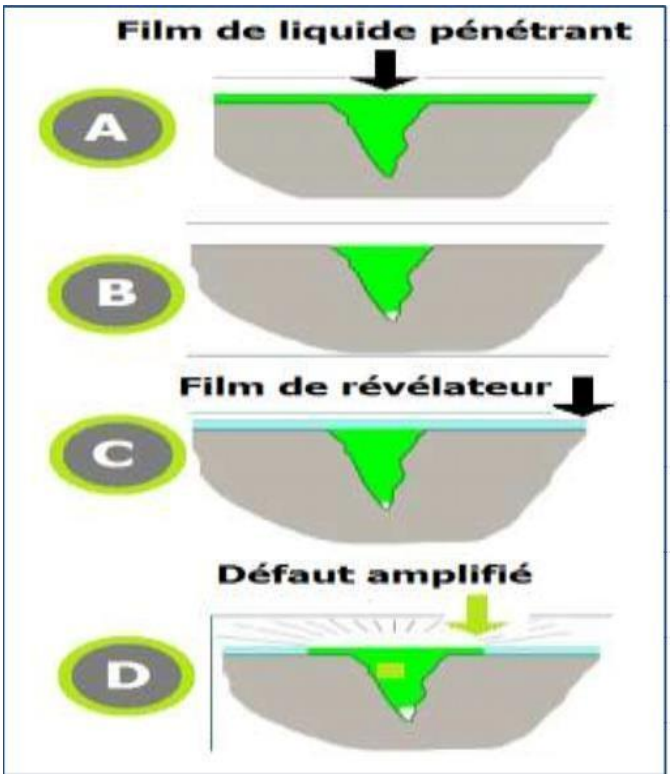


Figure II.3: Etapes du ressuage

II.2.2.2. Magnétoscopie

Cette méthode ne s'applique qu'aux matériaux ferromagnétiques et permet de détecter les défauts débouchant en surface ou proches de la surface. Elle complète idéalement l'examen visuel ou le ressuage lorsque celui-ci est insuffisant. Le principe repose sur la création d'un flux magnétique intense à la surface du matériau (figure II.4). Les défauts perturbent ce flux, ce qui permet leur localisation.

On y recourt souvent en complément du ressuage pour une détection plus complète **[31]**.



Figure II.4: Contrôle par magnétoscopie

II.2.2.3. Radiographie

La radiographie industrielle est un contrôle non destructif qui consiste à traverser le composant à contrôler avec un faisceau de rayonnement électromagnétique ionisant (rayons gamma ou X) **[30]**. La figure ci-dessous présente le principe de base de cette technique.



Figure II.5: Détection des défauts par radiographie

II.2.2.4. CND par courants de Foucault

Cette méthode de CND consiste à placer la zone à examiner dans un champ électromagnétique, puis à détecter en surface les perturbations causées par un objet ou un défaut. Le système comprend une source électromagnétique, un capteur et un organe de traitement des données, qui caractérise l'anomalie détectée.

En présence d'une anomalie dans la pièce contrôlée, les courants de Foucault induits sont perturbés. Cela modifie l'impédance apparente du capteur, en fonction de la nature et du volume de l'anomalie (figure II.6) **[31]**.

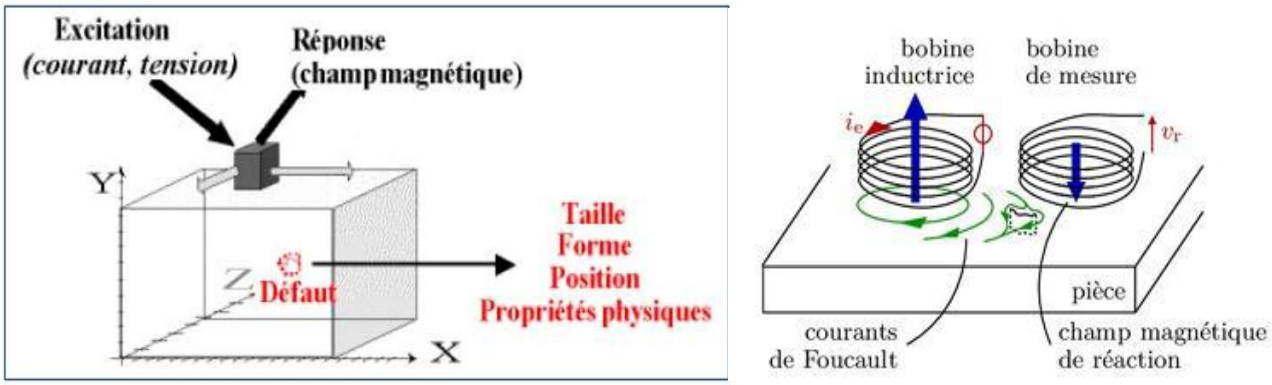


Figure II.6: Principe du CND par les courants de Foucault

II.2.2.5. Analyse par thermographie infrarouge

Dans le secteur industriel, son but est souvent la maintenance prédictive. Il s'agit de prévoir, lors d'un diagnostic de contrôle, quels pourraient être les problèmes issus des défauts d'équipements invisibles à l'œil nu. Le principe est d'identifier les éléments défectueux des installations électriques, électromécaniques, hydrauliques, frigorifiques, …, avant que n'apparaissent les pannes, accidents ou incendies **[35]**.

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques: ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran (voir figures II.7 et II.8). L'image ainsi obtenue s'appelle «Thermogramme» **[32].**



Figure II.7: Thermographie infrarouge d'un équipement électrique

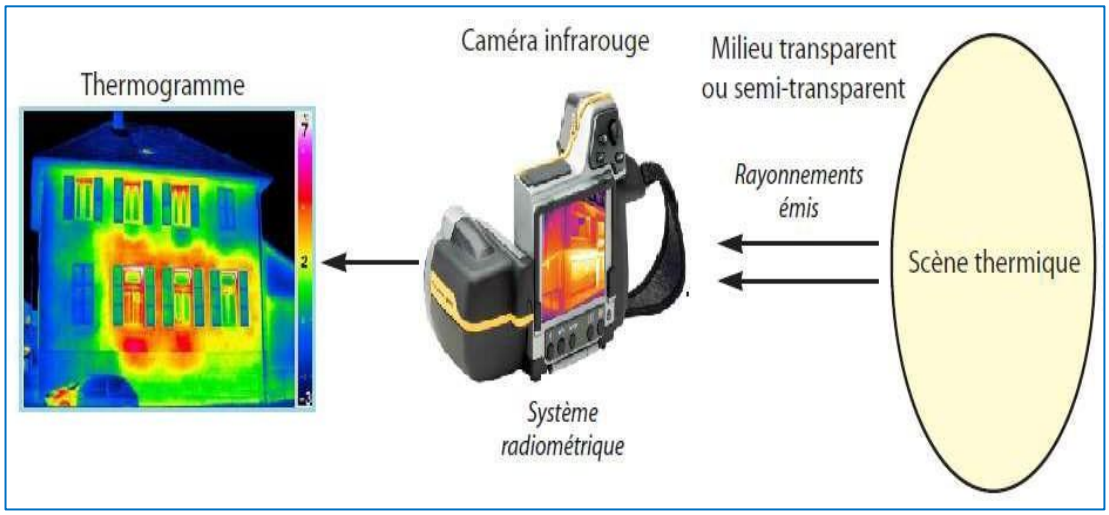


Figure II.8: Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge

La thermographie par infrarouge présente plusieurs avantages tels que : la mesure sans contact (l'opérateur n'est pas exposé au danger), le gain du temps (ne nécessite pas d'arrêt de production et n'affecte pas l'activité de l'objet contrôlé), la comparaison entre 2 ou plusieurs milliers de points est possible sur la même image, la mesure en temps réel, les échauffements signes de défaillances annoncées sont visibles au plus tôt. Par contre, elle présente aussi des inconvénients qui sont : nécessité du matériel spécifique et onéreux, risques d'erreurs, nécessité d'un opérateur compétant et formé **[36]**.

II.2.2.6. Analyse vibratoire

La technique d'analyse vibratoire est élaborée par une coordination d'ingénieurs en mécanique et en électricité, puisque la plupart des défauts électriques ou électromagnétiques ont des réactions mécaniques (couple, vitesse, ...). L'analyse des vibrations est une méthode très utilisée pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Récemment, les chercheurs se sont orientés vers l'utilisation de cette technique dans le domaine du CND. Elle permet une analyse détaillée et elle donne une vue sur la quasi-totalité des défauts mécaniques et/ou électriques.

Cette méthode consiste à l'utilisation de capteurs spécifiques (accéléromètre, vélocimètre, Proxi-mètre dans des lieux judicieux sur la machine à analyser (figure II.9). Ces capteurs transforment les vibrations émises par la machine en signal électrique. L'étude de ce signal permet de définir les défauts régissant la machine. L'analyse temporelle et/ou fréquentielle permet une bonne étude du signal récupéré et nous informe sur le défaut d'une manière très précise **[37].**



Figure II.9: Mesure et analyse vibratoire d'un moteur électrique

L'analyse vibratoire est très utilisée, actuellement, car elle est très bien adaptée aux composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

Cette technique poursuit deux objectifs : La détection des défauts et Leur analyse détaillée. On utilise à cet effet des paramètres calculés Soit dans le domaine temporel soit Dans le domaine fréquentiel ou Dans les deux à la fois **[38]**.

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillisse, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent.

Les arbres se désalignent, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée. C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser, lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement **[39]**.

II.2.2.7. Analyse du flux

A. Principe

L'analyse du flux magnétique dans l'entrefer constitue une méthode efficace pour le diagnostic des défauts des machines électriques, tels que l'excentricité ou les courts-circuits rotoriques. En comparant les signaux mesurés à une base de données de référence, il est possible d'identifier la présence du défaut et de localiser sa position avec une bonne précision. Cette localisation est obtenue à partir de la connaissance de la position des capteurs de flux et de la vitesse de rotation du rotor.

L'identification des défauts (dans ce cas défaut d'excentricité) dans la machine repose sur une approche par problème inverse, dont l'objectif est de déterminer les causes physiques (degré et type d'excentricité) à partir des grandeurs mesurées (flux magnétique). Contrairement à l'approche directe, qui consiste à calculer les effets à partir des causes.

Le principe de cette technique consiste à exploiter les mesures du champ/flux magnétique. Toute répartition anormale de cette grandeur physiques peut alors être interprétée comme la signature d'un défaut. Cette approche offre ainsi la possibilité non seulement de détecter les défauts, mais également de les localiser et d'en évaluer l'importance.

Cependant, cette approche présente plusieurs limitations. Les capteurs doivent être installés

à l'intérieur de la machine, ce qui engendre des contraintes liées à l'espace disponible, au coût d'instrumentation et à la maintenance. En cas de défaillance d'un capteur, son remplacement nécessite généralement le démontage de la machine, rendant la procédure complexe.

Par ailleurs, la sensibilité du flux dans l'entrefer dépend du type de machine étudiée. Son analyse est généralement plus adaptée aux machines présentant un faible entrefer, tandis qu'elle devient plus difficile pour les machines à entrefer important. De plus, les variations de charge influencent fortement le flux magnétique, ce qui peut compliquer l'interprétation des résultats.

Ainsi, bien que l'analyse du flux dans l'entrefer fournisse des informations pertinentes pour le diagnostic des défauts, son caractère intrusif limite son utilisation industrielle. Pour cette raison, les recherches actuelles privilégient souvent des méthodes de surveillance non invasives.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de disposer d'un réseau de capteurs de champ magnétique placés autour de la machine, capable d'effectuer des mesures précises sur une large gamme de fréquences. Les progrès récents réalisés dans le domaine des capteurs magnétiques et des systèmes d'acquisition rendent cette méthode de plus en plus envisageable pour les applications de surveillance et de diagnostic des machines électriques **[40]**.

B. Types de capteurs utilisés

Les principaux capteurs d'analyse de flux magnétique utilisés pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques sont : les capteurs à effet Hall, les capteurs de type bobiné et les capteurs magnéto-résistif.

B.1. Capteur à Effet Hall

Un capteur de Hall est un capteur de champ magnétique B qui consiste en un barreau de semi-conducteur alimenté par un courant I (voir figure ci-dessous). Sous l'effet du champ à mesurer divers phénomènes entrent en jeu (force de Lorentz, champ de Hall consécutif, …) et il apparait entre les faces supérieure et inférieure du barreau une tension V_H proportionnelle à B qui constitue le signal de sortie **[41].**

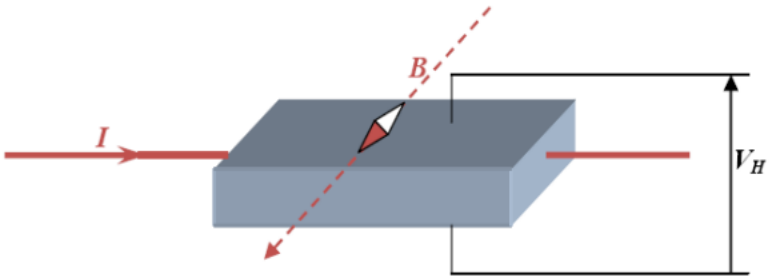


Figure II.10: Schéma de principe d'un capteur à effet Hall

Parmi les avantages de ce type de capteurs, on peut citer **[42]** :

- ✓ Mesure directe du champ magnétique,
- ✓ Non invasive,
- ✓ Miniaturisable,
- ✓ Fonctionnement sans contact.

Les contraintes que présente ce capteur sont **[43]** :

- ✓ Sensibilité limitée aux champs faibles,
- ✓ Nécessite électronique d'amplification.

B.2. Capteur Fluxgate (à grille de flux)

Ce type de capteurs est constitué d'un noyau en fer doux avec deux bobines (entraînement + détection), tel qu'il est montré dans la figure ci-dessous. C'est un dispositif de haute précision utilisé pour mesurer l'intensité et la direction des champs magnétiques. Contrairement aux capteurs à effet Hall, il exploite la saturation périodique du noyau ferromagnétique pour offrir une sensibilité exceptionnelle, particulièrement pour les champs faibles **[44]**.

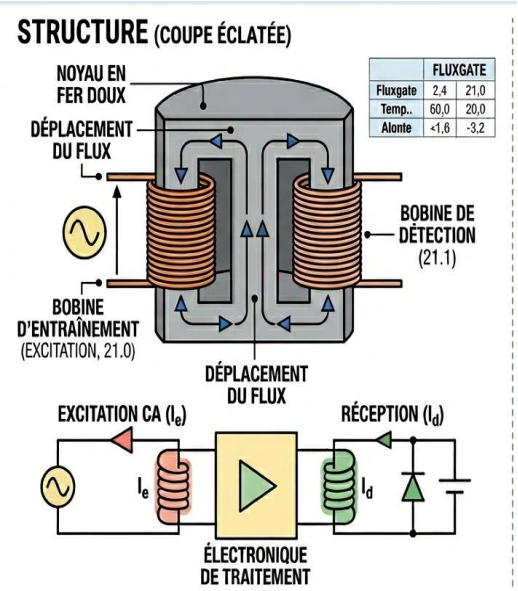


Figure II.11: Schéma de principe d'un capteur Fluxgate

Ce type de capteurs présente quelques avantages parmi lesquels on peut citer :

- ✓ Grande sensibilité (champs très faibles),
- ✓ Mesures multi-axes,
- ✓ Robuste,
- ✓ Faible consommation.

Pour les contraintes ou les limitations de ce capteur, on a :

- ✓ Taille grande,
- ✓ Bande passante limitée,
- ✓ Perturbe le champ mesuré.

B.3. Capteur magnéto-résistif

Une magnétorésistance ou capteur magnéto-résistif est un dipôle électrique passif dont la résistance R varie en fonction du champ B dans lequel elle est plongée. La mise en œuvre du capteur pour mesurer B à partir de R repose sur la loi d'Ohm**.** Le Schéma de principe de ce type de capteurs est donné dans la figure ci-dessous.

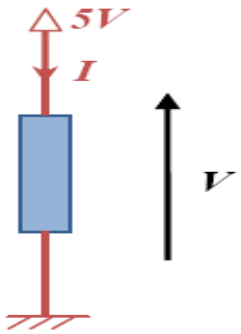


Figure II.12: Schéma de principe d'un capteur magnéto-résistif

Parmi les avantages que présente ce type de capteurs, on peut citer **[45] :**

- ✓ Hautement miniaturisable,
- ✓ Indépendant de la taille de l'élément sensible,
- ✓ Fortes magnétorésistances en submicronique,
- ✓ Mesure 2D possible avec jonction tunnel unique.

Malgré les inconvénients ou limitations cités ci-dessus, la technique d'analyse du flux est très efficace pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité. Ceci nous a amené à choisir cette technique pour réaliser notre étude.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du principe et des étapes du diagnostic et du CND des défauts dans les machines électriques. De plus, un aperçu a été donné sur les différentes techniques du contrôle non destructif utilisées dans le domaine de l'électrotechnique tout en mettant l'accent sur celles utilisés pour la caractérisation des défauts dans les machines électriques.

Dans cette étude, on a choisi d'utiliser la technique d'analyse du flux magnétique qui est très efficace pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans les machines à induction.

Chapitre III

Approches mathématiques pour la modélisation et le CND par analyse du flux des défauts de la machine à induction

Chapitre III

Approches mathématiques pour la modélisation et le CND par analyse du flux des défauts de la machine à induction

Introduction

La modélisation des machines asynchrones est essentielle pour analyser leur comportement électromagnétique, notamment à travers l'étude du flux magnétique.

Dans ce chapitre, on va présenter le principe de la caractérisation des défauts par analyse de flux ainsi que les méthodes de mesure du flux de fuite (axial et radial). De plus, on va exposer les équations de Maxwell utilisées pour établir la formulation magnétodynamique et déterminer la distribution du flux dans la machine. Par la suite, on va aborder les méthodes de résolution, en particulier la méthode des éléments finis.

Enfin, l'approche du contrôle non destructif (CND) des défauts, notamment le cas du défaut d'excentricité, en se basant sur l'intégration de l'algorithme génétique, va être abordé.

III.1. Principe général du CND des défauts des machines électriques par analyse du flux magnétique

Il existe plusieurs méthodes pour diagnostiquer les pannes des machines électriques, notamment la caractérisation des défauts par analyse de flux magnétique qui est une technique non invasive qui repose sur la mesure et l'analyse spectrale des perturbations du flux de fuite (axial ou radial), révélant des asymétries dues à des défauts statoriques ou rotoriques **[46]**.

III.1.1. Modélisation: Calcul du flux magnétique

En se basant sur des outils et des formulations mathématiques adéquats, on peut déterminer la distribution du flux magnétique qui régit le fonctionnement de la machine. Lors du fonctionnement idéal, le flux magnétique est symétrique et radial.

Un défaut, par exemple, de cassure de barres rotoriques, d'excentricité ou de court-circuit statorique, crée un déséquilibre générant un flux de fuite axial ou radial mesurable par bobines ou

capteurs à effet Hall placés à l'extérieur de la machine **[46]**.

III.1.2. Mesure du flux magnétique

III.1.2.1. Flux axial de fuite

Le flux axial de fuite est généralement mesuré au niveau de la tête de bobine ou de l'extrémité de l'arbre/culasse, à l'aide d'une bobine enroulée autour de la carcasse ou de la tête de bobines, ou d'un capteur à effet Hall positionné à l'extrémité axiale de la machine.

Le spectre du signal axial est dominé par des basses fréquences et par les harmoniques de la fréquence d'alimentation dues aux asymétries **[47]**.

III.1.2.2. Flux radial de fuite

Le flux radial de fuite est mesuré sur la carcasse latérale via une bobine ou un capteur magnétique à mi-hauteur de l'entrefer. Positionnée à égale distance des culasses et orientée pour minimiser le flux axial, cette bobine offre une représentation fidèle du champ radial d'entrefer. Cela permet d'observer la modulation due aux défauts rotoriques et de compléter les données du flux axial **[47]**.

III.1.3. Analyse et diagnostic

Le signal mesuré/calculé du flux est traité, en utilisant les techniques du traitement de signal, pour extraire les amplitudes des harmoniques liées au défaut et à sa gravité. Une comparaison avec le spectre de la machine saine permet la localisation et l'identification du défaut.

L'analyse spectrale (FFT) du signal du flux identifie les harmoniques caractéristiques du défaut. Par exemple, dans une machine asynchrone : l'harmonique de fréquence (1-2g)f caractérise le défaut de l'excentricité statique et celui de fréquence 2gf caractérise les défauts rotoriques. Avec g c'est le glissement et f c'est la fréquence d'alimentation **[48,49].**

III.2. Calcul du flux magnétique dans les machines électrique

III.2.1. Calcul du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique dans une machine électrique est calculé à partir de la résolution de la formulation électromagnétique adéquate (magnétodynamique) qui est formulée à partir des équations de Maxwell.

III.2.1.1. Equations de Maxwell

Ces équations, connues aussi sous le nom d'équations générales de l'électromagnétisme, se comptent par quatre. Elles décrivent la plupart des phénomènes électromagnétiques et fournissent un cadre mathématique rigoureux au concept de champ, introduit en physique par Faraday dans les années 1830. Elles montrent en particulier que, en régime stationnaire, les champs électrique et magnétique sont indépendants l'un de l'autre, contrairement au régime variable où ils sont couplés. Dans le cas le plus général, il faut donc raisonner en termes de champ électromagnétique unifié: la distinction entre électrique et magnétique n'est qu'une simplification artificielle **[50]**.

Les phénomènes électromagnétiques sont décrits par les quatre équations aux dérivées partielles de Maxwell. Ces équations s'écrivent généralement comme suit:

$\text{div}\ \vec{D} = \rho$ (Equation de Maxwell-Gauss) (III.1)

$\overrightarrow{rot}\ \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (Equation de Maxwell-Ampère) (III.2)

$\overrightarrow{rot}\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (Equation de Maxwell-Faraday) (III.3)

$\text{div}\ \vec{B} = 0$ (Equation de conservation du flux) (III.4)

Avec :

$\vec{E}$: Champ électrique [V/m],

$\vec{B}$: Induction magnétique [T],

$\vec{H}$: Champ magnétique [A/m],

$\vec{J}$: Densité de courant [A/m^2],

$\vec{D}$: Induction électrique [C/m^2],

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m^3],

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement [A/m^2].

III.2.1.2. Formulations électromagnétiques

La résolution d'un problème électromagnétique requiert l'élaboration d'une formulation adaptée aux propriétés électriques et magnétiques du domaine d'étude.

Une formulation électromagnétique décrit mathématiquement le comportement et les interactions des champs électriques et magnétiques avec la matière, en s'appuyant sur les équations

de Maxwell et les lois de comportement des matériaux. Cela permet de réduire le nombre d'inconnues et d'équations à résoudre.

Ces formulations modélisent le fonctionnement de tout système électromagnétique (machines électriques, transformateurs, capteurs, etc.). Elles s'expriment en termes de potentiel vecteur magnétique, de champ électrique ou magnétique, ou encore sous forme scalaire, selon le contexte. Elles simplifient ainsi le couplage entre effets magnétiques et électriques. Il s'agit de modèles électrostatiques, magnétostatiques ou magnétodynamiques **[51].** Ce dernier est le plus adapté à notre étude.

❖ Formulation magnétodynamique

La magnétodynamique correspond à l'étude des phénomènes électromagnétiques en régime dynamique, en négligeant les courants de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$, conformément aux hypothèses classiques de l'électrotechnique. Autrement dit, les champs magnétiques y sont variables, soit en raison de la variation des courants d'excitation, soit à cause du mouvement de certaines parties de la structure.

L'objectif principal est de déterminer, à chaque instant après le temps initial, la distribution du champ magnétique ainsi que la densité de courant $\vec{J}$ dans le domaine conducteur, en tenant compte des courants induits résultant d'une excitation variable dans le temps.

En électrotechnique les fréquences usuelles sont inférieures aux radiofréquences ($f<10^{12}$ Hz). D'où la négligence dans un milieu conducteur des courants de déplacement ($\overrightarrow{J_d} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) devant les courants de conduction($\overrightarrow{J_C} = \sigma \vec{E}$). Une autre simplification consiste à négliger la charge d'espace dans les matériaux conducteurs ($\rho = 0$).

Réécrivons les équations de Maxwell qui s'expriment en magnétodynamique, en négligeant les courants de déplacement et les charges d'espace, comme suit **[52]:**

$$\overrightarrow{Rot}\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{(III.5)}$$

$$\overrightarrow{Rot}\ \vec{H} = \vec{j} \quad \text{(III.6)}$$

$$Div\ \vec{B} = 0 \quad \text{(III.7)}$$

Avec :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v} \wedge \vec{B}) + \vec{J}_{ex} \quad \text{(III.8)}$$

Les sources du champ sont les densités de courant imposées $\vec{J}_{ex}$ (et/ou les aimants permanents

caractérisés par leur induction rémanente B_r). σ et v sont la conductivité du milieu et sa vitesse, respectivement.

Il existe plusieurs formulations développées pour modéliser la magnétodynamique. Les principales formulations que l'on rencontre sont les suivantes : les formulations en *E*, en *A*, en *A-V*, en *H* et en *T-Ø*.

Dans notre travail, on va utiliser la formulation en *A* puisqu'elle est la plus générale et la plus simple pour résoudre ces types de problèmes. Le potentiel vecteur $\vec{A}$, qui est une grandeur mathématique, joue un rôle primordial puisque sa connaissance implique la connaissance des autres grandeurs. Ci-dessous, nous donnons une description comment aboutir à la formulation en *A*.

En utilisant l'équation (III.7) qui exprime la divergence de l'induction magnétique $\vec{B}$ comme nulle, et sachant que la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut établir, en tout point de l'espace, une relation entre l'induction magnétique et le rotationnel d'une grandeur vectorielle $\vec{A}$ [T.m]. Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$\vec{B} = \overrightarrow{Rot}\,\vec{A} \tag{III.9}$$

À ces équations nous devons ajouter la loi caractéristique des milieux donnée par l'expression ci-dessous :

$$\vec{B} = \mu\,\vec{H} \tag{III.10}$$

Où :

$\mu = \mu_0.\mu_r$: Perméabilité magnétique absolue [H/m],

μ_0: Perméabilité magnétique du vide [H/m],

μ_r : Perméabilité magnétique relative au milieu.

La substitution de (III.9) dans (III.5) donne :

$$\overrightarrow{Rot}(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0 \tag{III.11}$$

Ceci implique que $\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ est un champ conservation qui drive donc d'un potentiel scalaire électrique *V* tel que :

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\overrightarrow{Grad}V \tag{III.12}$$

Donc :

$$\vec{E} = -(\overrightarrow{Grad}V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \tag{III.13}$$

A partir des équations (III.10) et (III.6) nous avons :

$$\overrightarrow{Rot}\left(\frac{1}{\mu}\vec{B}\right) = \vec{J} \tag{III.14}$$

Et à partir des équations (III.8), (III.9), (III.13) et (III.14) nous avons :

$$\overrightarrow{Rot}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{Rot}\vec{A}\right) + \sigma\,\overrightarrow{Grad}\,V + \sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} - \sigma(\vec{v}\wedge\vec{B}) = \overrightarrow{J_{ex}} \tag{III.15}$$

Les termes $\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}$ et $-\sigma(\vec{v}\wedge\vec{B})$ représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques. Dans le cas où les courants induits par mouvement sont nuls et le $\overrightarrow{Grad}\ V$ est nul aussi (Attaque courant), l'équation précédente devient :

$$\overrightarrow{Rot}\left(\frac{1}{\mu}\overrightarrow{Rot}\,\vec{A}\right) + \sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} = \overrightarrow{J_{ex}} \tag{III.16}$$

Selon la géométrie du dispositif à étudier, la résolution peut être effectuée soit en coordonnées cartésiennes, soit en coordonnées cylindriques. Dans ce travail, on va effectuer une étude en 2D en utilisant les coordonnées cartésiennes.

La résolution du problème en deux dimensions (2D) et la formulation de l'équation électromagnétique, basée sur le potentiel vecteur $\vec{A}$, en coordonnées cartésiennes offrent plusieurs avantages. Dans cette configuration, le potentiel vecteur $\vec{A}$ ne possède qu'une seule composante non nulle, dans la direction O_z. De plus, cette composante dépend uniquement des coordonnées x et y, ce qui simplifie l'analyse et réduit le temps de calcul **[53].** Donc, on peut écrire :

$$\overrightarrow{J_{ex}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ j_z\,(x,y) \end{pmatrix}, \qquad \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z\,(x,y) \end{pmatrix}, \qquad \vec{B} = \begin{pmatrix} B_x\,(x,y) \\ B_y\,(x,y) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{III.17}$$

A fréquence industrielle, l'unicité du potentiel vecteur magnétique est assurée par la Jauge de Coulomb, donnée par l'équation ci-dessous. Elle est naturellement vérifiée en 2D.

$$div\vec{A} = 0 \tag{III.18}$$

Lors de la résolution de la formulation ci-dessus (équation de diffusion électromagnétique), les conditions de passage entre deux milieux différents doivent être respectées **[54].** Plusieurs méthodes existent pour la résolution de ce type de problèmes. Ci-dessous on va donner un aperçu sur ces méthodes.

III.2.1.3. Méthodes de résolution

Les méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles peuvent être classées en trois grandes catégories qui sont:

- Méthodes analytiques,
- Méthodes semi-analytiques,
- Méthodes numériques.

Les méthodes analytiques deviennent rapidement difficiles à appliquer lorsque la géométrie du problème est complexe ou lorsque les matériaux présentent des comportements non linéaires. Dans ce contexte, l'évolution des moyens de calcul a favorisé l'utilisation des méthodes numériques. Ces dernières reposent sur la discrétisation du domaine d'étude, en transformant les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. La résolution de ce système permet d'obtenir une approximation de la solution aux différents points du domaine, appelés nœuds du maillage **[55].**

A) Méthodes analytiques

Les méthodes analytiques permettent d'obtenir des solutions exactes et précises. Toutefois, leur détermination reste souvent difficile, voire impossible, en raison de la complexité des problèmes étudiés. Elles sont particulièrement adaptées à l'analyse des phénomènes dynamiques ainsi qu'à l'étude des effets de peau dans les conducteurs.

Ces méthodes présentent également plusieurs avantages, notamment en termes de coût de calcul réduit, de faible consommation de mémoire et de simplicité d'exploitation. Cependant, leur domaine d'application reste limité, ce qui conduit souvent à les associer à des méthodes numériques afin de tirer profit des avantages des deux approches.

Parmi les principales méthodes analytiques utilisées pour la résolution des équations aux dérivées partielles, on peut citer la méthode de séparation des variables (MSV) ainsi que la méthode intégrale (MI) **[56].**

B) Méthodes semi-analytiques

Parmi les méthodes semi-analytiques, on distingue notamment la méthode des intégrales de frontières ainsi que la méthode des circuits couplés (MCC) **[57]**.

La méthode des circuits couplés permet d'obtenir la solution d'une équation aux dérivées

partielles à travers une formulation inspirée de la loi de Biot et Savart, tout en étant associée à une technique numérique de discrétisation.

En revanche, la méthode des intégrales de frontières repose sur la discrétisation des limites du domaine d'étude, en s'appuyant sur le théorème de Green. Toutefois, son utilisation reste limitée aux systèmes linéaires.

C) Méthodes numériques

D'autres méthodes numériques peuvent également être utilisées dans la modélisation de la machine asynchrone. Parmi celles-ci, on peut **citer :** la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF).

La MDF, consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse, permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, on applique le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égal au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

La MVF se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud de maillage (celui des différences finis).

La méthode des éléments finis, qui est une approche largement utilisée, consiste à décrire le comportement du dispositif à étudier à l'aide d'un système d'équations différentielles sous forme matricielle. Plus de détails sur cette méthode vont être données ci-dessous.

En outre, des techniques numériques peuvent être employées pour la résolution des équations du modèle, telles que les méthodes itératives (Newton-Raphson, Gauss-Seidel…) ainsi que les solveurs numériques intégrés dans des environnements de calcul comme MATLAB (par exemple ode45) **[58,59].**

Ces différentes approches permettent d'obtenir des solutions numériques précises et efficaces. Toutefois, elles ne seront pas toutes détaillées dans ce travail, l'accent étant mis sur la méthode des éléments finis qui est celle choisie dans notre étude.

❑ Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis a d'abord été développée et appliquée en génie civil et en mécanique, avant de trouver sa place en électrotechnique dans les années 1970 **[60].**

Cette méthode sert à résoudre les équations aux dérivées partielles dans tous les domaines de l'ingénierie. Particulièrement puissante pour les équations aux dérivées partielles dans les géométries complexes, son principe repose sur la subdivision du domaine d'étude (une machine électrique, dans notre cas) en petites sous-régions appelées éléments finis. Ces éléments forment le maillage. Une fois la discrétisation effectuée, on résout localement les équations dans chaque élément. La forme de ces éléments dépend de la dimension du problème (2D ou 3D): on utilise couramment des triangles ou des quadrilatères.

La discrétisation est l'une des étapes de la méthode des éléments finis la plus importante, car la précision des résultats dépend de la manière de discrétiser le domaine d'étude et de la finesse du maillage **[61]**.

Comme indiqué précédemment, la MEF repose sur le maillage de l'espace en régions élémentaires où la grandeur inconnue est approximée par un polynôme. Ce maillage peut être formé de segments, de triangles ou de rectangles, aux sommets desquels on détermine les valeurs de l'inconnue. Cela suppose une variation linéaire de l'inconnue en fonction des coordonnées au sein de chaque élément.

En 2D, les éléments triangulaires du premier ordre sont les plus couramment employés. Pour améliorer la précision de la solution, on raffine le maillage. La figure ci-dessous illustre les éléments classiques utilisés en une et deux dimensions.

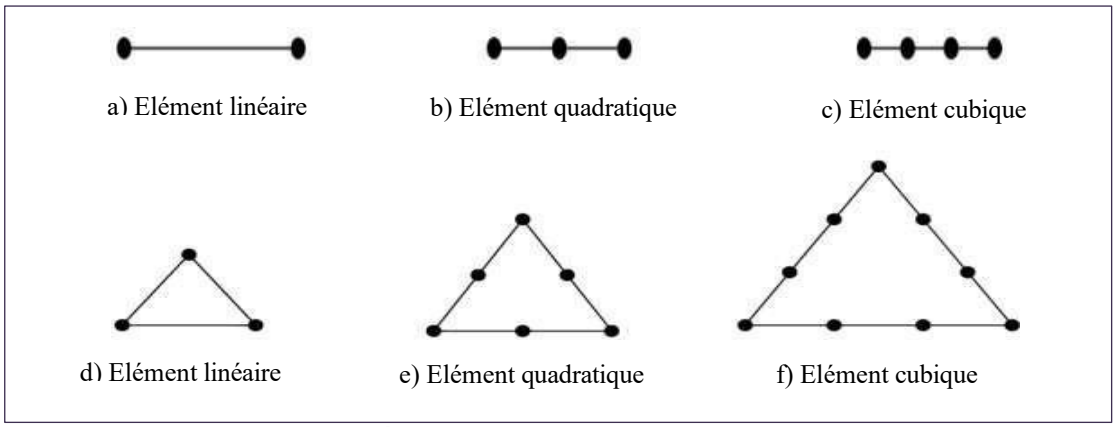


Figure III.1: Éléments classiques en une et deux dimensions

Selon le domaine à discrétiser, la taille des éléments de maillage peut varier, permettant une densification locale dans les zones où l'inconnue présente de fortes variations.

Le potentiel vecteur magnétique $\boldsymbol{A}$ dans un élément est approximé par des fonctions d'interpolation (appelées fonctions de forme), dont l'expression dépend du type d'élément. Ces fonctions garantissent la continuité du potentiel aux interfaces entre éléments. On utilise généralement des polynômes, comme indiqué ci-après.

Dans le domaine global composé de n_e éléments, le potentiel A **(x, y)** résulte de la somme des contributions A_e **(x, y)** de chaque élément du maillage. Ainsi, pour un élément triangulaire, on peut écrire:

$$A_e\,(x,y) = a+bx+cy = \sum_{i=1}^{3} \alpha_i\, A_i \tag{III.19}$$

$$A(x,y) = \sum_{e=1}^{ne} A_e\,(x,y) \tag{III.20}$$

Où a, b et c sont des constantes à déterminer et les α_i sont des fonctions d'interpolation, appelées aussi fonctions de formes. Ces fonctions ont les propriétés suivantes :

$$\alpha_i(x_i,y_j) = \begin{cases} 1 \dots si \dots i = j \\ 0 \dots si \dots i \neq j \end{cases} \tag{III.21}$$

$$\sum_{i=1}^{3} \alpha_i(x_i,y_j) = 1 \tag{III.22}$$

Pour un élément triangulaire de premier ordre on a :

$$\alpha_1 = \frac{1}{2s}[(x_2\,.y_3 - x_3.y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \tag{III.23}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2s}[(x_3.y_1 - x_1.y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \tag{III.24}$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2s}[(x_1.y_2 - x_2.y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \tag{III.25}$$

S qui est la surface de l'élément triangulaire s'exprime comme suit :

$$s = \frac{1}{2}[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \tag{III.26}$$

La formulation intégrale des équations différentielles par la méthode des éléments finis peut être obtenue en utilisant l'une des deux méthodes suivantes : la méthode variationnelle ou celle des résidus pondérés. Cette dernière est la plus utilisée **[57].**

Après formulation du problème en se basant sur la MEF, on va aboutir à un système matriciel élémentaire qui s'exprime comme suit:

$$[M]_e\,[A]_e = [J]_e \tag{III.27}$$

L'opération d'assemblage consiste à construire la matrice de rigidité magnétique globale $[M]$ et le vecteur source global $[J]$, à partir des matrices élémentaires $[M]_e$ et des vecteurs élémentaires $[J]_e$. On obtient ainsi le système matriciel à résoudre ci-dessous :

$$[M].[A]=[J] \tag{III.28}$$

Où [*A*] est un vecteur contenant les valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique qui sont les inconnues du problème à déterminer.

Lors de la résolution de ce système, on doit tenir compte des conditions aux limites correspondantes : conditions de type Dirichlet / de type Neumann **[62].**

III.2.1.4. Autres méthodes de résolution

En complément des méthodes précédemment présentées, d'autres approches peuvent être utilisées pour la modélisation et la résolution des problèmes électromagnétiques dans les machines asynchrones. Parmi celles-ci, on peut citer la méthode des réseaux de perméance, qui repose sur la représentation du circuit magnétique sous forme de tubes de flux équivalents, ainsi que la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés, basée sur les inductances entre le stator et le rotor **[63].**

Aussi, des approches basées sur l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones ou l'apprentissage automatique, peuvent être exploitées pour modéliser le comportement de la machine à partir de données expérimentales. Toutefois, ces méthodes restent complémentaires aux approches classiques **[64].**

III.2.2. Calcul de l'induction magnétique

L'induction magnétique *B* découle directement du champ magnétique *H*. Elle varie linéairement dans le cas linéaire tel que $B=\mu H$ ou tensoriellement pour les matériaux non linéaires. Elle est calculée après résolution de la formulation de diffusion électromagnétique.

Dans notre cas, après résolution du problème électromagnétique représenté par une formulation en potentiel vecteur magnétique *A,* l'induction magnétique est obtenue à partir de l'équation III.9. Plus de détails vont être données dans le chapitre IV.

En tenant compte des variations de l'entrefer dues à l'excentricité (statique ou dynamique), les perturbations axiales/radiales de l'induction vont être amplifiées. Ceci provoque/amplifie des harmoniques spécifiques comme celui de fréquence caractéristique $f(1-2g)$ dans le cas de l'excentricité statique. g c'est le glissement et f c'est la fréquence d'alimentation **[65]**.

III.2.3. Détermination du flux magnétique

Le flux magnétique Φ est obtenu à partir de l'induction magnétique *B*. Il est calculé en utilisant la formule ci-dessous :

$$\Phi=\iint B\cdot \mathrm{d}s \qquad \text{(III.29)}$$

Donc, le flux de fuite est obtenu par intégrale de B sur les surfaces s de mesure, situées sur la carcasse et/ou les têtes de bobines.

En utilisant les techniques du traitement de signal (FFT) pour extraire les signatures défectueuses, en cas d'excentricité, on trouve que le flux axial domine aux basses fréquences. **[65]**.

La figure ci-dessous résume les différentes étapes du code de calcul électromagnétique développé pour le calcul de l'induction et du flux magnétique dans une machine électrique.

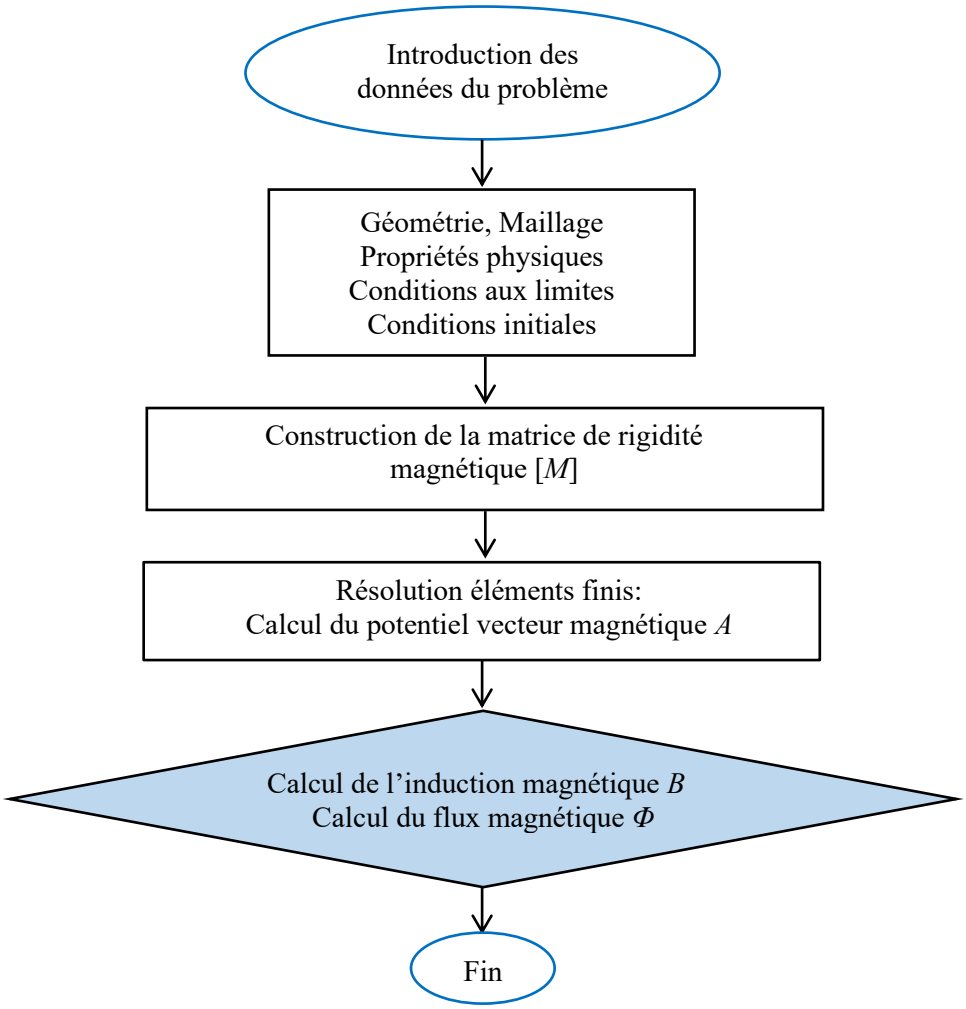


Figure III.2: Organigramme du code de calcul développé pour le calcul du flux magnétique

III.3. Diagnostic et CND des défauts d'une machine électrique

La comparaison des spectres du flux entre la machine saine et la machine défectueuse permet de mettre en évidence les modifications des composantes harmoniques. Dans le cas sain, le spectre est caractérisé principalement par la fréquence d'alimentation et ses harmoniques naturelles. En

présence d'un défaut d'excentricité, de nouvelles harmoniques apparaissent et l'amplitude de certaines composantes existantes se modifie, ce qui constitue un indicateur fiable pour le diagnostic de ce type de défaut **[49].**

Le CND, par analyse de flux, d'une machine électrique pour identifier et caractériser le défaut d'excentricité constitue un problème où l'on cherche à inverser les signatures mesurables de flux de fuite pour identifier la géométrie défectueuse de l'entrefer, sans accès direct à la zone défectueuse.

Le processus du CND par analyse du flux est résumé dans la figure ci-dessous.

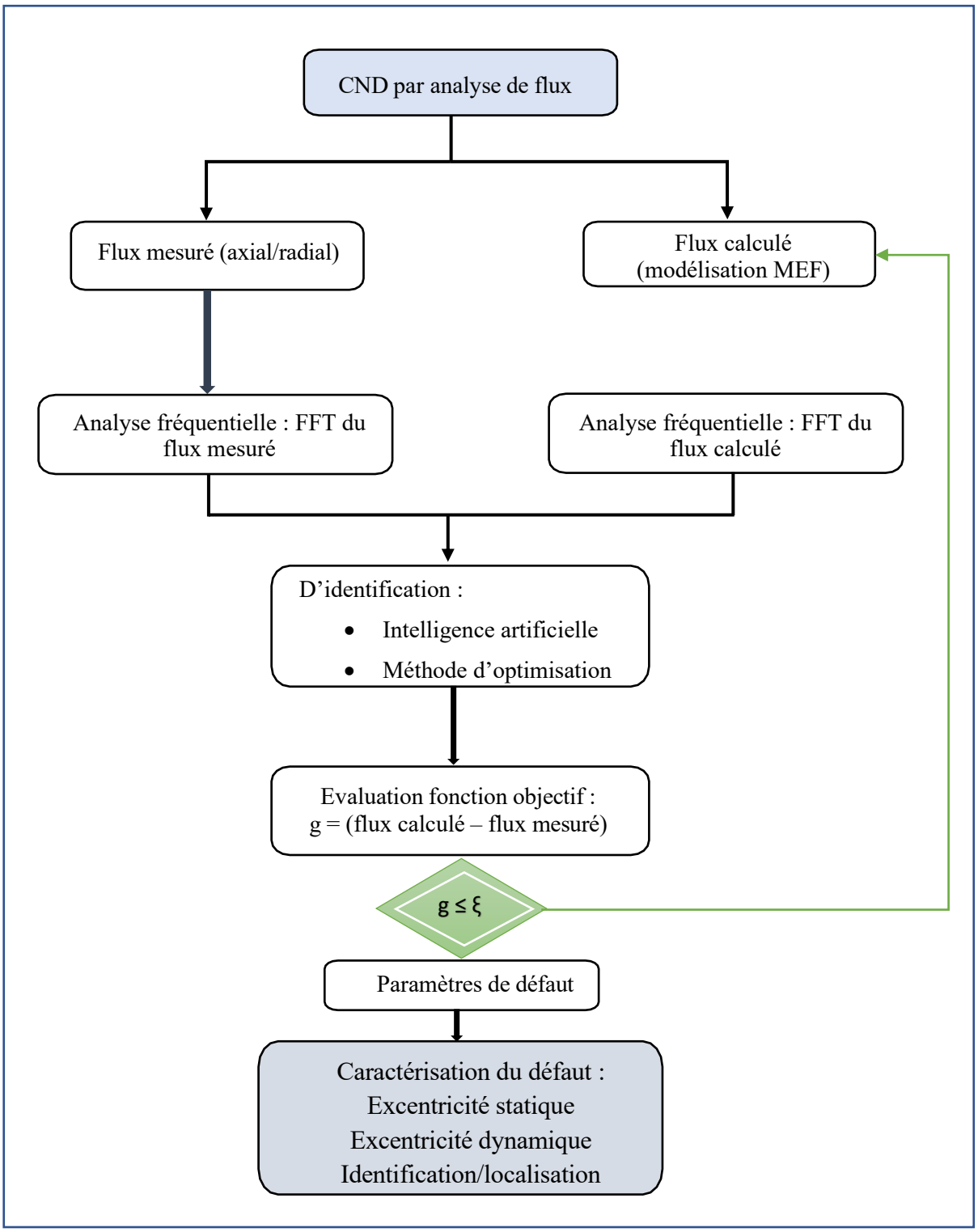


Figure III.3: Processus du CND par analyse du flux magnétique

III.3.1. Minimisation d'une fonction objective en se basant sur une méthode d'optimisation

La minimisation du flux calculé par rapport au flux mesuré consiste à comparer les résultats du modèle avec ceux obtenus expérimentalement afin d'identifier les paramètres d'excentricité de la machine. L'objectif est de trouver les valeurs qui rendent l'écart entre les deux flux aussi faibles

que possible, en définissant une fonction objectif g=‖Φcalculé−Φmesuré‖ généralement sous forme d'erreur quadratique.

Cette optimisation se fait à partir de la méthode des éléments finis, qui permet de calculer le flux de la machine, puis d'un algorithme génétique, qui explore plusieurs solutions possibles et garde les meilleures pour les améliorer par sélection, croisement et mutation. Au fil des itérations, la solution converge vers les paramètres du défaut, ce qui permet de localiser plus précisément une excentricité rotorique. Cette approche est bien adaptée aux problèmes complexes et non linéaires rencontrés dans le diagnostic des machines électriques **[66].**

Le calcul du flux magnétique peut être effectué soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. Dans cette étude on va travailler dans le domaine fréquentiel (formulation magnétodynamique en harmonique).

Dans un souci de caractériser les défauts de la machine à étudier, on peut utiliser soit l'intelligence artificielle (réseaux de neurones) soit une méthode d'optimisation. Dans ce travail de mémoire de fin d'études, on a choisi d'utiliser une des méthodes stochastiques qui est celle des algorithmes génétiques (AG). Cette dernière est facile à appliquer puisqu'elle est implémentée dans le logiciel MATLAB.

Un algorithme génétique fonctionne typiquement à travers un cycle simple de quatre espèces tel qu'il est montré dans la figure ci-dessous **[67].**

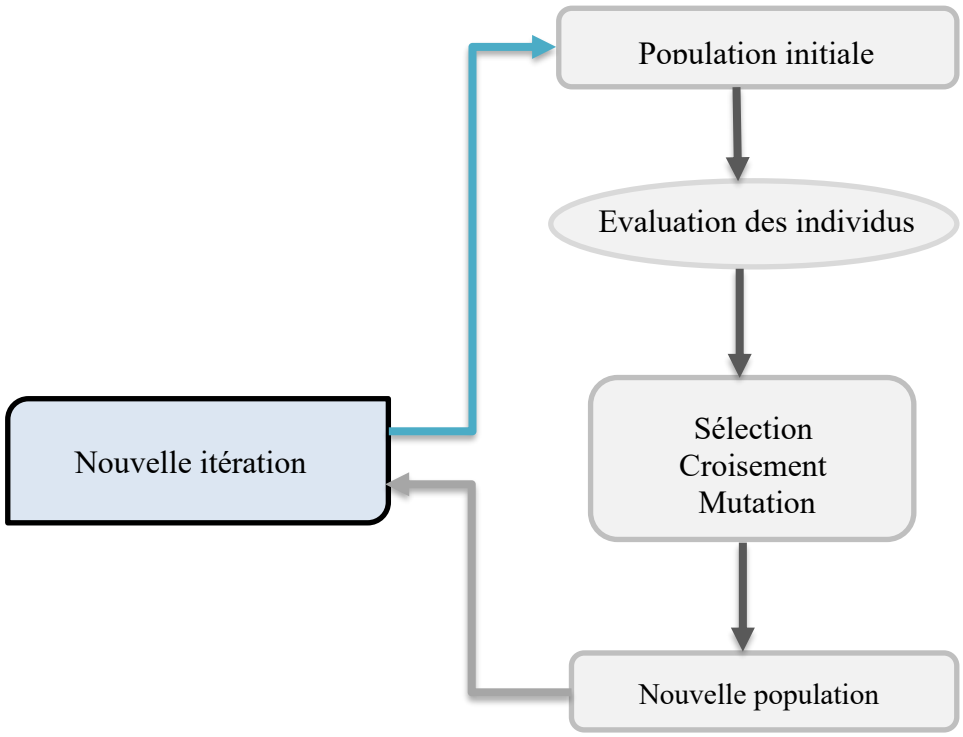


Figure III.4. Principe de base de l'algorithme génétique : Cycle génétique

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les approches mathématiques nécessaires pour la modélisation, le diagnostic et le CND de la machine asynchrone par analyse du flux magnétique.

Tout d'abord, nous avons donné un aperçu sur les équations de Maxwell et la formulation magnétodynamique choisie pour le calcul du champ électromagnétique et par la suite l'induction et le flux magnétique. Ensuite, nous avons présenté les différentes méthodes de résolution qui peuvent être utilisé pour résoudre ce problème. Nous avons décrit, plus précisément la méthode des éléments finis qui est celle utilisée dans notre étude.

Enfin, la procédure du CND pour l'identification et la caractérisation du défaut d'excentricité d'une machine électrique, en utilisant un algorithme génétique a été décrite.

Chapitre IV

Application des modèles développés pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine asynchrone

Chapitre IV

Application des modèles développés pour le diagnostic et la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine asynchrone

Introduction

Le défaut d'excentricité est l'un des défauts mécaniques les plus courants dans les machines asynchrones. Il apparaît lorsque l'axe de rotation du rotor ne coïncide plus avec celui du stator, entraînant une répartition non uniforme de l'entrefer. Cette anomalie modifie la distribution du champ magnétique dans la machine et affecte directement les grandeurs électromagnétiques, notamment le flux magnétique. Si ce défaut n'est pas détecté à temps, il peut provoquer une augmentation des contraintes mécaniques, une dégradation des performances ainsi qu'une réduction de la durée de vie de la machine.

Dans le chapitre précédent, des modèles numériques ont été développés afin de reproduire avec précision le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts d'excentricité. Le présent chapitre est consacré à l'application de ces modèles pour le diagnostic et la caractérisation de ce type de défaut.

IV.1. Problématique et objectifs

Le diagnostic des défauts d'excentricité a fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières décennies. Parmi les différentes techniques proposées, l'analyse du flux magnétique constitue une approche particulièrement intéressante en raison de sa sensibilité aux variations de l'entrefer et de sa capacité à révéler les perturbations induites par le défaut. L'exploitation des signatures du flux permet ainsi d'identifier la présence d'une excentricité et d'évaluer son influence sur le comportement électromagnétique de la machine.

Ce projet de fin d'études vise à diagnostiquer et caractériser le défaut d'excentricité dans une machine asynchrone, en utilisant la technique d'analyse du flux magnétique. Ce travail illustrera donc, l'impact de ce type de défaut sur les performances électromagnétiques de la machine et fournira des moyens fiables de le détecter au plus tôt, améliorant ainsi la fiabilité et la disponibilité des systèmes industriels.

L'objectif principal est d'exploiter les informations contenues dans les signaux de flux afin

de déterminer les paramètres caractérisant l'excentricité.

Tout d'abord, la machine asynchrone a été modélisée en utilisant la méthode des éléments finis. Dans ce souci, un code de calcul numérique a été développé et implémenté sous environnement MATLAB. Ce code a été appliqué pour calculer le champ magnétique dans le cas sain de la machine.

Ensuite, le programme développé a été adapté pour modéliser la machine en présence du défaut d'excentricité et pour simuler différents niveaux d'excentricité statique et/ou dynamique. Ce modèle constitue le problème direct du processus de diagnostic et/ou de caractérisation adopté dans ce travail.

Les résultats obtenus des modèles électromagnétiques, numériques, ont été exploité dans un processus de calcul inverse, basé sur la technique des algorithmes génétique, pour déterminer le type de défaut d'excentricité et le caractériser.

IV.2. Description de la machine d'étude

La machine d'étude est l'une des machines à induction de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard en France. Elle a été déjà utilisée pour différentes études théoriques et pratiques, parmi lesquelles on peut citer un travail qui a été réalisé sur le diagnostic et le CND des défauts de rupture/déformation de barres et de court-circuit par analyse vibratoire.

La figure ci-dessous présente une vue éclatée du stator et du rotor à cage d'écureuil de cette machine **[56]**.

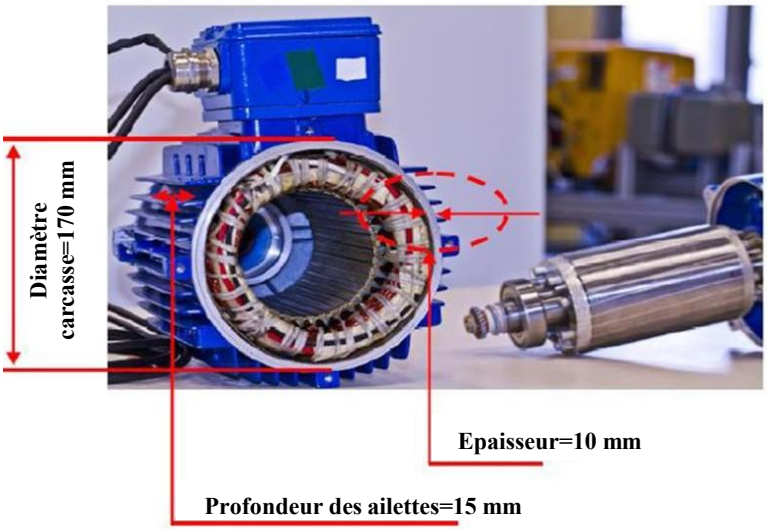


Figure IV.1: Vue éclatée de la machine d'étude

Cette machine est constituée de trente-six encoches statoriques et vingt-huit barres rotoriques. C'est une machine à pas raccourcit comportant des encoches à double couches et d'autres avec une seule couche (voir figures IV.2 et IV.3).

La configuration géométrique de cette machine a été représentée, en utilisant le logiciel Matlab, à l'aide de points, de droites, d'arcs et de segments. Ces derniers ont été connectés entre eux pour pouvoir créer les régions correspondantes à chaque partie de la machine. Après la réalisation de toutes ces étapes, nous aboutissant à la configuration de la figure ci-dessous.

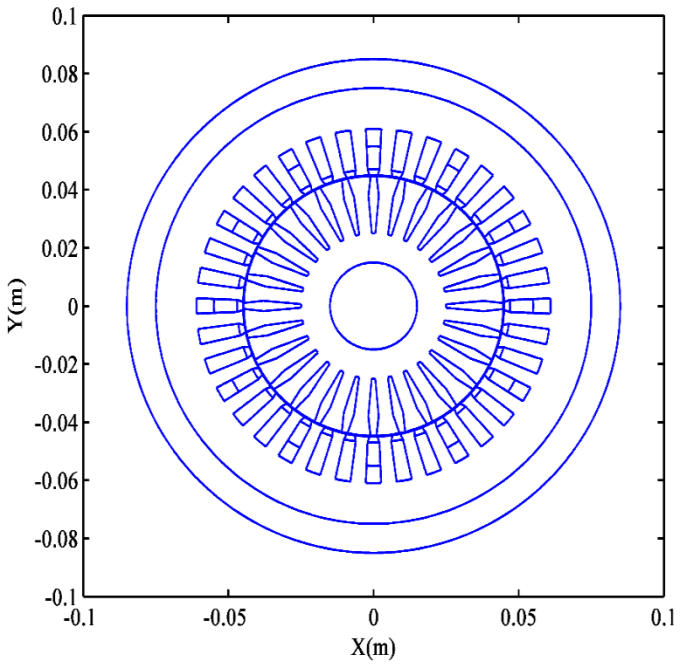


Figure IV.2 : Configuration géométrique de la MAS à étudier

Les principales caractéristiques de la machine d'étude sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1. Caractéristiques électriques et géométriques de la machine d'étude

Caractéristiques	Valeurs
Nombre de phases	3
Nombre de paires de pôles	2
Diamètre extérieur du stator (mm)	150
Diamètre intérieur du stator (mm)	90
Longueur active de la machine (mm)	130
Nombre d'encoches statoriques	36
Nombre de barres rotoriques	28
Type de couplage	Etoile
Courant nominal (A)	26
Puissance nominale (W)	5000
Fréquence électrique (Hz)	50

Une présentation de la disposition des bobines des trois phases, dans les encoches du stator de la machine, est donnée dans la figure IV.3. Comme indiqué précédemment, certaines encoches contient deux phases et d'autres ne contient qu'une seule phase. Le nombre de conducteurs par encoche statorique est égale à 32.

Cette configuration d'enroulements génère 2 paires de pôles (soit 4 pôles), ce qui permet à la machine de fonctionner à une fréquence de 50 Hz donc à une vitesse de synchronisme de 1500 tr/min.

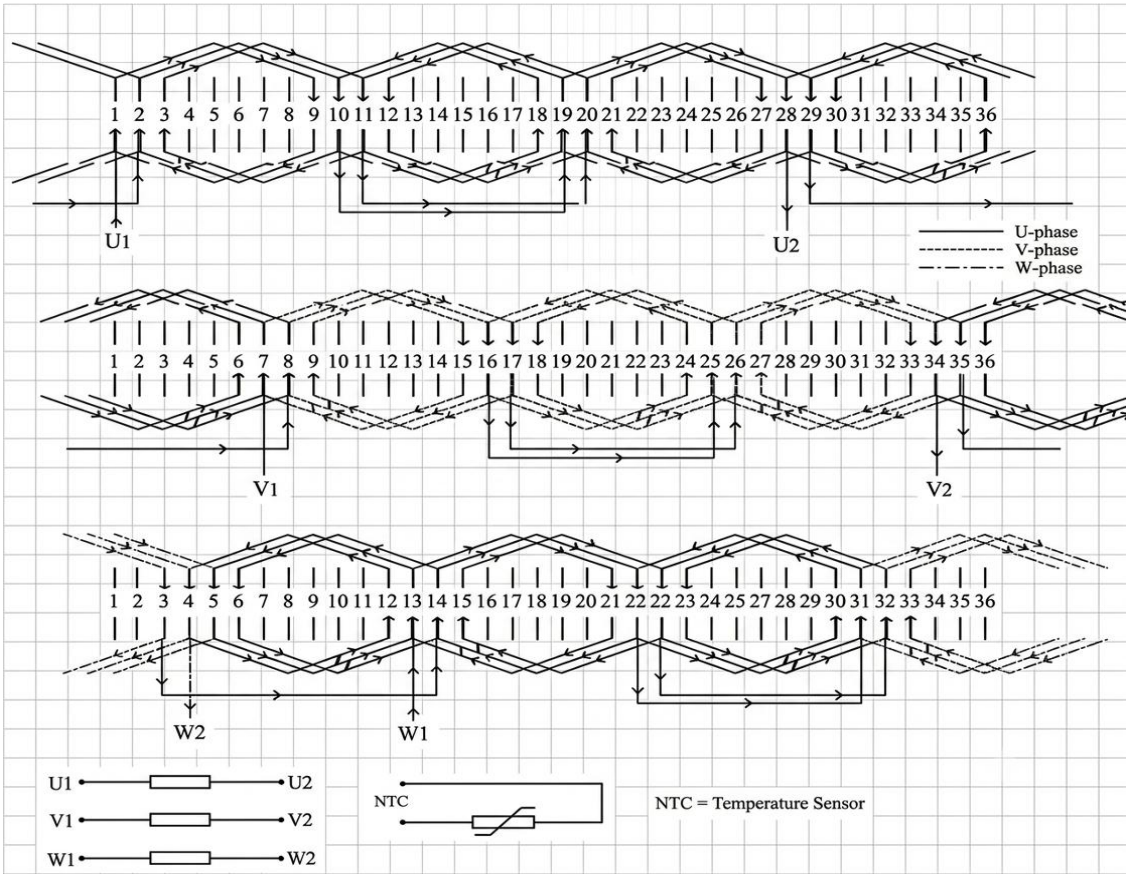


Figure IV.3: Bobinage de la MAS a étudié

IV.3. Détermination du flux magnétique par modélisation numérique

Cette modélisation a été réalisée sous l'environnement Matlab afin d'étudier la répartition du flux magnétique dans la machine asynchrone en régime du fonctionnement moteur. Le fonctionnement à vide de la machine a été considéré avec un glissement de 4,13 % et un courant absorbé efficace de 5 A.

Afin de simplifier l'étude, la machine est supposée suffisamment longue pour que les phénomènes électromagnétiques puissent être analysés dans une section transversale. Une approche bidimensionnelle (2D) a donc été adoptée, ce qui permet de réduire considérablement le temps de calcul tout en conservant une précision satisfaisante des résultats.

Le modèle éléments finis utilisé repose sur la résolution de l'équation de la magnétodynamique exprimée en fonction du potentiel vecteur magnétique A. Une fois cette grandeur déterminée, les différentes composantes du flux magnétique dans la machine peuvent être calculées.

La répartition du flux constitue un indicateur important du comportement électromagnétique

de la machine, notamment pour l'analyse de l'influence des défauts tels que l'excentricité.

L'équation électromagnétique à résoudre s'exprime comme suit:

$$\overrightarrow{Rot}\left(v\left(\overrightarrow{Rot}\ \vec{A}\right)\right)+\sigma\ \frac{\partial\vec{A}}{\partial t}=\overrightarrow{Jex} \quad \text{(IV.1)}$$

Avec:

$\vec{A}$: potentiel vecteur magnétique suivant l'axe z,

v: réluctivité magnétique du matériau,

σ: conductivité électrique,

t: temps considéré,

$\overrightarrow{Jex}$: densité de courant imposée dans les encoches statoriques.

Le flux magnétique ϕ traversant une surface donnée s, est ensuite calculé à partir de l'induction magnétique B selon l'équation ci-dessous:

$$\phi = B.s \quad \text{(IV.2)}$$

Avec:

$$\vec{B}=\frac{\partial A}{\partial y}\ \vec{\imath}-\ \frac{\partial A}{\partial x}\ \vec{\jmath} \quad \text{(IV.3)}$$

Après la résolution de cette équation, les composantes de l'induction magnétique sont obtenues à partir du potentiel vecteur magnétique selon les relations:

$$By=-\frac{\partial A}{\partial x}\ ,Bx=\frac{\partial A}{\partial y} \quad \text{(IV.4)}$$

$$\phi = B*S \quad \text{(IV.5)}$$

Pour effectuer le calcul du flux magnétique dans la machine, le programme développé suit les étapes suivantes:

- ✓ 1ière Étape: introduction des paramètres géométriques de la machine et génération du maillage éléments finis,
- ✓ 2ième Étape: introduction des paramètres physiques (électriques et magnétiques),
- ✓ 3ième Étape: définition et application des conditions aux limites,
- ✓ 4ième Étape: résolution de l'équation magnétodynamique et calcul du potentiel vecteur magnétique A,
- ✓ 5ième Étape: calcul de l'induction magnétique dans les différentes régions de la machine,

- ✓ 6ième Étape: détermination de la densité de flux magnétique dans l'entrefer, le stator et le rotor,
- ✓ 7ième Étape: Détermination de la distribution spatiale du flux magnétique.

La technique de modélisation numérique appliquée permet de déterminer les distributions spatiales du flux et du champ magnétique en tous points de la zone analysée de la machine. Les données obtenues servent ensuite à évaluer avec précision les performances électromagnétiques de la machine et les distorsions de flux dues à d'éventuels défauts.

Cette étude porte sur l'analyse de la distribution du flux magnétique dans l'entrefer d'une machine asynchrone, zone particulièrement sensible aux défauts d'excentricité. Les variations locales du flux magnétique constituent ainsi un paramètre pertinent pour évaluer l'état de fonctionnement de la machine asynchrone.

Le maillage éléments finis de la machine a été généré à l'aide du mailleur automatique du logiciel MATLAB. Il a été soigneusement affiné au niveau de l'entrefer, afin d'assurer une meilleure précision des résultats. À ce niveau, la présence d'au moins deux mailles est nécessaire pour garantir une solution plus fiable et plus exacte.

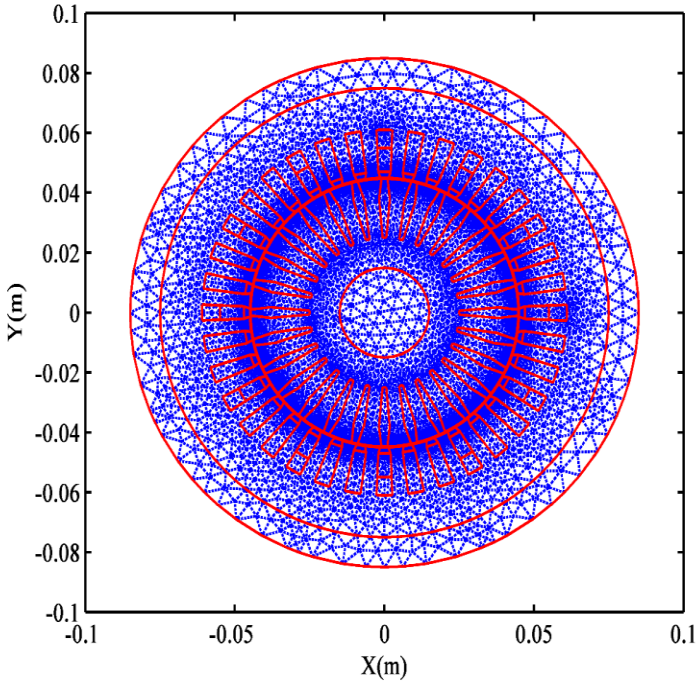


Figure IV.4: Maillage éléments finis adopté à cette étude

La figure IV.4 présente le maillage éléments finis adopté à cette étude. Il est constitué d'éléments triangulaires du premier ordre. On observe une densification du maillage au niveau de l'entrefer ainsi que des dents. Ceci permet d'avoir une représentation plus exacte et plus précise des variations importantes du champ.

La figure ci-dessous illustre le trajet des lignes du potentiel vecteur magnétique, appelées lignes équipotentielles, à l'intérieur du moteur à induction. Ces lignes traversent l'entrefer et toutes les régions ferromagnétiques de la machine. La concentration des lignes du potentiel vecteur est maximale au niveau des dents de la machine, car c'est là que passe la totalité du flux magnétique dans un entrefer réduit.

L'observation des lignes équipotentielles montre qu'elles demeurent confinées à l'intérieur du circuit magnétique de la machine. Le flux magnétique circule essentiellement dans les matériaux ferromagnétiques, limitant ainsi les fuites de flux vers l'extérieur. Dans le fonctionnement sain de la machine, le champ magnétique externe est très faible, voire nul.

Dans cette étude, on a imposé A=0 (condition de type Dirichlet) sur la surface extérieure de la culasse statorique, ce qui se traduit par un champ nul à l'extérieur du stator.

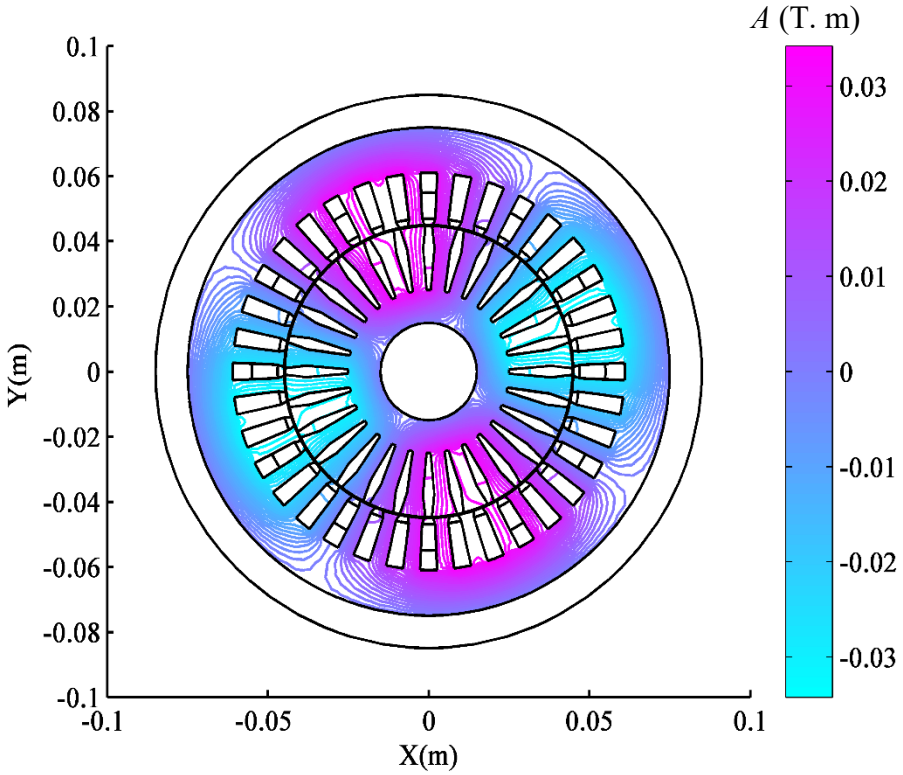
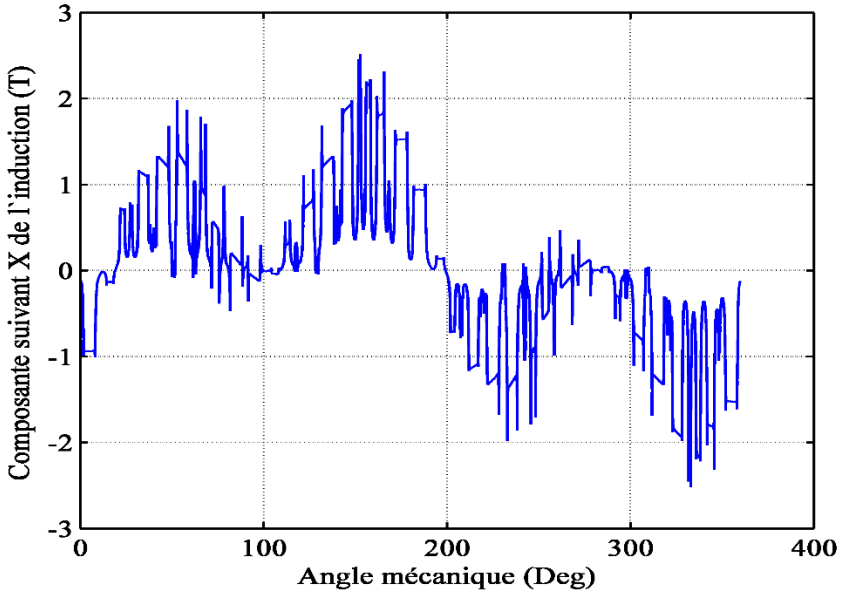


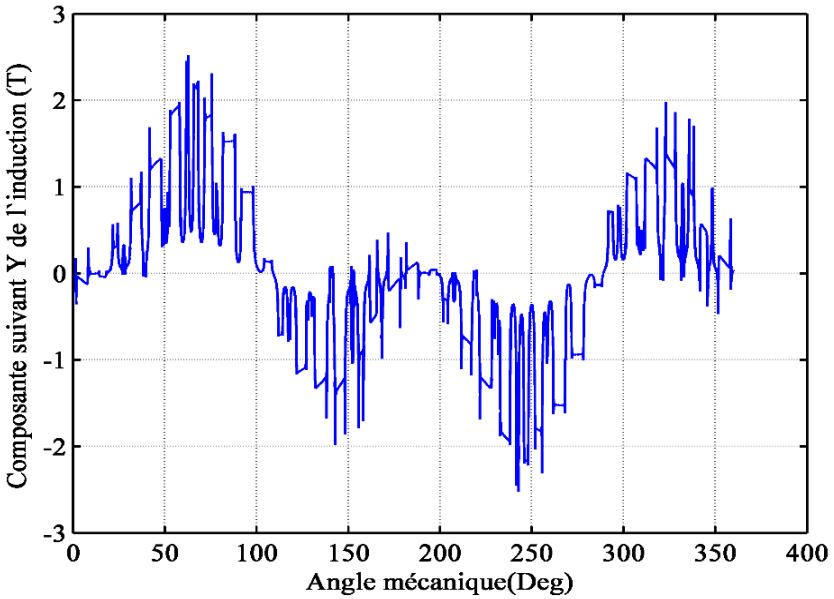
Figure IV.5: Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

Le calcul du potentiel vecteur magnétique a permis d'établir la distribution de l'induction magnétique et du flux magnétique dans la machine. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures ci-dessous.

Les figures IV.6 et IV.7 présentent, respectivement, les évolutions des composantes suivant x et suivant y ainsi que du module de l'induction, suivant un contour passant par les dents statoriques.



(a) Composante suivant x de l'induction



(b) Composante suivant y de l'induction

Figure IV.6: Evolution des composantes de l'induction suivant un contour passant par les dents statoriques

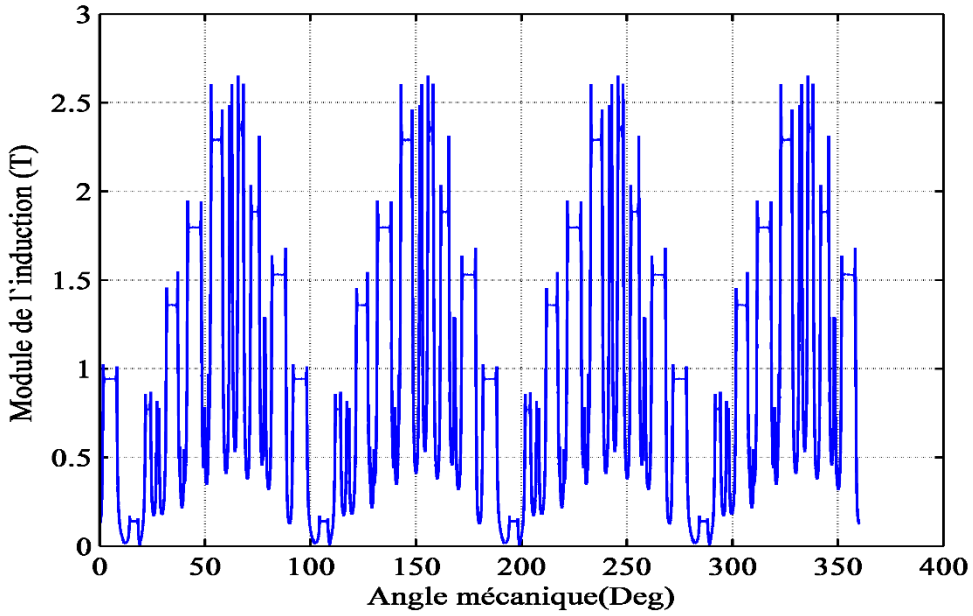


Figure IV.7: Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques

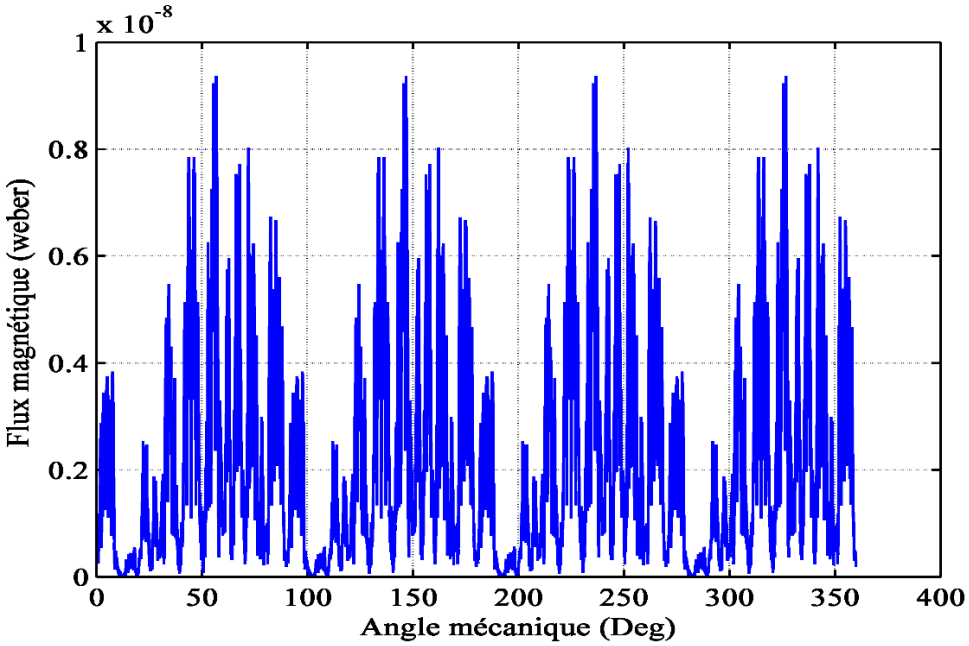


Figure IV.8: Evolution du flux magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques

Les figures ci-dessus présentent les évolutions du flux et de l'induction magnétiques dans l'entrefer en fonction de l'angle mécanique. Les valeurs maximales apparaissent dans les régions où les lignes de champ sont fortement concentrées.

Les pics observés sur les courbes résultent principalement de l'effet d'encochage, lié à l'alternance dents-encoches et au passage des différentes parties du rotor devant l'entrefer. Ces

variations traduisent l'influence de la géométrie de la machine sur la distribution du champ électromagnétique dans l'entrefer.

Cette évolution qui n'est pas uniforme met en évidence la nécessité d'effectuer une analyse spectrale du signal du flux magnétique, qui est riche en harmoniques (figure IV.9).

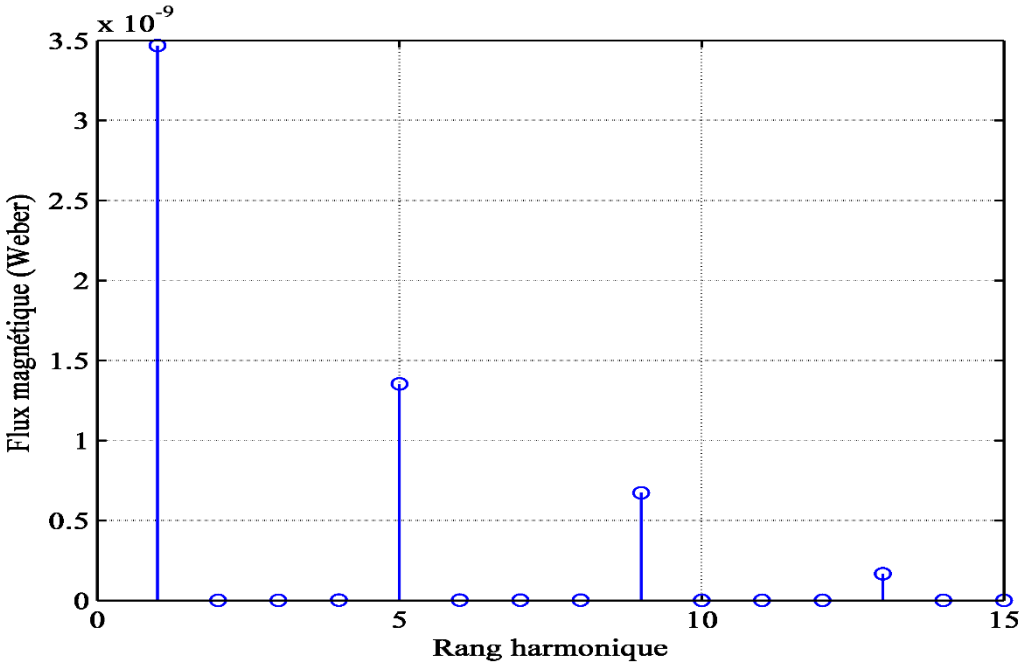


Figure IV.9: Spectre du flux magnétique

La figure ci-dessus est obtenue en effectuant une FFT au signal du flux. Le spectre du flux magnétique présente plusieurs composantes harmoniques d'amplitudes différentes. Les harmoniques dominantes, identifiables par leurs amplitudes élevées, se distinguent des composantes résiduelles dont les amplitudes sont nettement plus faibles. Cette distribution harmonique illustre le comportement électromagnétique de la machine asynchrone en état sain.

IV.4. Modélisation et diagnostic de la MAS dans le cas défectueux

Cette partie va être consacrée à la modélisation et au diagnostic des défauts d'excentricité statique et dynamique qui peuvent surgissent lors du fonctionnement de la machine asynchrone. Ces défauts vont être créés au niveau du dessin de la machine, en intervenant au niveau des coordonnées des arcs et des segments constituant la partie rotorique.

Le diagnostic de ces défauts va être effectué en se basant sur la technique d'analyse du flux magnétique, tel qu'il a été déjà mentionné précédemment. La procédure à suivre, dans ce cas, est celle présentée dans l'organigramme ci-dessous.

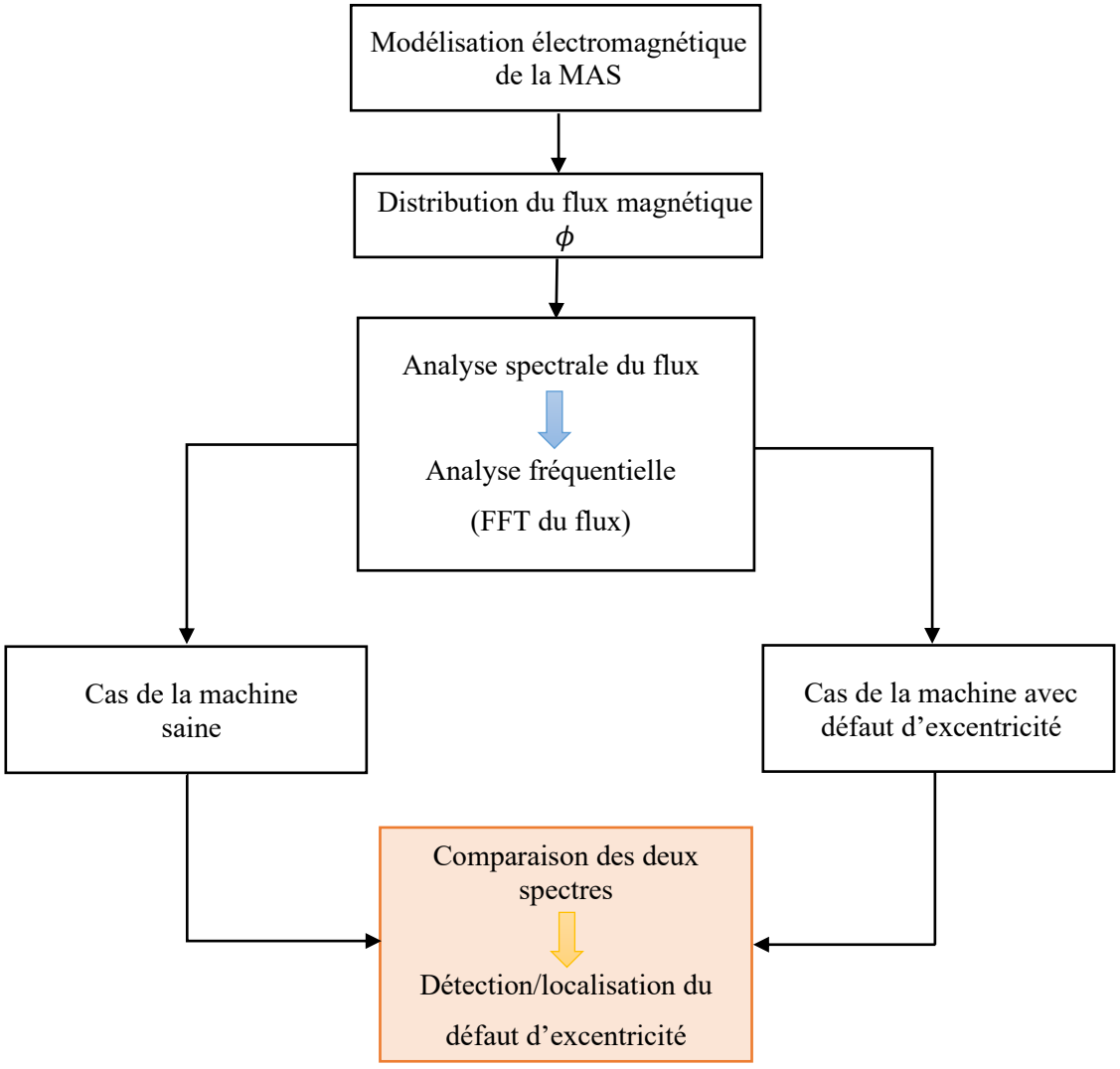


Figure IV.10: Procédure du diagnostic du défaut d'excentricité dans une MAS par analyse du flux magnétique

IV.4.1. Diagnostic du défaut d'excentricité statique par analyse du flux magnétique

Deux cas d'excentricité statique ont été considérés. Le premier cas concerne le décalage du rotor à droite, ce qui veut dire que le centre du rotor est décalé d'une petite distance dx de celui du stator. Tandis que le deuxième cas concerne le décalage du rotor vers le bas. Ceci veut dire que le centre du rotor descend par rapport au centre du stator d'une distance de dy.

L'introduction du premier défaut a été faite au niveau du calcul des cordonnées des points constituants les segments et les arcs du rotor. Donc, on ajoute un décalage dx au niveau du calcul des x de chaque point. On obtient la configuration du rotor présentée dans la figure IV.11. On remarque bien que l'axe du rotor a été décalé vers la droite par rapport à celui du stator.

En pratique, ce type de défaut peut exister à cause d'un défaut d'assemblage ou d'alignement du rotor.

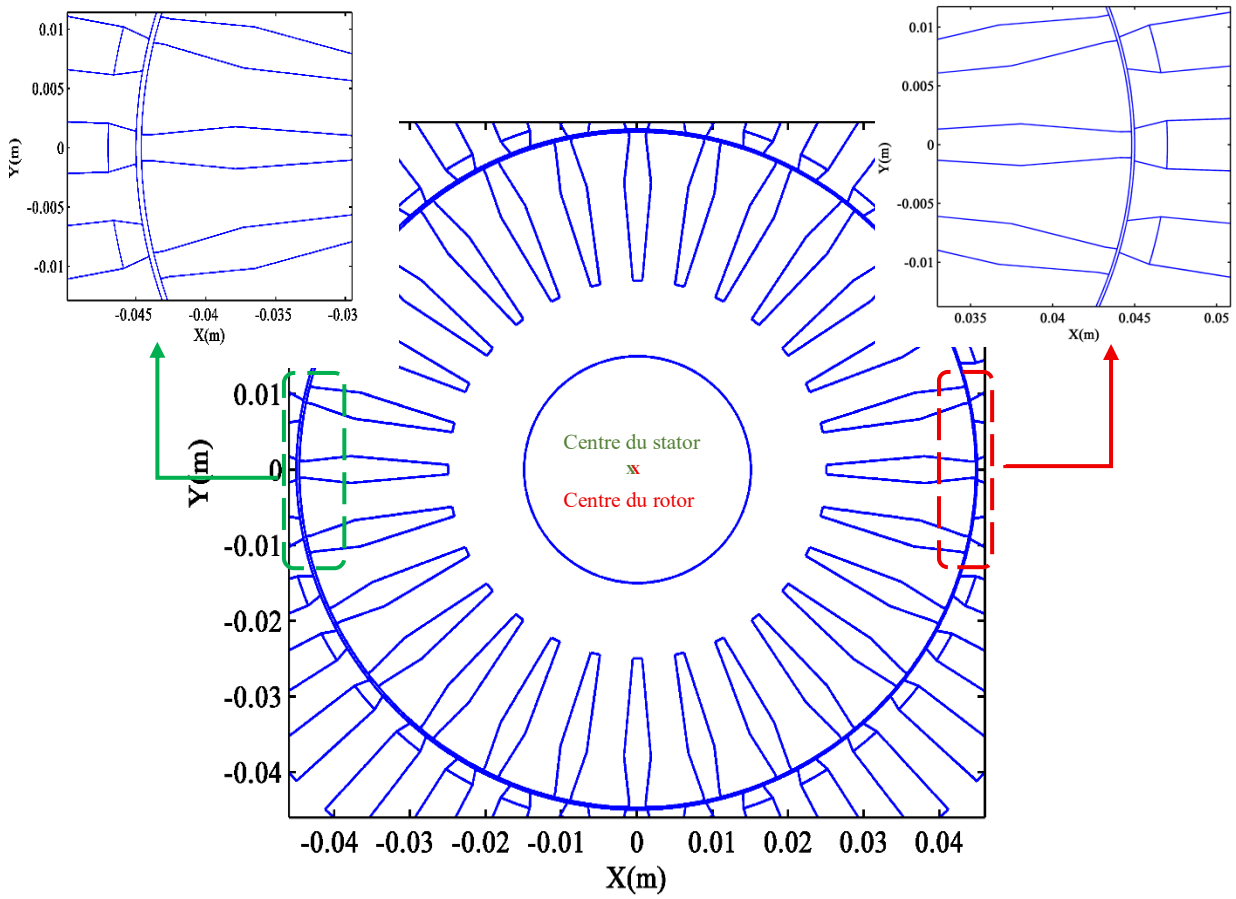


Figure IV.11: Excentricité statique. Cas du décalage du rotor à droite

Les deux figures ci-dessous présentent respectivement, l'évolution du flux magnétique sur un contour dans l'entrefer passant par les dents statoriques ainsi que le spectre fréquentiel correspondant.

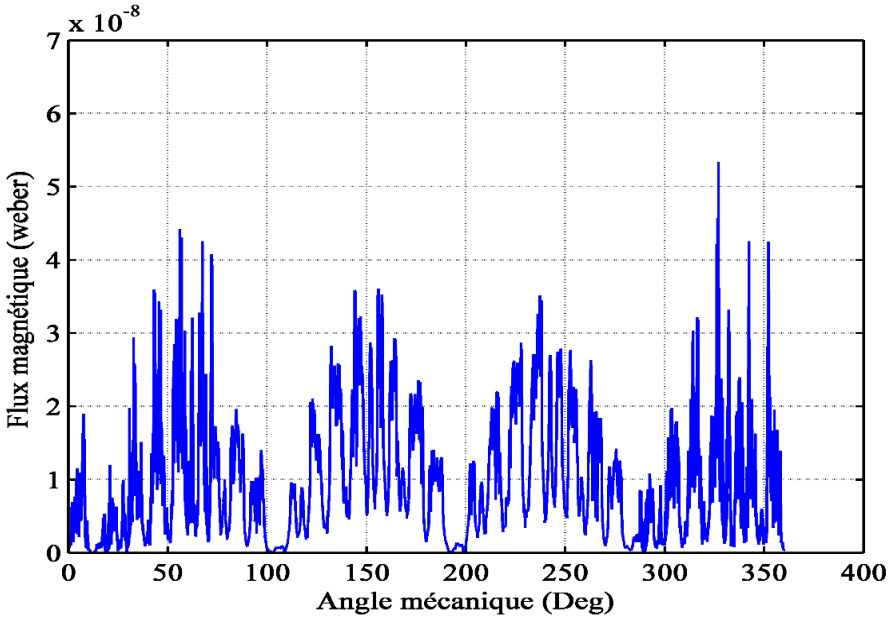


Figure IV.12: Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité. Décalage à droite du rotor

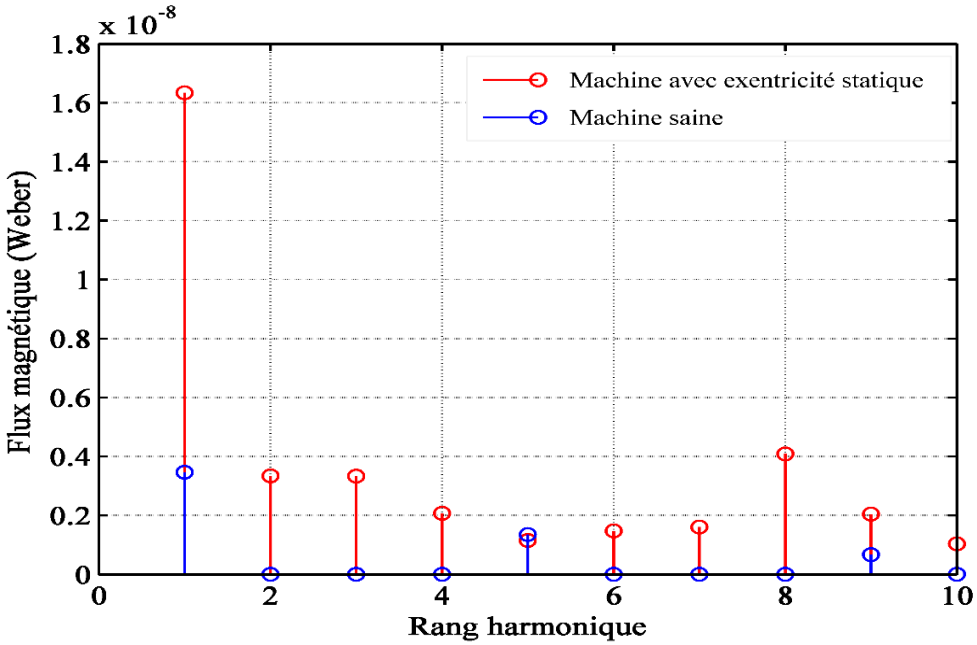


Figure IV.13: Spectre du flux magnétique en présence d'une excentricité statique. Décalage du rotor à droite

En comparant les figures IV.8 et IV.12, on peut remarquer une modification dans la distribution du flux magnétique. La non uniformité du flux augmente en présence du défaut d'excentricité qui rend l'entrefer non uniforme.

Cette non uniformité se traduit par un spectre riche en harmoniques tel qu'il est montré dans la figure IV.13. On constate une amplification des harmoniques existants (le fondamental et l'harmonique 9) ainsi que l'apparition d'autres harmoniques (harmoniques d'ordre 2, 3, 4, 8…).

Même chose pour le deuxième cas, l'introduction du défaut a été faite au niveau du calcul des cordonnées des points constituants les segments et les arcs du rotor. Donc, on ajoute un décalage dy au niveau du calcul des y de chaque point.

On obtient la configuration du rotor présentée dans la figure IV.14. On remarque bien que l'axe du rotor a été décalé vers le bas par rapport à celui du stator.

En pratique, ce type de défaut peut exister à cause du poids du rotor et/ou de la force centrifuge qui accentue le décalage durant la rotation du rotor.

Les deux figures IV.15 et IV.16 présentent respectivement, l'évolution du flux sur un contour dans l'entrefer, passant par les dents statoriques, ainsi que le spectre fréquentiel correspondant.

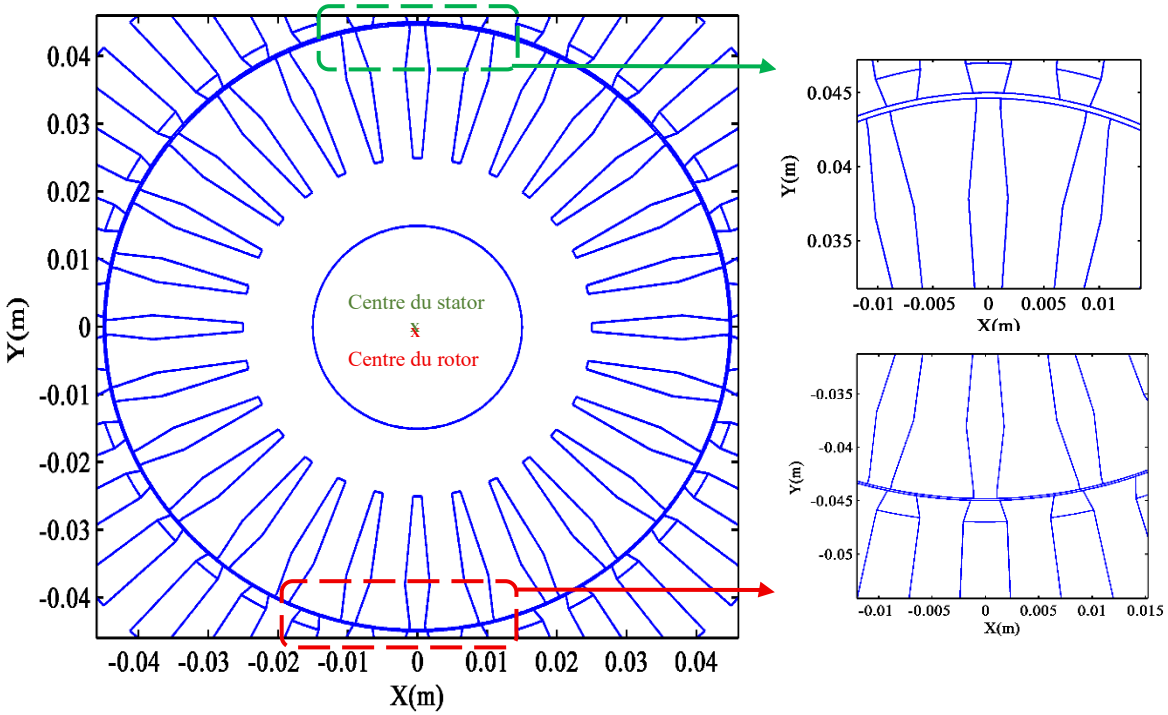


Figure IV.14: Excentricité statique. Cas du décalage du rotor vers le bas

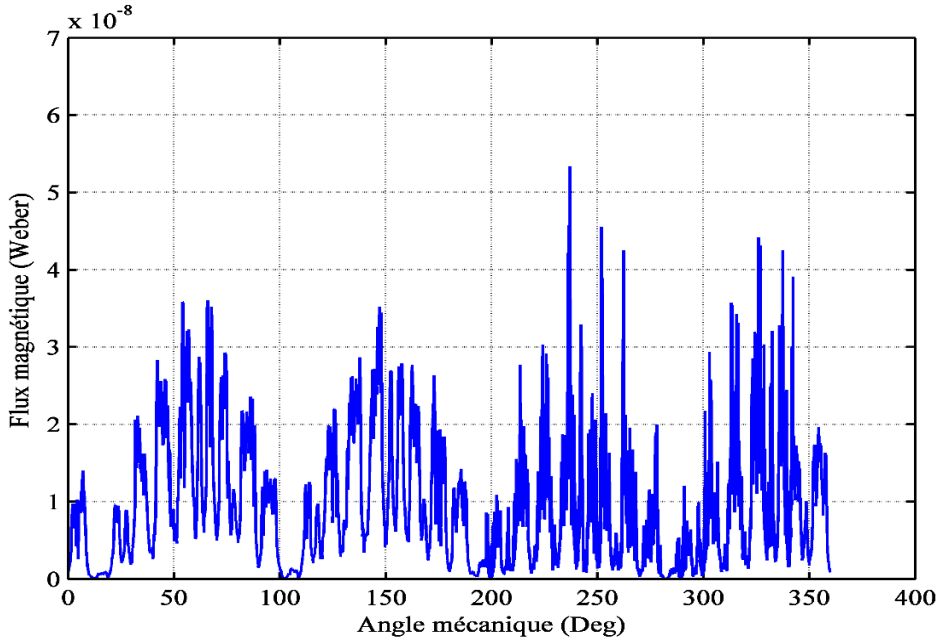


Figure IV.15: Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité. Décalage du rotor vers le bas

En comparant la figure IV.15 avec la figure IV.12, on peut constater une modification dans la distribution du flux magnétique. Donc, une nouvelle position du rotor (excentricité statique vers le bas) donne une nouvelle distribution du flux.

La non uniformité du flux est toujours existante en présence du défaut d'excentricité qui

correspond au décalage du rotor vers le bas, mais avec une distribution différente ce qui engendre un nouveau spectre donner par la figure ci-dessous.

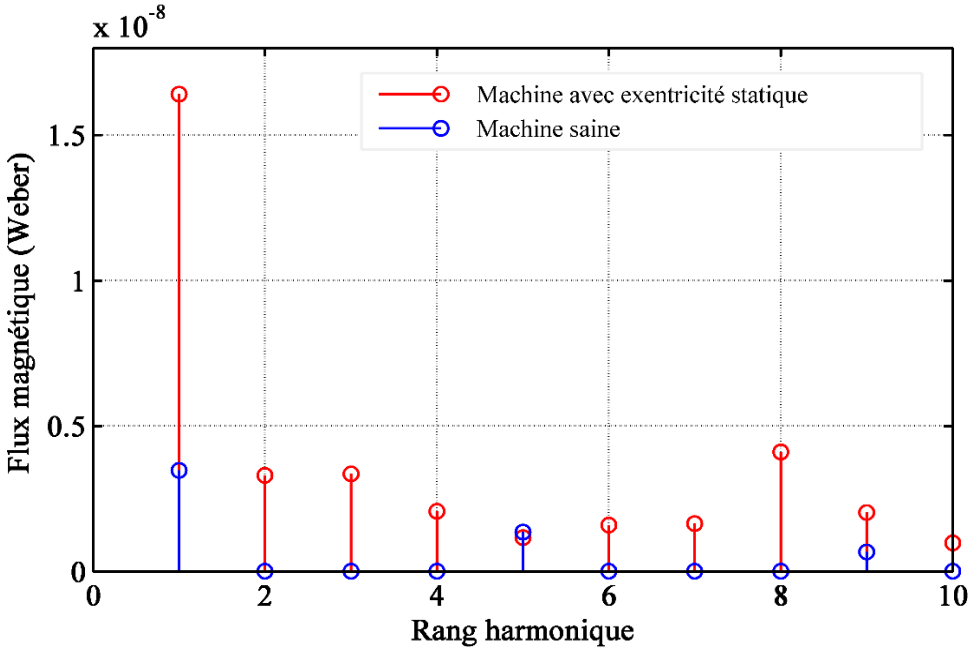


Figure IV.16: Contenu spectral du flux magnétique en présence d'une excentricité statique. Décalage du rotor vers le bas

Même chose que précédemment, le spectre du flux magnétique est riche en harmoniques, tel qu'il est montré dans la figure ci-dessus, mais avec un contenu spectral différent. On constate l'amplification de quelques harmoniques existants ainsi que l'apparition d'autres harmoniques qui n'étaient pas dans le cas sain du moteur (les amplitudes diffèrent par rapport au premier cas).

Les résultats obtenus montrent le degré d'influence de la position du rotor par rapport au stator sur la distribution du flux magnétique dans l'entrefer. Ceci mis en évidence l'intérêt de la technique d'analyse du flux pour la détection du défaut d'excentricité statique.

IV.4.2. Diagnostic du défaut d'excentricité dynamique par analyse du flux magnétique

Le but de cette partie est d'introduire l'écart dynamique, et pour ce faire nous considérons que le rotor est en rotation. Donc, à chaque pas du temps le rotor tourne et change de position par rapport au stator, tel qu'il est montré dans les figures ci-dessous.

Pour créer ce type d'excentricité, on a introduit un déphasage angulaire, qui change en fonction du temps, dans les équations de calcul des coordonnées de chaque point constituant les arcs et les segments du rotor. Avec aussi des différents décalages suivant x et suivant y.

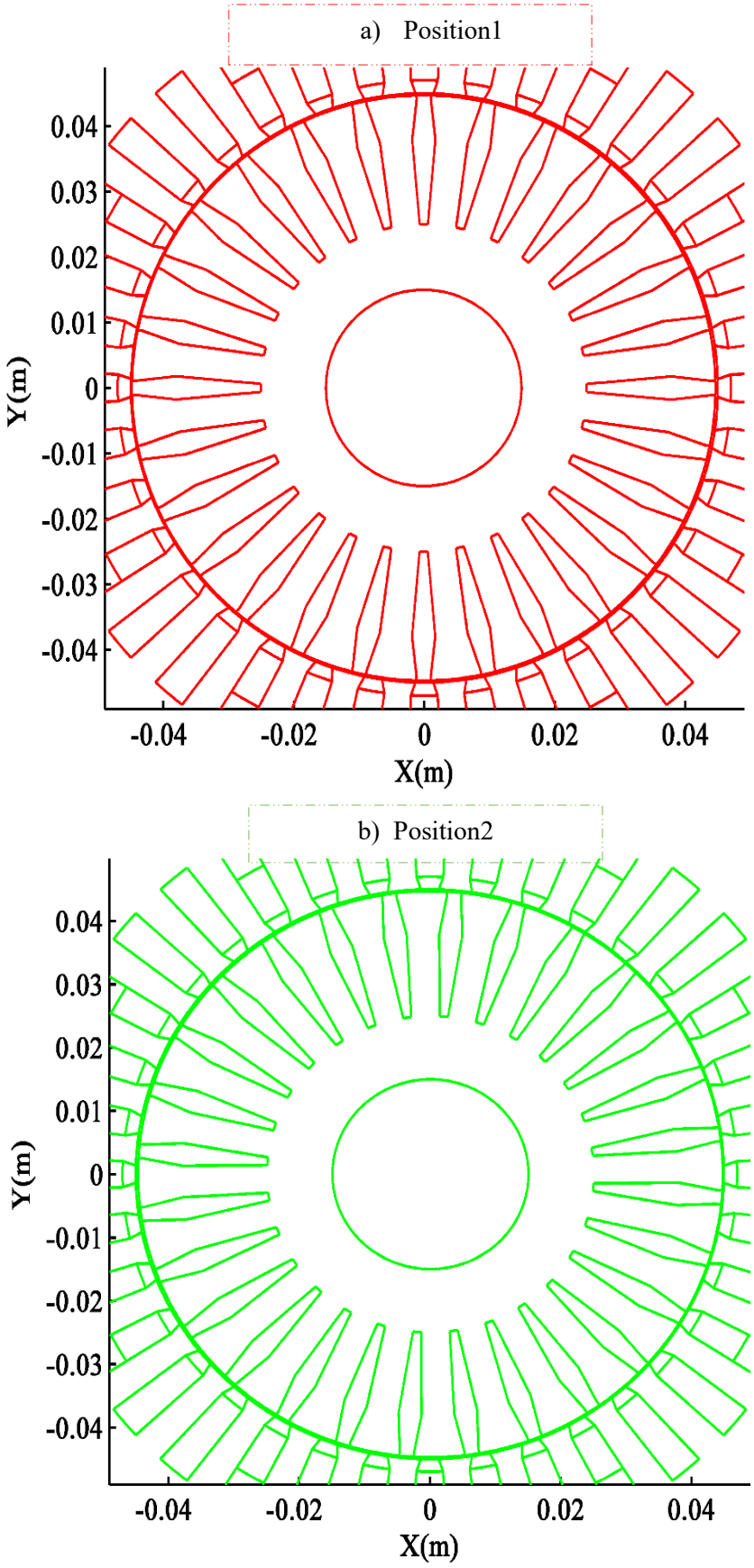


Figure IV.17: Deux positions d'excentricité dynamique. Position1 : rotor décalé à gauche, Position 2 : rotor décalé à droite

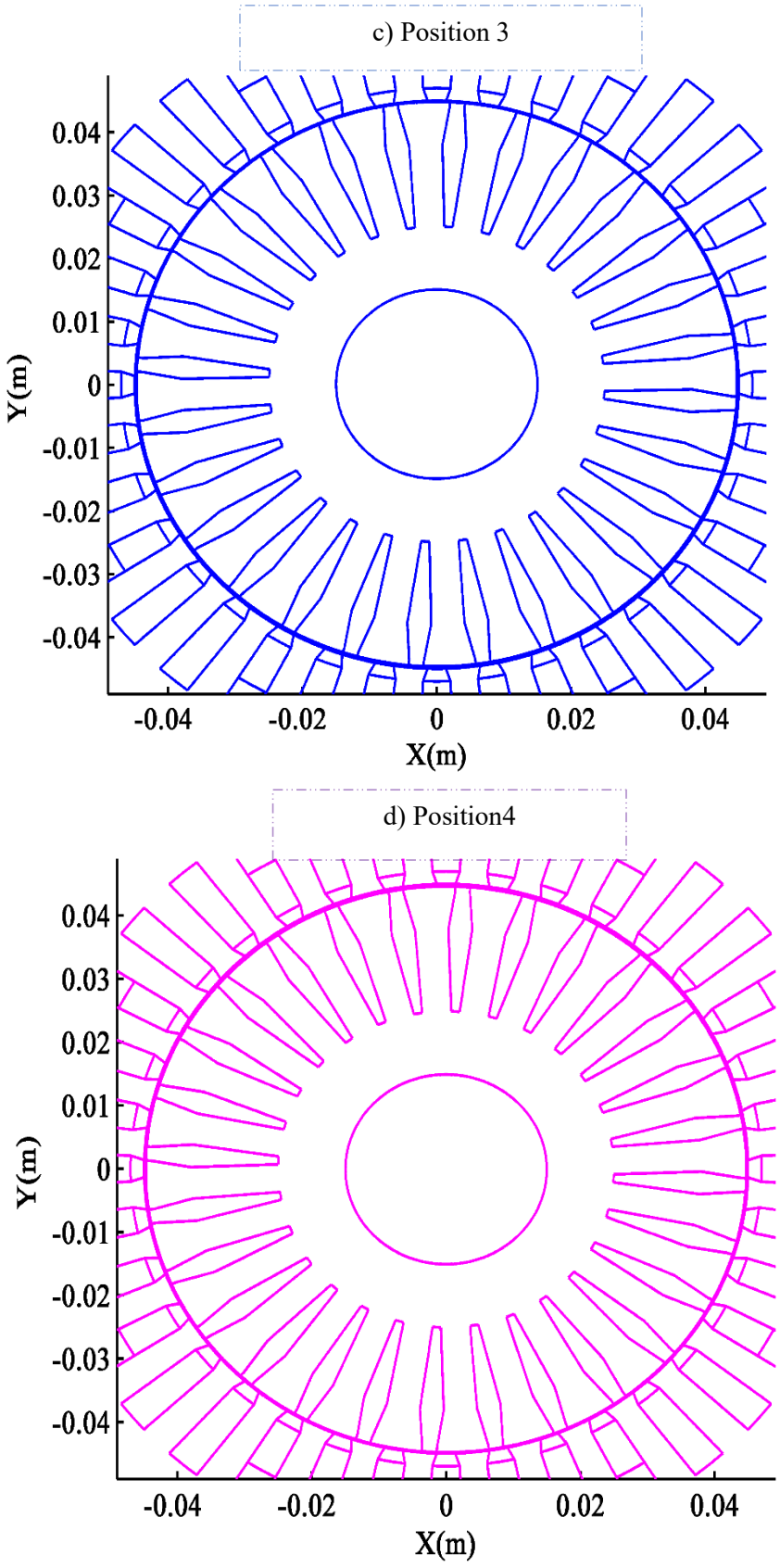


Figure IV.18: Deux positions d'excentricité dynamique. Position 3 : rotor décalé en haut, position 4 : rotor décalé vers le bas

Les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique, obtenues pour les quatre positions du rotor, sont regroupées dans la figure ci-dessous.

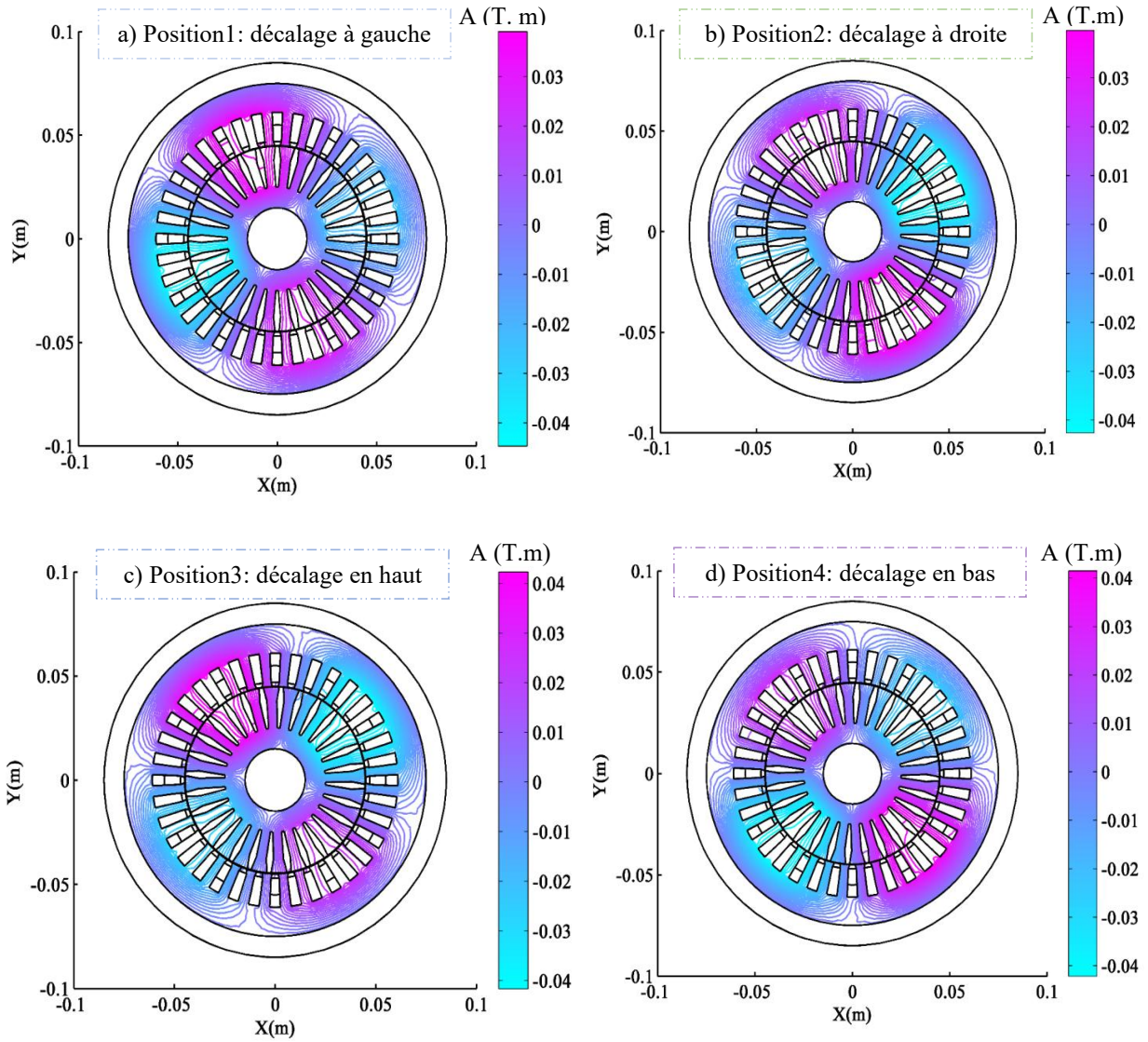


Figure IV.19. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique en présence du défaut d'excentricité dynamique

A partir des figures ci-dessus, on peut très bien constater la rotation du rotor ainsi que la rotation des pôles magnétiques. Donc, le rotor tourne en changeant sa position par rapport au stator. Dans ce cas, on a pour chaque position du centre du rotor par rapport à celui du stator, une nouvelle distribution du champ et par conséquent du flux magnétique.

Les évolutions du flux magnétique, pour les quatre positions du rotor, sur un contour dans l'entrefer passant par les dents statoriques sont présentées dans la figure IV.20. Les spectres fréquentiels correspondants à chaque position ont été superposés et présentés dans la figure IV. 21.

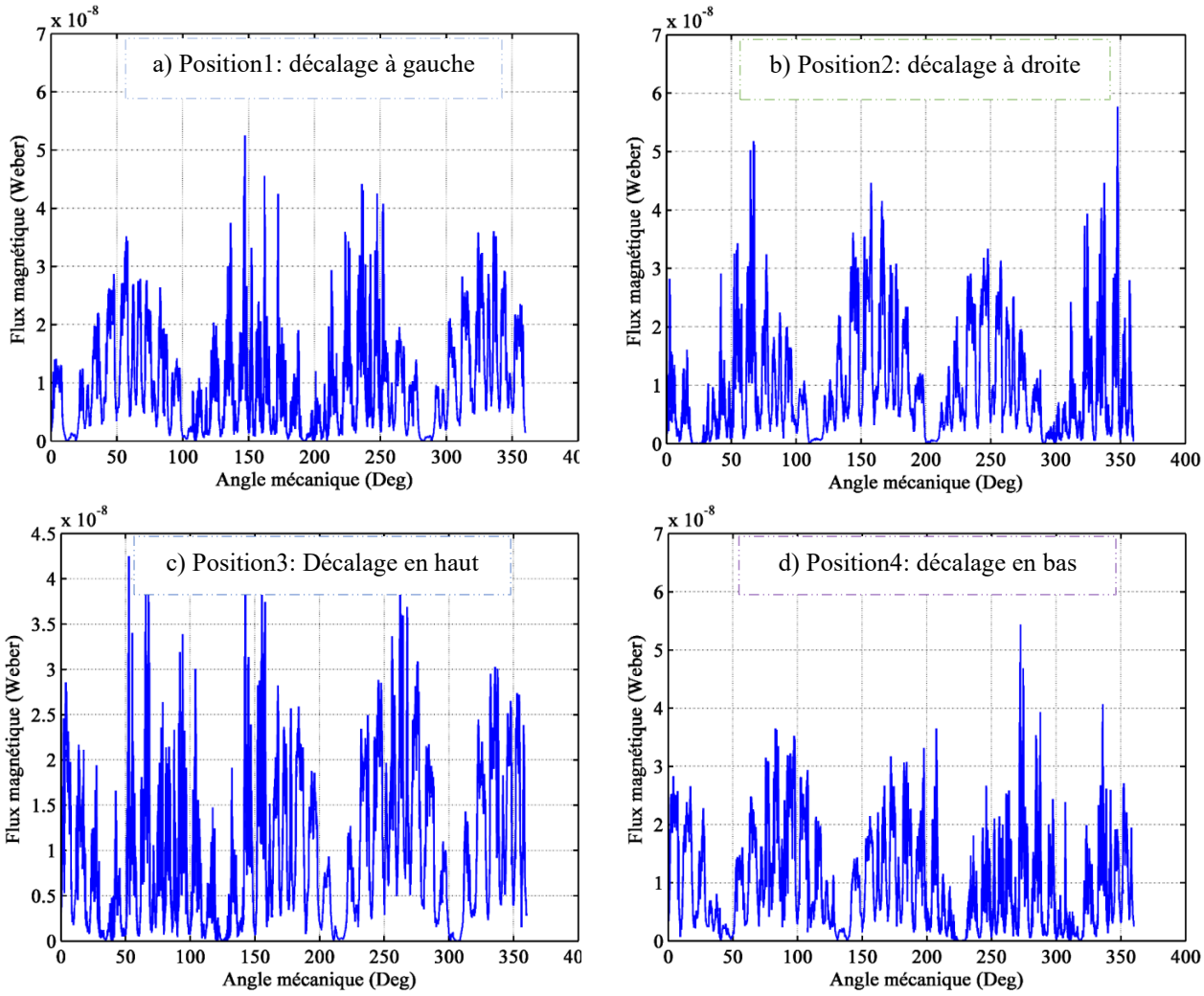


Figure IV.20: Evolution du flux magnétique en présence du défaut d'excentricité dynamique.

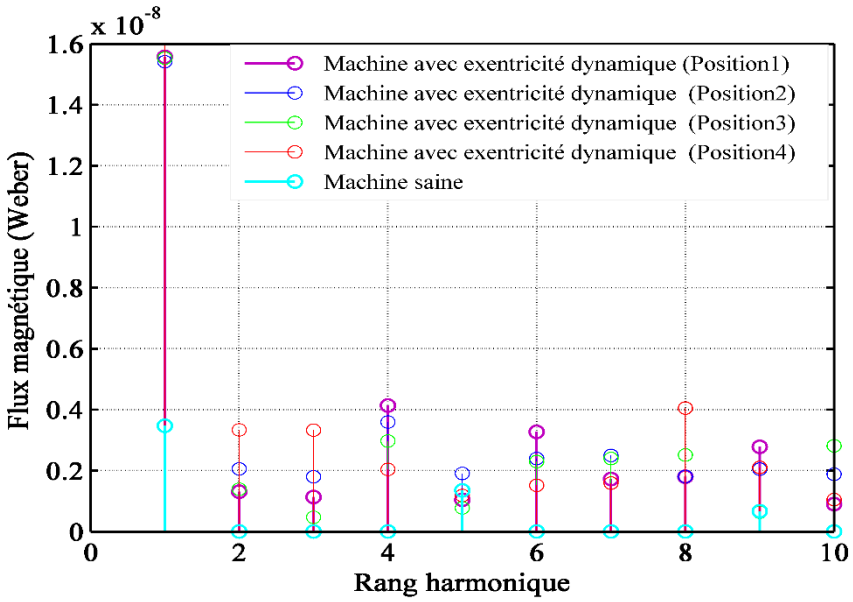


Figure IV.21: Spectres fréquentiels du flux magnétique obtenus en présence d'une excentricité dynamique. Pour 4 cas d'excentricité

Les figures ci-dessus montrent que l'excentricité dynamique affecte considérablement la distribution du flux magnétique et son contenu spectral. La variation de la position du rotor modifie la répartition du champ dans l'entrefer, ce qui engendre une distribution non uniforme du flux et un spectre fréquentiel plus riche en composantes harmoniques.

Les résultats obtenus prouvent l'intérêt de la technique d'analyse du flux magnétique dans le diagnostic du défaut d'excentricité dynamique dans une machine électrique. A partir du contenu spectral, on peut identifier et localiser ce type de défaut en se basant sur les harmoniques qui apparaissent ou qui vont être amplifié.

IV.5. Caractérisation du défaut d'excentricité statique par analyse du flux

Comme mentionner précédemment, nous agissons sur les paramètres géométriques de la machine pour imposer un décalage entre les centres du rotor et du stator. Cette modification entraîne une variation de l'épaisseur de l'entrefer et, par conséquent, une perturbation de la distribution du champ magnétique et du flux magnétique dans la machine.

L'objectif est de déterminer les paramètres caractérisant le défaut d'excentricité à partir de l'analyse du flux magnétique. Le problème consiste donc à identifier les valeurs du décalage rotorique qui conduisent à un contenu spectral du flux similaire à celui obtenu expérimentalement ou considéré comme mesuré. Les paramètres de défaut à déterminer sont ainsi liés à l'amplitude et à la direction du décentrement du rotor.

IV.5.1. Caractérisation de l'excentricité statique due à un défaut de fabrication

Ce défaut peut résulte de tolérances d'usinage, d'un mauvais centrage du rotor ou du stator, ou encore d'un défaut de montage des différents composants de la machine.

Pour traiter ce problème, on a considéré un décalage du rotor vers le côté gauche-haut. Ce qui veut dire, le centre du rotor est décalé du centre du stator avec un dx négatif et un dy positif. Donc, dx et dy sont les paramètres à déterminer. On chercher les valeurs donnant la même distribution du flux supposée sur les dents statoriques.

Ce problème revient alors à un problème inverse qui est résolu à l'aide d'une méthode d'optimisation appropriée. La formulation mathématique correspondante est donnée ci-dessous.

$$\begin{cases} \text{Min}\left(g = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{36}(\phi_{i\,calc} - \phi_{i\,prop})^2\right) \\ -1.8\,e\text{-}4 \le dx \le 1.8\,e\text{-}4\ ; \quad -1.8\,e\text{-}4 \le dy \le 1.8\,e\text{-}4 \end{cases} \tag{IV.6}$$

Le défaut d'excentricité a été introduit dans le modèle par un décalage du centre du rotor, caractérisé par les paramètres (dx) et (dy). L'identification de ces paramètres est réalisée à partir de l'analyse du flux magnétique en minimisant la fonction objectif g qui correspond à l'écart entre les flux calculés $\phi_{i\,calc}$ et proposés comme mesurés $\phi_{i\,prop}$.

Pour résoudre ce problème inverse, l'algorithme génétique (AG) implémenté sous MATLAB a été utilisé. La convergence de la fonction objectif permet ainsi d'estimer les paramètres caractérisant le défaut d'excentricité.

Pour représenter les paramètres, la représentation normalisée a été utilisée. Le croisement uniforme et la mutation gaussienne ont été utilisés et une population initiale de taille 100 a été construite de façon aléatoire. A chaque génération nous choisissons les paramètres ayant les six meilleures fonctions objectifs comme des nouveaux parents pour la prochaine génération.

La figure IV.22 représente l`évolution de la fonction objectif en fonction des itérations. On peut bien constater qu'il y a une diminution jusqu'à atteindre un écart minimal, entre les valeurs du flux calculées et celles proposées comme mesurées, après 11 itérations (générations).

Les paramètres obtenus, après convergence de la fonction objectif, correspondent aux paramètres caractérisant le défaut d'excentricité. Ils sont présentés dans le tableau IV.2.

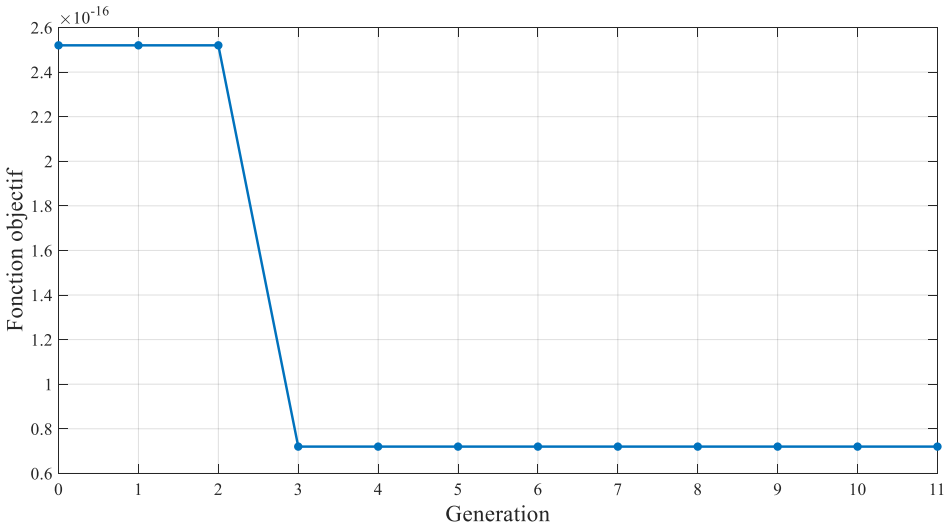


Figure IV.22: Evolution de la fonction objectif du problème de caractérisation d'un défaut d'excentricité statique dû à la fabrication

Tableau IV.2. Paramètres obtenus du défaut d'excentricité, 1ier cas

Paramètres du défaut	Machine saine	Machine défectueuse	Temps de calcul (s)
Décalage du rotor suivant x (dx)	0	-0.0556 e-3	5444
Décalage du rotor suivant y (dy)	0	0.1098 e-3	

La figure ci-dessous présente une superposition des évolutions du flux magnétique, calculé et supposé comme mesuré, sur les dents statoriques. On peut très bien remarquer qu'elles sont proches. Les deux courbes sont presque les mêmes.

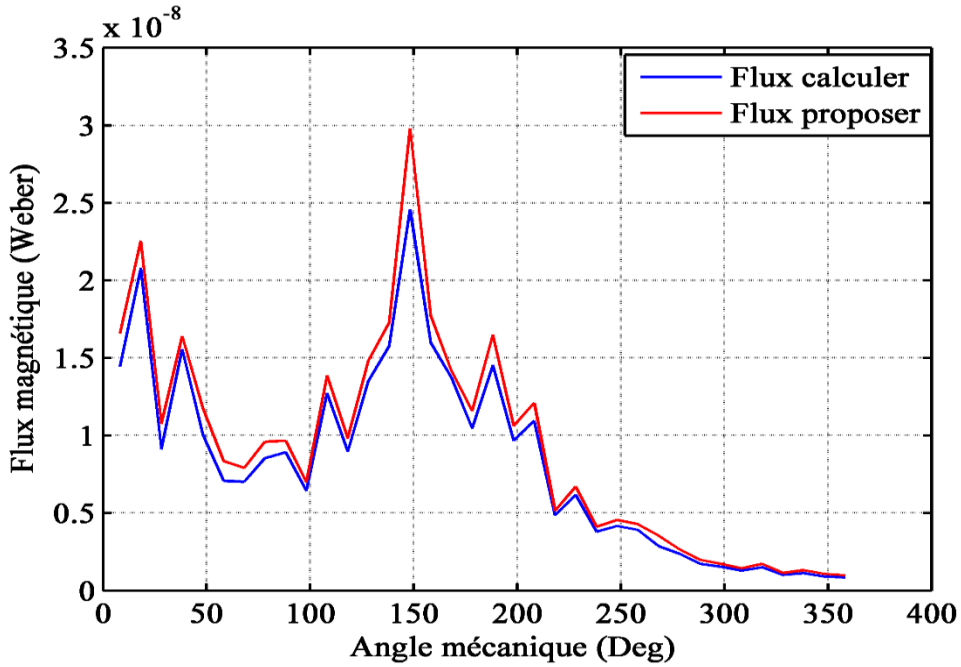


Figure IV.23 : Flux magnétique calculé et supposé mesurer, sur les dents statoriques, en présence du défaut d'excentricité statique dû à la fabrication

IV.5.2. Caractérisation de l'excentricité induite par l'effet du poids du rotor

Dans ce cas, on veut simplement simuler un **décalage fixe du rotor vers le bas** pour représenter l'effet de la gravité.

Le problème à traiter revient à résoudre la même formulation que précédemment. La seule différence c'est le flux supposé comme mesuré, il a une autre distribution sur les dents statoriques.

Même chose que précédemment, pour résoudre ce problème inverse, l'algorithme génétique implémenté sous MATLAB a été utilisé. Les mêmes caractéristiques de l'AG ont été choisies.

La figure ci-dessous montre l'évolution de la fonction objectif en fonction des générations.

On observe une décroissance progressive de g jusqu'à l'atteinte d'un minimum, ce qui atteste de la convergence de l'algorithme génétique. L'écart final entre les flux calculés et les flux mesurés est de l'ordre de 10^{-18}. La convergence est obtenue après 11 itérations.

Les paramètres identifiés à la convergence correspondent aux coordonnées du déplacement du rotor, caractérisant un défaut d'excentricité statique dirigé vers le bas. Les valeurs finales de dx et dy, ainsi que le temps de calcul associé, sont résumés dans le tableau ci-dessous.

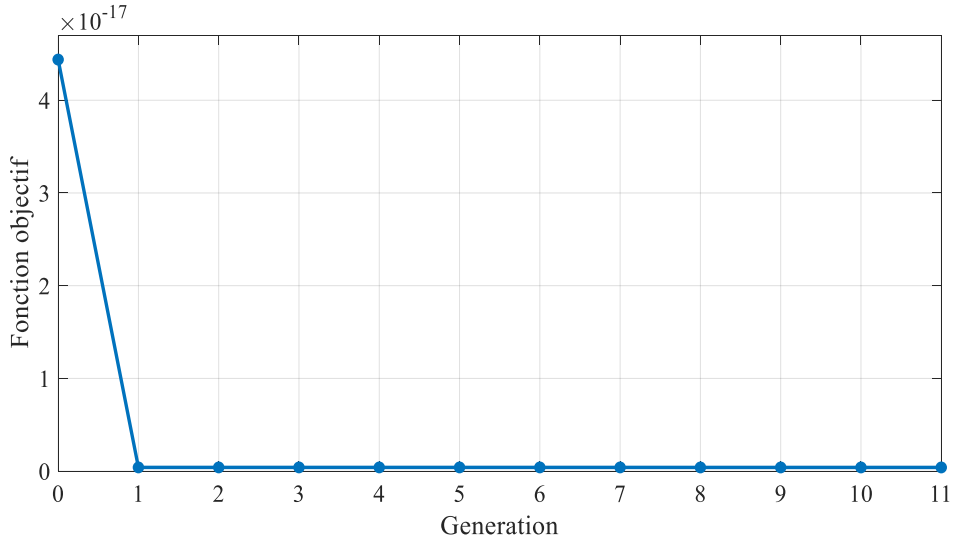


Figure IV.24: Evolution de la fonction objectif. Cas du décalage du rotor vers le bas

Tableau IV.3. Paramètres obtenus du défaut d'excentricité, 2iéme cas

Paramètres du défaut	**Machine saine**	**Machine défectueuse**	**Temps de calcul (s)**
Décalage du rotor suivant x (dx)	0	-0.0244e-3	4200
Décalage du rotor suivant y (dy)	0	-0.1325e-3	

La figure ci-dessous présente les évolutions du flux magnétique calculé et celui proposé comme mesurée. On peut très bien remarquer que les deux courbes sont presque superposées. Elles sont presque identiques.

Les résultats obtenus, prouvent que le modèle proposé nous a permis de déterminer les paramètres de défaut avec succès. Ce qui met en évidence l'intérêt d'une analyse du flux magnétique dans la caractérisation de ce type de défauts.

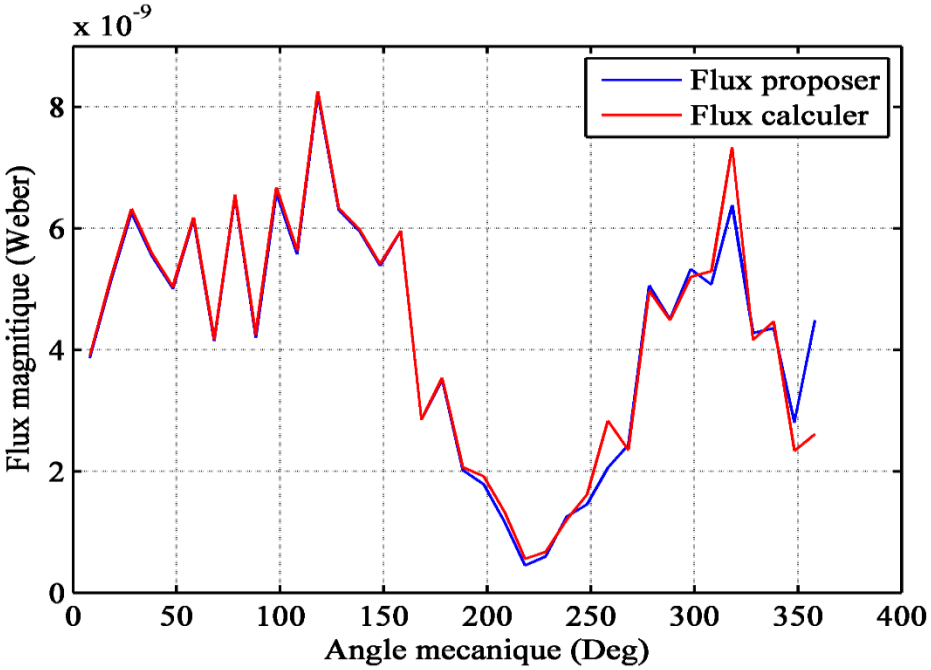


Figure IV.25 : Flux magnétique calculé et supposé mesurer, sur les dents statoriques, en présence du défaut d'excentricité dû au poids du rotor

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'application des modèles numériques développés pour le diagnostic et la caractérisation des défauts d'excentricité dans une machine asynchrone, en s'appuyant sur l'analyse du flux magnétique.

Deux configurations de défaut ont été étudiées, correspondant à l'excentricité statique et à l'excentricité dynamique. Pour chacune d'elles, les signatures du flux magnétique ont été analysées afin de mettre en évidence les modifications induites par la variation de l'entrefer. Une approche inverse basée sur les algorithmes génétiques a ensuite été mise en œuvre pour estimer les paramètres des défauts à partir des signatures obtenues.

Les résultats obtenus montrent que les modèles développés reproduisent fidèlement les effets des défauts d'excentricité sur le comportement électromagnétique de la machine. Ils démontrent également que l'analyse du flux magnétique constitue une méthode fiable pour le diagnostic et la caractérisation de ces défauts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les machines asynchrones à cage d'écureuil occupent une place essentielle dans les installations industrielles grâce à leur robustesse, leur simplicité de conception, leur coût réduit et leur grande fiabilité en fonctionnement. Cependant, comme toute machine électrique tournante, elles sont soumises à différentes contraintes électriques, mécaniques et thermiques susceptibles de provoquer des défauts pouvant dégrader leurs performances, diminuer leur rendement et réduire leur durée de vie. Parmi ces défauts, l'excentricité rotor-stator représente l'une des anomalies les plus importantes en raison de son influence directe sur la répartition du champ magnétique dans l'entrefer et sur le comportement électromagnétique global de la machine.

Ce mémoire a été consacré à l'étude, au diagnostic et à la caractérisation du défaut d'excentricité dans une machine asynchrone à cage d'écureuil par l'analyse du flux magnétique. Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les principaux défauts susceptibles d'affecter les machines électriques, notamment les défauts statoriques, rotoriques, les défauts de roulements ainsi que les différents types d'excentricité. Les conséquences de ces défauts sur les performances des machines ont été analysées, tout en mettant en évidence les méthodes de diagnostic les plus utilisées dans la littérature.

Par la suite, les principes théoriques de l'électromagnétisme appliqués aux machines asynchrones ont été rappelés afin d'établir le modèle mathématique nécessaire à l'étude du comportement magnétique de la machine.

Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis a été développé sous l'environnement MATLAB pour déterminer la distribution du potentiel vecteur magnétique, de l'induction magnétique et du flux magnétique dans les différentes régions de la machine. Cette approche a permis de représenter avec précision les phénomènes électromagnétiques et d'obtenir une description détaillée du champ magnétique dans l'entrefer et les parties ferromagnétiques.

L'étude du fonctionnement en régime sain a permis d'établir une référence de comparaison à travers l'analyse de la distribution du flux magnétique et de son contenu spectral. Les résultats

obtenus ont montré une répartition cohérente des grandeurs électromagnétiques ainsi qu'un spectre harmonique caractéristique du fonctionnement normal de la machine.

Dans une seconde étape, les défauts d'excentricité statique et dynamique ont été introduits dans le modèle afin d'évaluer leur influence sur la distribution du champ magnétique. Les simulations réalisées ont mis en évidence une modification significative de la répartition du flux magnétique dans l'entrefer, accompagnée d'une augmentation des dissymétries du champ. L'analyse spectrale du flux a également révélé l'apparition et l'amplification de composantes harmoniques spécifiques, directement liées à la présence du défaut. Ces composantes constituent des indicateurs pertinents pour la détection et la caractérisation de l'excentricité.

Enfin, une démarche de caractérisation du défaut d'excentricité statique a été mise en œuvre à travers la résolution d'un problème inverse visant à identifier les paramètres géométriques caractérisant l'excentricité. L'utilisation de la méthode d'algorithmes génétiques a permis d'estimer le décalage du rotor à partir des signatures du flux magnétique, démontrant ainsi la faisabilité de l'approche proposée pour l'identification du défaut.

L'ensemble des résultats obtenus confirme l'intérêt de l'analyse du flux magnétique comme outil de diagnostic non destructif des défauts d'excentricité dans les machines asynchrones. Cette approche permet non seulement de détecter la présence du défaut, mais également d'en évaluer l'importance à travers l'étude des signatures électromagnétiques associées.

Comme perspectives, ce travail pourrait être étendu à l'étude d'autres défauts affectant les machines asynchrones, tels que les ruptures de barres rotoriques, les courts-circuits entre spires ou les défauts de roulements. Il serait également intéressant d'intégrer des techniques avancées de traitement du signal et d'intelligence artificielle afin d'améliorer les performances de détection et de permettre la mise en place de systèmes de surveillance et de maintenance prédictive en temps réel.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] saVRee, "*Moteur Électrique à Induction (Cage d'Écureuil) Expliqué*"

[2] H. Saoula and R. Guidoum Bouziani, "*Diagnostic des défauts de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis*," Mémoire de Master, Département de Génie Électrique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider de Biskra, Biskra, *Algérie, 2019–2020*

[3] S. Lachtar, "*Contribution au diagnostic de la machine asynchrone commandée en vue de minimiser les efforts radiaux*," Thèse de Doctorat en Sciences, spécialité Commande électrique, Département de Génie Électrique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider de Biskra, Biskra, Algérie, soutenue *le 23 décembre 2020.*

[4] P. O'Donnell, *"Report of large reliability survey of industrial and commercial Installations, Part 1",* IEEE Transaction on Industry Applications, *Vol. IA,21, N° 4, aug. 1985, pp 853 – 864.*

[5] Allianz, *"Présentation des avaries. Machines électriques tournantes",* cahier des préventions. *CP2, 1988.*

[6] O.V. Thorsen, M. Dalva, *"A survey of fault on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries"*, IEEE Transactions on Industry Applications, *Vol.31, no.5, pp.1186-1196, September 1995.*

[7] W.T. Thomson, *"A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors: Past, present and future"* Proc. IEEE SDEMPED 1999 – Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp.3-18, Sep. 1999.*

[8] G. Salles, *" Surveillance et diagnostic des défauts de la charge d'un entraînement par machine asynchrone"* Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard Lyon1*, Janvier 1997.*

[9] M. F. Cabanas, M. G. Melero, J.G. Aleixandre et J. Solares*, "Shaft misalignment diagnosis of induction motors using current spectral analysis: A theoretical approach"* Proc. International Conference on Electrical Machines (ICEM), *pp 384-390, 10 - 12 September 1996.*

[10] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, *"Cause and analysis of stator and rotor failures in three- phase squirrel cage induction motors"* IEEE Transactions on Industry Applications, *Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.*

[11] S. Nandi, H. A. Toliyat, *"Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – a review"* IEEE Industry Applications Conference.Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, *Vol.1, pp.197-204, Phoenix, USA, 1999.*

[12] B. Raison, *"Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique"* Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, *Septembre 2000.*

[13] Naït-Saïd M.S., Benbouzid M.E.H. et Benchaid A., *"Detection of broken bars induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation"* IEEE Transactions on energy conversion, *Vol.15, no.1, pp. 66-70, Mars 2000.*

[14] N. M. Elkasabgy, A. R. eastham, G. E. Dawson, *"Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine"* IEEE Transactions on Industry Applications, *Vol.28, no.1, Part 1, pp. 165-171, Feb. 1992.*

[15] G. Didier, E. Ternisien, O. Caspary, H. Razik, *"A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis"*, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing (MSP), *vol. 21, n° 2, pp. 1127-1142, Feb.07.*

[16] Yahoui H., J. Seetohul, Grellet G., Jammal A., *"Detection of broken bar or end-ring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic torque through supply cable"*, Revue Européenne de Diagnostic et Sûreté de Fonctionnement, *Vol.5, no.4, 1995.*

[17] A. Bentounsi,*" On Line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motors Using FEM¨*, IEEE Transactions on Magnetics, *Vol. 34, No. 5, September 1998.*

[18] B. Atef, *"Modeling and simulation of static and dynamic eccentricity faults in induction*

motors", Université de Annaba*, Algérie, 2019*

[19] V. Kogan & B. Nindra. *"Investigation of high voltage stator winding vibrations in full- scale slot model"*. In Electrical Insulation Conference, *pages 155-166, Sept.1997.*

[20] G. M. Josipovic, J. Penman, *"The detection of inter-turn short circuits in the stator windingsof operating motors"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, *Vol.47, no.5, pp. 1078-1084, Oct. 2000.*

[21] J. S. Thomson, C. S. Kallesoe," Stator *fault modelling of induction motors"*, SPEEDAM Conferance, *2006.*

[22] *Belassel Atef "Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes"* Université Badji Mokhtar Annaba*, Algérie2019*

[23] N. Halem, *"Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en vue du diagnostic par la méthode des éléments finis",* Thèse de Doctorat, Université de Biskra, *Algérie, 2015*.

[24] A. Ghoggal*, "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée : modèle dédié à ladétection des défauts"*, mémoire de magister, Université de *Batna ,2005.*

[25] B. Atef, *"Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'une Machine Asynchrone par la Méthode d'Ondelettes"* MEMOIRE MASTER UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

[26] XU, X., HAN, Q. et CHU, F. (2018). *"A general electromagnetic excitation model for electrical machines considering the magnetic saturation and rub impact"*. Journal of Sound and Vibration*, Vol. 416, pp. 154-171*

[27] *N. Djamel et T. Elyamine, "Etude de Mantenance des Nachines Electriques Tournantes"* MEMOIRE MASTER UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF *M'SILA*

[28] ZHANG, P., DU, Y. et HABETLER, T.G. (2009). "*A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors*". IEEE Transactions on Industry Applications, *Vol. 45, No. 3, pp. 1075-1085.*

[29] Boughagha Fouzi, "*Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques*" MEMOIRE MASTER UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA *2019*

[30] D. Maquin, J. Ragot, "Diagnostic des systèmes linéaires». Editions Hermes, 2000. https://hal.science/hal-01007426 (Consulté le 26/04/2025).

[31] Docteur Bouras Abdelkrim Université Badji Mokhtar Annaba.

[32] M. KHEBAL, A. DALI, « contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques », Université de m'sila, mémoire de Master 2019.

[33] M. BOUDJERADA, B. TOUNSI, Contrôle Non Destructif (CND), *"Approche Expérimentale pour un Contrôle par Ondes ultrasonores et Radiographique"* Université Mohamed Boudiaf-M'sila, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique *2020.*

[34] R. Mouldi, cours de contrôle non destructif CND, Construction et Fabrication Mécanique, *125 pages, 2017.*

[35] La thermographie infrarouge : https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/thermo.PDF?IDR=456

[36] S. Boularand, Thermographie en maintenance, TSMI, Jean Dupuy- Tarbes, *2014.*

[37] A. Mouloud, *"Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires"*, thèse de doctorat, Université de Sétif, 2015.

[38] Omar DJEBILI ; *"Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement* ». Thèse de doctorat, Université De Reims Champagne Ardenne *2013*.

[39] Bolaers F, Dron J.P, Rasolofondraibe L, *"Prédiction et suivi de l'évolution d'un 134 écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire"*. XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, *2003*.

[40] BUI viet phuong *"Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide"* These pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INP Grenoble *Spécialité : « Génie Electrique » le 4 Octobre 2007.*

[41] Nassira FERKHA "*Diagnostic de pannes dans les installations electriques*" UNIVERSITE DE JIJEL Cours destiné aux : Etudiants du Master2 Electrotechnique industriel.

[42] HALL, John A. "*Magnetic field sensing using the Hall effect for electrical machine fault detection" Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE* Spécialité : « Génie Electrique » *le 15 Mars 2019.*

[43] LEE, Sang-*min "Application of Hall effect sensors for magnetic flux leakage diagnosis in induction motors"* Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INP Grenoble Spécialité : « Génie Electrique » *le 22 Juin 2015.*

[44] FEDIDA Vincent "*Etude des défauts des machines électriques tournantes par analyse du champ magnétique de fuite : Application au diagnostic de machines de faibles puissances dans un contexte de production en grande série*" *Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE* L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES Spécialité : « Génie électrique » *le 26 Avril 2017*

[45] CHADEBEC Olivier "Capteurs magnétiques à très haute sensibilité pour le diagnostic des machines électriques" *Thèse pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'INP GRENOBLE* Spécialité : « Matériaux et Génie Physique » le 18 Novembre 2011

[46] F. Costa, E. Labouré, and B. Revol, *"High frequency proximity losses determination for rectangular cross section conductors," HAL Open Science*, *2020*. [Online]. Available: https://hal.science/hal-03048101

[47] A. Allal, *"Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones, "* Magister thesis, Univ. Ferhat Abbas, Sétif, *Algeria, 2010.*

[48] H. Ayata and S. Bensadi, "*AI-Driven Index Recommendation for SQL Query Optimization in PostgreSQL Databases,"* Master's thesis, Univ. Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, Algeria, 2025.

[49] S. Benzahioul, *"Diagnostic des défauts dans les machines électriques, "* Ph.D. dissertation, *Univ. 20 Août 1955,* Skikda, Algeria. [Online]. Available: https://ftech.univ-skikda.dz/doc2/BENZAHIOUL.pdf

[50] J.J. Labarthe, Electromagnétisme, *Université Paris Sud, 2005*. http://www.lac.u-psud.fr, Laboratoire Aimé-Cotton.

[51] J-C. SABONNADIERE et J-L.COULOMB, Calcul des champs Electriques de l'ingénieur, Grenoble, *France, 1987.*

[52] H. BECHA, *"Modélisation des Phénomènes Electromagnétiques Couplés par la des Volumes Finis et de la Paramétrisation dans les Systèmes Amagnétiques de chauffage par Induction"*, thèse de Magister, Univ Biskra, *Algérie, 2001.*

[53] Z.Arab, N.Limani. *"Etude paramétrique d'une machine à aimants permanents par la méthode des éléments finis "* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, *2014.*

[54] S. Derouiche, M.D. Kahlat, *"Réduction des vibrations d'une machine électrique en agissant sur ses propriétés physique"* Diss, *université de jijel.2013.*

[55] [Hamdi, Seyf Eddine. *"Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOLMultiphysics." (2018).*

[56] Golovanov, C. (1997). *"Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique : application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement doctoral dissertation",* université politechnica Bucuvesti.

[57] S. Bourouaih .M. Hala, *" Etude de l'influense de l'emplacement des aimants dans le rotor sur le comportement vibratoire d'une MSAP à flux radail",* mémoire de master, *université de*

jijel.2016.

[58] Chapra, S. C., & Canale, R. P. *(2015).* Numerical Methods for Engineers. McGraw-Hill.

[59] Ogata, K. *(2010).* Modern Control Engineering. Prentice Hall.

[60] D. EUVRARD, *" Résolution numérique des équations aux dérivées partielles différences finis élément finis ",* Masson, paris, *France, 1987*

[61] S. J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Book, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, *1995*

[62] A. Lakhdari, *"Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures ",* mémoire de Master *2011.*

[63] E. Schaeffer. *"Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outils paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts".* Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, *1999.*

[64] Bishop, C. M. (*1995).* Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford University Press.

[65] TABET Seddik**,** "*Étude paramétrique du diagnostic de la machine asynchrone à cage*"**,** Thèse de Doctorat LMD en Génie Électrique**,** Université Mohamed Khider Biskra**,** Biskra

[66] Saludjian, L. "*Optimisations en électrotechnique par algorithmes génétiques*". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, *1997.*

[67] N. Saravanan, K.I. Ramachandran, *"A case study on classification of features by fast single-shot multiclass PSVM using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box ",* Expert Systems with Applications, *36, pp. 10854-10862, 2009.*

[68] S. Bourouaih .M. Hala, "*Etude de l'influense de l'emplacement des aimants dans le rotor sur le comportement vibratoire d'une MSAP à flux radail* ", mémoire de master, université *de Jijel.2016.*