

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohammed seddik Ben Yahia – Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études

*Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Electrotechnique*

Option : Electrotechnique Industrielle

Thème

***DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D'UNE
MSAP A FLUX RADIAL***

Encadré par :

Dr : Nassira Hacib-Ferkha

Présenté par :

M^{elle} : Imane Younsi

M^r : Hicham Benghedier

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements et dédicaces

Remerciements

« Le grand merci pour le bon dieu »

Ce mémoire sanctionne la fin de nos études à l'université de Jijel, pour l'obtention d'un diplôme de Master en Electrotechnique industrielle.

*Un spécial remerciement pour Madame: **Nassira Hacib-Ferkha** qui a proposé ce sujet de recherche, et qui nous a encadré et soutenu par ses conseils, sa compréhension et ses encouragements.*

Nous tenons aussi à présenter nos remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger notre modeste travail.

Et nous n'oublions pas tous les personnes qui nous ont aidés pour finaliser ce mémoire.

Nos plus vifs remerciements vont à tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous ne saurions terminer ces remerciements sans oublier nos familles ainsi que tous nos amis.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Le soleil qui m'a donné de la chaleur et qui a éclairé mon chemin : ma chère mère.

Celui qui a une réputation parfumée et une pensée éclairée : mon père al-habibe.

Mes chers frères : Haroun, Moussa, Chouaibe, Soufiane, Lokmane et Ibrahim.

ET mes chères sœurs : Asma et Oumaima.

Je le dédie aussi à :

Toute ma famille,

Tous mes amis avec qui j'ai partagé mes souvenirs durant tous mes parcours d'étude.

"" Imane ""



Dédicace



Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de science et de la connaissance, aussi le courage et la volonté pour mener à bien ce travail.

Je dédie ce travail à :

A la lumière de mes yeux et aux ailes de mes voltiges, A la femme qui m'a porté toute ma vie et qui m'enveloppée de gentillesse, A la femme la plus extraordinaire et la plus douce du monde : ma mère, j'exprime mon profond amour.

A celui qui a été et qui est toujours pour moi le modèle, la référence : mon père ; je lui exprime mon profond respect et j'espère que j'ai été à la hauteur, Ma joie est que tu sois fier de moi.

Ils n'ont jamais cessés de me chérir et me soutenir durant toutes mes années d'études. Je leur dis merci et que dieu vous garde.

A mes chers frères : Mourad, Djalal, Oussama et Taher,

A mes chères sœurs : Ahlame, Naziha, Asmaa et Ikram,

Sans oublier la femme de mon frère, que Dieu la protège ainsi que toute la famille nchallah.

A mes amis du la city,

A mon binome,

À tous mes amis du cours, veuillez accepter mon expression de gratitude pour votre amitié et vos encouragements. Et à tous ceux qui m'ont apporté d'aide de près où de loin.

""Hicham""

Résumé-Abstract-ملخص

ملخص

تعالج هذه المذكرة تشخيص الاعطاب ومختلف الطرق والتقنيات المستعملة في اكتشافها على مستوى الآلات الكهربائية وبالأخص الآلات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم , قمنا بدراسة الآلة عبر عمل محاكات بطريقة العناصر المنتهية في بيئة MATLAB , كما واطهرت النتائج نجاعة في اظهار مختلف الاعطاب (ميكانيكية وكهربائية).

Résumé

Ce mémoire traite le diagnostic des défauts ainsi que les différentes méthodes et techniques utilisées pour leur détection au niveau des machines électriques, notamment des machines synchrones à aimants permanents. Nous avons étudié la machine en simulant la méthode des éléments finis dans l'environnement MATLAB. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la technique choisit pour la detection de divers défauts (mécaniques et électriques).

Summary

This thesis deals with the diagnosis of faults and the different methods and techniques used for their detection in electrical machines, in particular synchronous machines with permanent magnets. We have studied the machine by simulating the finite elements method in the MATLAB environment. The obtained results have shown the efficiency of the proposed method in detecting various defects (mechanical and electrical).

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....01

Chapitre I

Défauts d'une machine synchrone à aimants permanents: Etat de l'art

Introduction.....03

I.1. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents.....03

I.2. Principe de fonctionnement de la MSAP.....04

I.3. Différents types de MSAP.....05

I.4. Avantages et inconvénients des MSAP.....05

I.5. Aimants permanents.....06

I.6. Défauts dans les machines électriques.....07

 I.6.1. Défauts rotoriques.....09

 I.6.1.1. Défauts des aimants09

 I.6.1.2. Défaut d'excentricité.....10

 I.6.1.3. Défauts de roulements.....11

 I.6.2. Défauts statoriques.....12

 I.6.2.1. Défaut d'isolant dans un enroulement.....13

 I.6.2.2. Défaut de court-circuits statoriques14

I.7. Importance de la surveillance des MSAP.....14

Conclusion.....15

Chapitre II

Diagnostic de défauts dans les machines électriques et leurs techniques de détection

Introduction16

II.1. Diagnostic appliqué aux systèmes industriels16

II.2. Diagnostic des machines électriques18

 II.2.1. Etat de l'art des méthodes de diagnostic.....18

 II.2.1.1. Types de maintenance.....18

II.2.1.2. Types de diagnostic.....	19
II.2.2. Diagnostic appliqué aux machines électriques.....	21
II.2.2.1. Grandeurs à analyser	21
II.2.2.2. Nécessités et approches du diagnostic	22
II.3. Techniques de diagnostic des machines électriques.....	24
II.3.1. Techniques mécaniques et chimiques	24
II.3.1.1. Diagnostic par mesure des vibrations.....	24
II.3.1.2. Diagnostic par la mesure de la température	26
II.3.1.3. Diagnostic par l'analyse des lubrifiants	26
II.3.2. Techniques magnétiques et électriques	27
II.3.2.1. Diagnostic par mesure du flux axial de fuit.....	27
II.3.2.2. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites.....	29
II.3.2.3. Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	29
II.3.2.4. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée.....	31
II.3.2.5. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique.....	31
Conclusion.....	31

Chapitre III

Calcul du champ électromagnétique

Introduction.....	32
III.1. Outils de calcul du champ électromagnétique.....	32
III.1.1. Equations de Maxwell et lois de comportement.....	32
III.1.2. Conditions de passage.....	34
III.1.3. Hypothèses simplificatrices.....	34
III.1.4. Formulations électromagnétiques.....	36
III.1.4.1. Formulation magnétostatique.....	36
III.1.4.2. Formulation magnétodynamique.....	37
III.2. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles.....	39
III.2.1. Méthodes analytiques.....	39
III.2.2. Méthodes semi-analytiques.....	39
III.2.2.1. Méthode des intégrales de frontières (MIF).....	40
III.2.2.2. Méthode des circuits couplés (MCC).....	40

III.2.3. Méthodes numériques.....	40
III.2.3.1. Méthode des différences finis (MDF).....	40
III.2.3.2. Méthode des volumes finis (MVF).....	40
III.2.3.3. Méthode des éléments finis (MEF).....	41
Conclusion.....	42

Chapitre IV

Modélisation et diagnostic des défauts d'un MSAP à flux radial

Introduction	43
IV.1. Objectif de l'étude.....	43
IV.2. Présentation de la machines à étudier.....	44
IV.2.1. Géométrie.....	44
IV.2.2. Caractéristiques.....	44
IV.2.3. Création des régions.....	45
IV.3. Modélisation de la MSAP à étudier.....	46
IV.3.1. Résultats et interprétations.....	48
IV.4. Diagnostic des défauts de la MSAP.....	49
IV.4.1. Diagnostic de défauts mécaniques par analyse du flux électromagnétique.....	51
IV.4.1.1. Défaut de fissure dans le stator.....	51
IV.4.1.2. Défaut d'aimant décalé.....	52
IV.4.2. Diagnostic de défauts électriques par analyse du flux électromagnétique.....	54
IV.4.2.1. Défaut de perméabilité relative du stator non homogène.....	54
IV.4.2.2. Défaut de source d'alimentation déséquilibrée.....	56
Conclusion.....	57
Conclusion général.....	58
Références bibliographiques.....	59

Listes des figures

Listes des figures

Chapitre I

Etat de l'art et défauts d'une machine synchrone à aimants permanents : Généralités

Figure I.1. Machine synchrone à aimants permanents	04
Figure I.2. Stator et rotor d'une MSAP.....	04
Figure I.3. Différentes structures rotoriques pour une MSAP	05
Figure I.4. Niveaux énergétiques des différents aimants.....	07
Figure I.5. Evolution de la densité d'énergie (BH) max des aimants permanents	07
Figure I.6. Problématique des défauts dans les MSAP	08
Figure I.7. Point limite de désaimantation réversible.....	09
Figure I.8. Evolution de l'aimantation rémanente avec la température.....	10
Figure I.9. Rotor parfaitement aligné au stator.....	11
Figure I.10. Types d'excentricités statiques (a), dynamique (b) et mixte (c).....	11
Figure I.11. Vue éclatée d'un roulement à billes.....	12
Figure I.12. Représentation des différents défauts statoriques possible.....	13
Figure I.13. Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statorique.....	14

Chapitre II

Diagnostic de défauts dans les machines électriques et leurs techniques de détection

Figure II.1. Etapes du diagnostic d'un système industriel.....	17
Figure II.2. Chaîne d'acquisition.....	17
Figure II.3. Méthodes de diagnostic.....	20
Figure II.4. Points de mesures.	22

Listes des figures

Figure II.5. Machine asynchrone avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique..	25
Figure II.6. Image visible et image thermique d'un moteur électrique entraînant une pompe dans la salle des machines d'un bateau.	26
Figure II.7. Ensemble des flux dans une machine asynchrone comme exemple.....	28
Figure II.8. Positions des capteurs qui utilisent pour la détection des champs Radial et Axial.....	28
Figure II.9. schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	30
Figure II.10. Spectre du courant statorique (résultats expérimentaux) Cas d'un moteur asynchrone.....	30

Chapitre III

Calcul du champ électromagnétique

Figure III.1. Domaine d'étude	36
Figure III.2. Domaine d'étude borné	38

Chapitre IV

Modélisation et diagnostic des défauts d'une MSAP à flux radial

Figure IV.1. Configuration géométrique de la MSAP à étudier.....	44
Figure IV.2. Régions constituant la machine synchrone à aimants insérés.....	46
Figure IV.3. Organigramme du code de calcul développé.....	47
Figure IV.4. Maillage éléments finis adopté à cette étude.....	47
Figure IV.5. Lignes équipotentiels du potentiel vecteur magnétique.....	48
Figure IV.6. Evolution du potentiel vecteur magnétique suivant un contour dans l'entrefer	48
Figure IV.7. Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer.....	49

Listes des figures

Figure IV.8. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer.....	49
Figure IV.9. Procédure du diagnostic des défauts dans une MSAP par analyse du flux électromagnétique.....	50
Figure IV.10. Maillage de la MSAP en présence de défaut de fissure dans le stator.....	51
Figure IV.11. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer en présence d'un défaut de fissure dans le stator.....	52
Figure IV.12. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence d'une fissure dans le stator.....	52
Figure IV.13. Maillage éléments finis de la MSAP avec aimant décaler	53
Figure IV.14. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer dans le cas d'un défaut d'aimant décalé.....	53
Figure IV.15. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence de défaut d'aimant décalé.....	54
Figure IV.16. Portion du stator là où il y a un défaut de perméabilité relative.....	54
Figure IV.17. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer dans le cas d'un défaut de perméabilité relative du stator.....	55
Figure IV.18. Contenu spectral du flux électromagnétique dans les deux cas : machine saine et en présence d'un défaut de perméabilité relative du stator.....	55
Figure IV.19. Evolution du flux électromagnétique dans l'entrefer dans le cas d'une source d'alimentation déséquilibrée.....	56
Figure IV.20. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence de défaut de déséquilibre de la source.....	57

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1. Défaits des machines électriques selon leurs origines08
Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine à étudiée.....45

Introduction générale

Introduction générale

Le monde de l'industrie est de plus en plus confronté à la sûreté de fonctionnement de ses dispositifs de production causés par des multiples défaillances. Cette demande en termes de sûreté est motivée par les impératifs de production.

En ces dernières années les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont utilisées de plus en plus dans les applications industrielles comme : l'automobile, l'aéronautique, la robotique ou encore le transport ferroviaire. Par rapport à leur présence grandissante dans des domaines toujours plus diversifiés, ce type d'actionneur est confronté à des problèmes de vieillissement et de défaillances qui prennent une large part dans les contraintes d'exploitations [1].

En effet, les MSAP possèdent généralement, à un volume donné, des meilleures caractéristiques que leurs homologues à courant continu, asynchrones et synchrones classiques comme : couples massiques plus élevés, bons rendements, bonnes durées de vies, performances dynamiques élevées, gammes de vitesse de fonctionnement importantes. Ces caractéristiques les rendent bien adaptées aux applications où la masse, l'encombrement et le rendement sont des importants critères [1].

A cause du vieillissement des matériaux magnétiques, des défauts de fabrication et des opérations intermittentes, plusieurs types de défauts sont inévitables dans les machines électriques et peuvent intervenir dans leurs organes de mesure (capteurs) et de commande (actionneurs et convertisseurs) ou leurs différents composants (stator ou rotor) [1].

Lorsqu'un défaut se produit et que la machine tombe en panne, le résultat pourrait être, au mieux, une interruption ou même une perte de la chaîne de production ou bien, au pire, catastrophique pour le procédé et les humains. Pour cela il est nécessaire de bien caractériser les défauts surveillés [1].

Les défauts peuvent être de natures différentes et posséder de ce fait des vitesses d'évolution très différentes, comme exemple on peut citer les défauts de nature électrique et mécanique. Pour ces deux défauts, les premiers présentent des dynamiques d'évolution très rapides alors que les seconds sont généralement à dégradation plutôt lente. Alors les

techniques pour mettre en œuvre et pour satisfaire les exigences liées à leur détection seront de ce fait aussi très différentes. Pour ce fait, les constructeurs et les utilisateurs des machines électriques sont partis chercher également des améliorations dans le domaine du diagnostic de défauts afin de répondre à ces nouveaux enjeux. Actuellement, l'analyse des grandeurs mesurables issues des capteurs, et surtout les signaux vibroacoustiques, combinée à une méthode automatique de surveillance est la démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts dans les machines tournantes [1].

Dans ce travail de fin d'études, on va s'intéresser à la modélisation et au diagnostic des défauts dans les machines synchrones à aimants permanents. Dans le but de présenter cette étude, ce mémoire va être divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous fournirons quelques généralités sur les machines synchrones à aimants permanents et montrerons les différents types de défauts pouvant survenir dans ces machines.

Le deuxième chapitre sera consacré à donner un aperçu sur le diagnostic des défauts des systèmes et des machines électriques et à présenter les différentes techniques utilisées dans le diagnostic des machines électriques, selon la nature des défauts.

Les différentes formulations permettant de traduire le comportement de tous les systèmes électromagnétiques ainsi que les différentes méthodes de résolution de ces formulations vont faire l'objet du troisième chapitre. On va viser plus particulièrement, la méthode des éléments finis et son emploi en électrotechnique pour la modélisation des dispositifs électromagnétiques.

Dans le dernier chapitre, on va exploiter les différents modèles développés en les appliquant dans le cas d'une machine synchrone à aimants permanents à aimantation radiale.

Enfin, nous clôturons ce travail de mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Défauts d'une machine synchrone à aimants permanents : Etat de l'art

Chapitre I

Défauts d'une machine synchrone à aimants permanents : Etat de l'art

Introduction

Tenant compte de la compacité de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et de l'absence de pertes au rotor, on utilise ces machines de plus en plus dans les systèmes embarqués et dans bon nombre d'applications. Il est alors là nécessaire de prévoir une possibilité de fonctionnement dégradé en présence de défauts survenu dans l'un des éléments de la machine de conversion électromécanique d'énergie.

Nous présentons, tout d'abord, dans ce chapitre des généralités sur les machines synchrones à aimants permanents. Ensuite, nous exposons un état de l'art sur le traitement des défauts dans ces machines. Les défauts les plus courants vont être cités avec une brève description. Les conditions d'apparition et les impacts de ces défauts sur les performances électromagnétiques des machines vont être également exposés [2].

I.1. Présentation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor [3]. Les deux figures ci-dessous présentent des images de deux machines synchrones à aimants permanents [4] [5].

- **Le stator** : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [6].
- **Le rotor** : ou inducteur est la partie mobile de la machine, il se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant

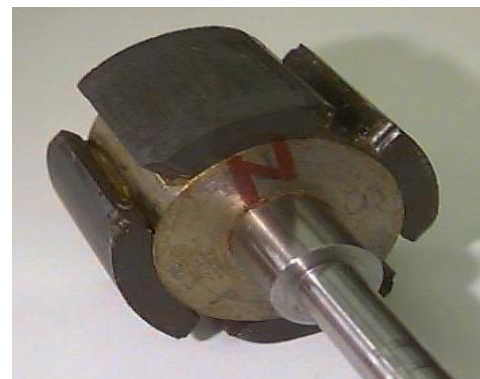
d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique [7].



Figure I.1. Machine synchrone à aimants permanents



a. Stator



b. Rotor

Figure I.2. Stator et rotor d'une MSAP

I.2. Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelée machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique statorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Pour la MSAP le champ rotorique est généré par des aimants permanents [8].

En fonctionnement génératrice de la MSAP, le rotor est entraîné à la vitesse de synchronisme, dans ce cas un système de courants triphasés va être généré dans les enroulements statoriques. Tandis qu'en fonctionnement moteur, le stator doit être alimenté

par une source triphasée. Il produit ainsi un champ qui entraîne le rotor à la vitesse de synchronisme.

I.3. Différents types de MSAP

Selon le type du rotor on distingue deux grandes catégories de MSAP à savoir:

- ✓ Machine synchrone avec aimants en surface (MSAS) où les aimants permanents sont fixés à la surface du rotor.
- ✓ Machine synchrone avec aimants à l'intérieur (MSAI) où les aimants permanents sont montés à l'intérieur du rotor.

Une MSAI a une plus forte résistance mécanique qu'une MSAS, car les aimants de MSAS ont besoin d'être fixés sur la surface du rotor. Par rapport au comportement magnétique, le rotor du MSAS est symétrique tandis que le rotor du MSAI est asymétrique. Ainsi, les inductances statoriques du MSAI ne varient pas avec la position du rotor. Par contre, les inductances du MSAS varient en fonction de la position du rotor ce qui crée une saillance géométrique du rotor. Cette saillance est très utile pour le contrôle du moteur à basse vitesse [9]. La figure ci-dessous présente différentes structures rotoriques pour une MSAP [10].

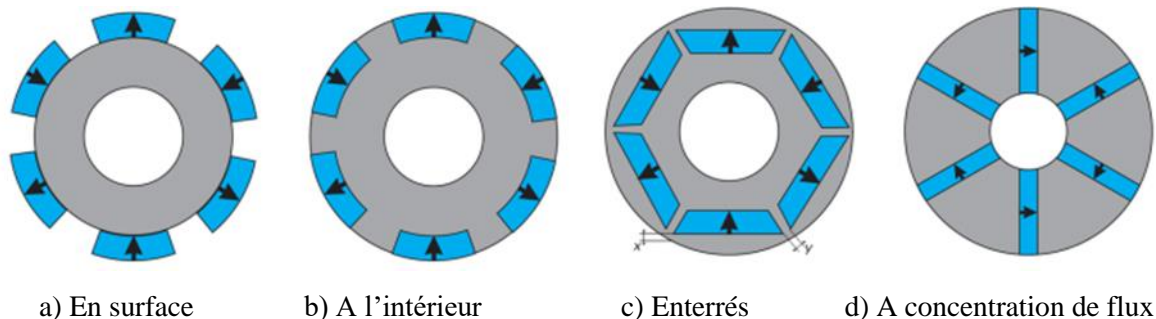


Figure I.3. Différentes structures rotoriques pour une MSAP

I.4. Avantages et inconvénients des MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines :

- ✓ Puissances massiques élevées,
- ✓ Absence de contacts glissants,
- ✓ Un bon rendement,
- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue,

- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage,
- ✓ Fonctionnement en survitesse.

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petits moteurs) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement moteur) [11].

Comme inconvénients de la MSAP on peut citer :

- ✓ Technologie coûteuse liée au coût des aimants,
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure,
- ✓ Ondulations de couple.

I.5. Aimants permanents

L'apparition de nouveaux types d'aimants permanents, dans les années 80, a permis de rendre les MSAP compétitives par rapport aux autres types de machines électriques. Ces nouveaux aimants, appelés « terres rares », sont composés soit de Samarium-Cobalt (SmCo), soit de Néodyme-Fer-Bore (NdFeB). Ils possèdent une densité d'énergie bien plus importante que les autres types d'aimants (ferrite ou AlNiCo) les rendant ainsi beaucoup plus performants (Figure I.4) [12]. Bien que possédant une densité d'énergie plus élevée que les aimants de type SmCo, les aimants de type NdFeB présentent le désavantage d'avoir une faible tenue en température (160°C pour NdFeB contre 350°C pour SmCo) [13].

Ainsi, la nature des aimants utilisés dépendra fortement de l'application. Pour une machine à faible puissance et faible coût, le choix se portera plutôt sur des aimants de type « ferrite », alors que pour une machine à forte puissance, les aimants de type NdFeB ou SmCo (pour des applications à haute température) seront préférés. La figure I.5 présente l'évolution de la densité d'énergie $(BH)_{\max}$ des aimants permanents au cours des années [14].

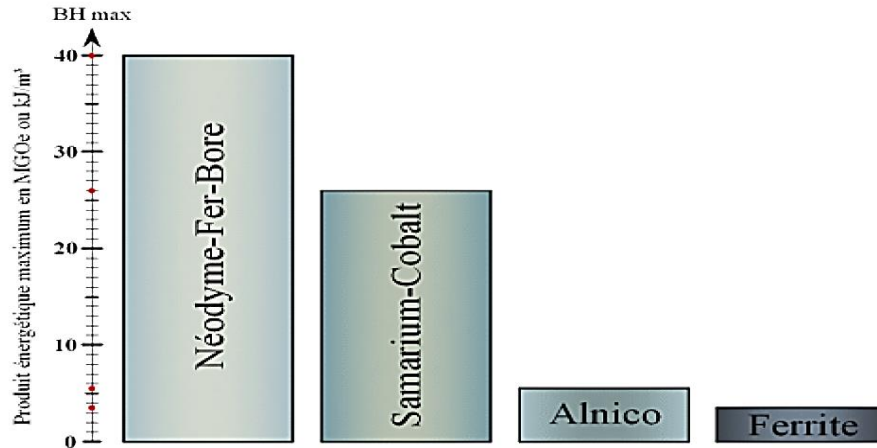


Figure I.4. Niveaux énergétiques des différents aimants

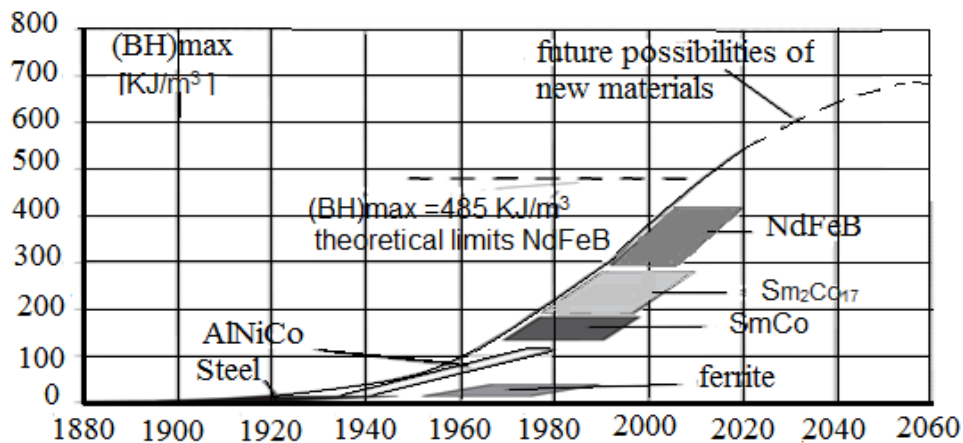


Figure I.5. Evolution de la densité d'énergie $(BH)_{max}$ des aimants permanents

I.6. Défauts dans les machines électriques

Une défaillance dans une machine électrique représente tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les raisons de défaillances dans les machines tournantes électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, nature de la charge et le calendrier de maintenance.

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

Le tableau I.1 présente une classification des défauts qui peuvent exister dans les machines électriques selon leurs origines [15].

Tableau I.1. Défauts des machines électriques selon leurs origines

Défaillances des machines électriques	Internes	Mécaniques	Contact entre le stator et le rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvement des enroulements et des tôles
		Électriques	Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barres
	Externes	Mécaniques	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnementales	Défaut de montage
			Humidité et température
		Électriques	Propreté
Fluctuation de la tension			
Sources de tension déséquilibrées			
			Réseau bruité

Les principaux défauts des MSAP peuvent être regroupés en deux catégories principales [7] :

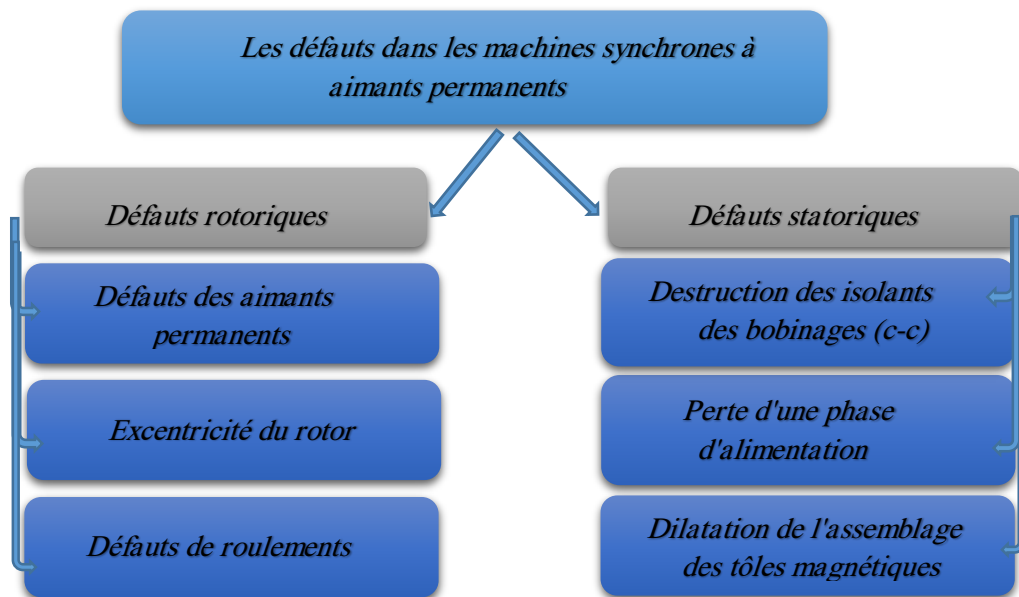


Figure I.6. Problématique des défauts dans les MSAP

I.6.1. Défauts rotoriques

Les défauts rotoriques peuvent être présentés sous forme de défauts d'excentricité du rotor, de défauts des aimants permanents et de défauts de roulements.

I.6.1.1. Défauts des aimants

Les moteurs à aimants permanents contiennent un rotor équipé d'aimants permanents. Ces derniers sont soit montés sur la surface du rotor ou intégrés, comme montré sur la figure I.3. La présence des aimants dans le rotor produit un flux rotorique constant. Toutefois, ce flux peut varier sous l'influence de nombreux facteurs tels que la réaction d'induit et la température. Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés avec une tension, le champ créé s'oppose au champ produit par les aimants.

Dans des conditions normales le point de fonctionnement peut évoluer et traverser le point limite de désaimantation réversible (figure I.7) [16].

Ce phénomène peut se produire lors des applications brutales de charge ou en cas de défaut de court-circuit des enroulements statoriques. Une fois produite, la réduction irréversible de l'induction rémanente B_r de l'aimant réduit de façon permanente les performances de la machine.

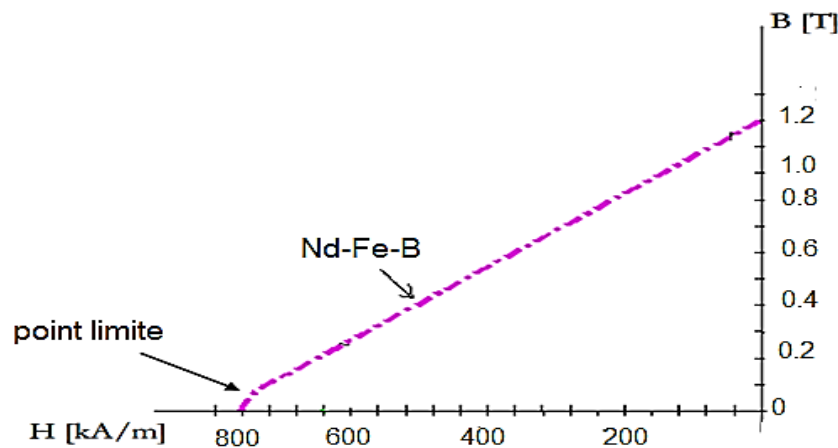


Figure I.7. Point limite de désaimantation réversible

Les températures élevées de fonctionnement réduisent aussi l'induction rémanente. La figure I.8 montre la variation de B_r avec la température [16].

En plus de la diminution de la force magnétique de l'aimant en raison de la réaction d'induit ou de la température, il est également connu que certains aimants (comme NdFeB) peuvent se détériorer par désintégration. Les fissures qui se forment lors de la fabrication

peuvent conduire à la désintégration à grande vitesse. La désintégration entraîne la perturbation du flux dans l'entrefer causant ainsi le déséquilibre de l'attraction magnétique entre le rotor et le stator. Ceci engendre des vibrations et des contraintes sur les roulements [16].

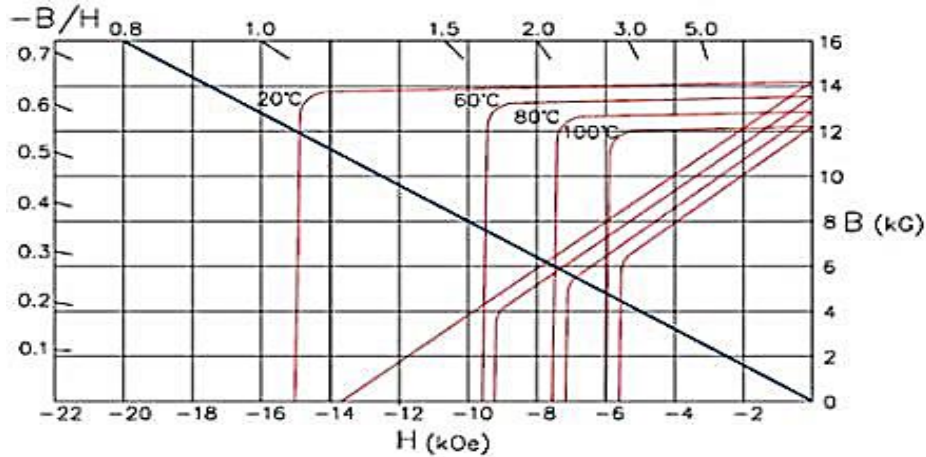


Figure I.8. Evolution de l'aimantation rémanente avec la température

I.6.1.2. Défaut d'excentricité

Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator, comme illustré dans la figure I.9 [22]. Toutefois, les conséquences des défauts mécaniques peuvent se manifester au niveau de l'entrefer par un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple [27]. Ce phénomène est appelé excentricité défini comme une asymétrie dans l'entrefer entre le stator et le rotor [17] [18]. Ce défaut existe en général dans la machine, mais avec un faible niveau, dès sa fabrication et évolue avec le temps. Certains utilisateurs et fabricants spécifient un niveau d'excentricité maximal admissible de 5% alors que d'autres permettent un niveau maximal de 10% de la largeur de l'entrefer [19]. Selon [20], tout niveau d'excentricité supérieur à 60% nécessite une intervention immédiate afin d'éviter un frottement entre le rotor et le stator, ce qui peut mener à une panne très grave de la machine.

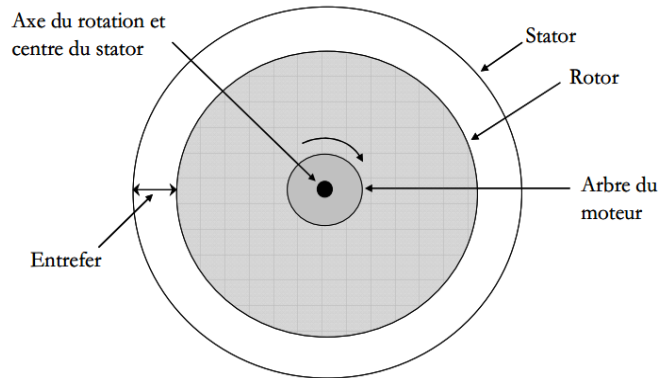


Figure I.9. Rotor parfaitement aligné au stator

Trois catégories d'excentricité peuvent être identifiées dans la littérature et sont illustrées dans la figure I.10 [21] :

- **Excentricité statique** : le rotor est déplacé du centre de l'alésage du stator mais il tourne toujours autour de son axe. Elle est due généralement soit à une imperfection de l'alésage du stator, soit à un mauvais positionnement du rotor ou du stator à l'étape de mise en service.
- **Excentricité dynamique** : le rotor est positionné au centre de l'alésage du stator mais il ne tourne plus autour de son axe. Ce type peut être provoqué par divers facteurs tels que l'usure des roulements, les résonances mécaniques à la vitesse critique et le désalignement.
- **Excentricité mixte** : la combinaison des deux cas cités précédemment.

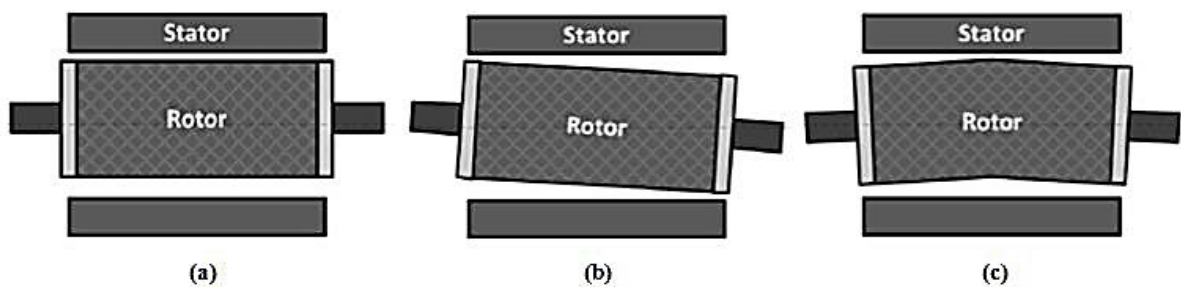


Figure I.10. Types d'excentricités : a) statique, b) dynamique et c) mixte

I.6.1.3. Défauts de roulements

En raison de la forte dépendance des moteurs aux roulements, il est difficile d'imaginer l'état d'avancement des machines tournantes modernes sans tenir compte de la large implication des roulements. Les défaillances de roulements peuvent représenter entre 42% et 50% de l'ensemble des défaillances des moteurs. Le coût des roulements se situe

entre 3 et 10% du coût réel du moteur. En outre, les coûts cachés générés dans les temps d'arrêt et la perte de production font que la défaillance de roulement soit plutôt une anomalie coûteuse [22] [23].

La majorité des machines électriques utilisent un roulement du type billes. Chacun de ces roulements se compose de deux anneaux appelés l'intérieur et l'extérieur des anneaux. Les défauts des roulements pourraient se manifester comme des défauts d'asymétrie du rotor, qui sont généralement inclus dans la catégorie des défauts d'excentricité. Sinon, des défauts de roulements à billes qui peuvent être classés comme défauts d'anneau extérieur, défauts d'anneau intérieur et les défauts des billes (figure I.11) [24].

Les contraintes agissant sur un roulement peuvent conduire à l'excès de bruit par rapport au fonctionnement régulier. De ce fait les vibrations mécaniques se développent et l'usure du roulement augmente. Si ces contraintes sont prises en compte dans la phase de conception, une défaillance prématurée pourra être évitée. Par contre, lorsque ces contraintes dépassent la capacité du roulement, sa durée de vie peut être considérablement diminuée et sa défaillance pourrait se produire à tout moment.

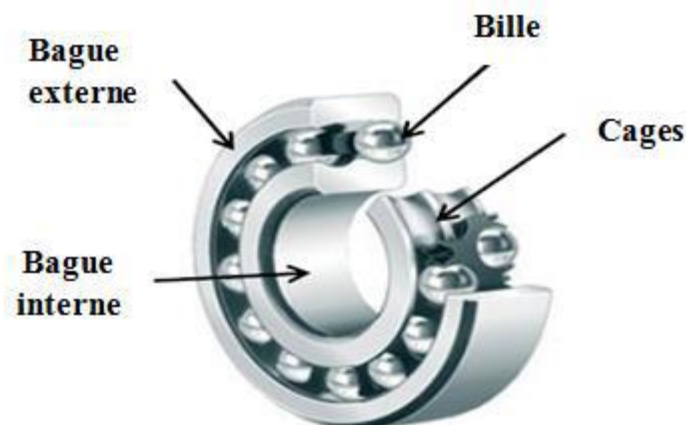


Figure I.11. Vue éclatée d'un roulement à billes

I.6.2. Défauts statoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit : défaut d'isolant, court-circuit entre spires, court-circuit entre phases, court-circuit entre phases et bâti, déséquilibre d'alimentation et défauts de circuit magnétique. La figure I.12 montre les différents défauts statoriques possibles [25].

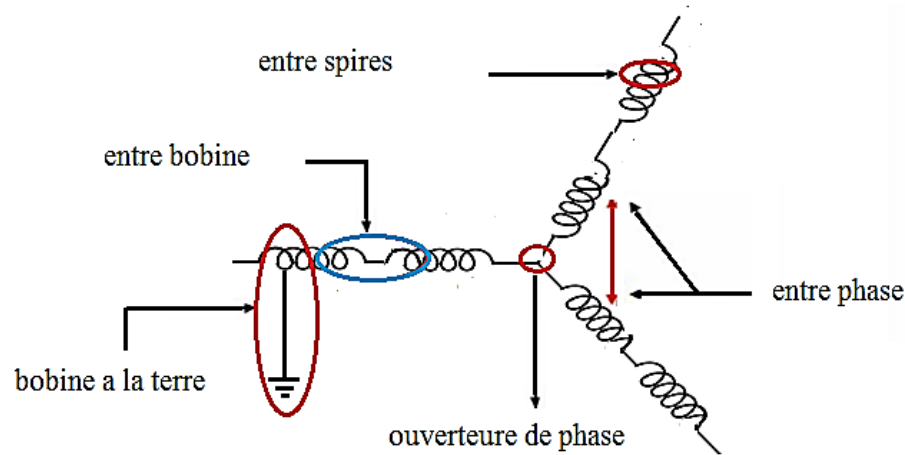


Figure I.12. Représentation des différents défauts statoriques possibles

I.6.2.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-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. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

Les différentes causes de ce type de défauts sont [26] :

- ✓ dégradation de l'isolant à la fabrication,
- ✓ tension de l'enroulement supérieur 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,
- ✓ 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.

I.6.2.2. Défauts de court-circuits statoriques

Les court-circuits au niveau des enroulements statoriques font partie des défauts électriques les plus fréquemment rencontrés dans les machines électriques. Ces défaillances sont provoquées par une dégradation des matériaux isolants recouvrant les conducteurs et leur principales origines sont : Contraintes électriques, contraintes mécaniques, contraintes thermiques et contraintes environnementales [27].

Par rapport à la topologie des stators, les défauts pouvant survenir au sein du bobinage statorique sont : court-circuit inter-spines, court-circuit interphases, court-circuit phase-neutre, court-circuit phase-masse et court-circuit biphasé. La figure I.13 présente un exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques.



Figure I.13. Exemple de dégâts provoqués par les défauts de court-circuit statoriques

I.7. Importance de la surveillance des MSAP

Du fait de leurs qualités, les MSAP sont de plus en plus utilisées dans des applications critiques de hautes performances. Dans ce contexte, la détermination de leur état de santé prend une grande importance. Comme nous l'avons déjà évoqué, les défauts de court-circuit sont souvent précurseurs de défaillances très graves [28] [2].

De plus, ces défauts présentent la particularité d'être auto-entretenus par les aimants du rotor qui impliquent la présence permanente d'une source d'excitation. Ainsi, si un défaut apparaît au cours du fonctionnement, isoler la machine de son dispositif d'alimentation ne suffit pas à garantir sa mise en sécurité. Ces défauts ne peuvent donc pas

être maîtrisés tant que la machine développe des forces électromotrices, c'est à dire tant qu'elle est en rotation.

Cela peut conduire à des situations critiques pour la machine elle-même (risques de destruction du bobinage par exemple), mais également pour toute l'installation électrique. Donc le diagnostic des machines électriques est indispensable pour la prévention de leurs défaillances et pour éviter l'occurrence de situations catastrophiques dans les installations électriques.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de quelques généralités sur la machine synchrone à aimants permanents. Donc, nous avons présenté le principe de fonctionnement de la MSAP, ses différents types ainsi que ses avantages et ses inconvénients. De plus, nous avons donné un aperçu sur les différents types de défauts dans les machines électriques en général et dans les MSAP en particulier.

Chapitre II

Diagnostic de défauts dans les machines électriques et leurs techniques de détection

Chapitre II

Diagnostic de défauts dans les machines électriques et leurs techniques de détection

Introduction

La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels, pourtant le diagnostic demeure encore un domaine où de nombreuses avancées restent encore à réaliser.

Le but de ce chapitre est de présenter les méthodes ainsi que les techniques de diagnostic des machines électriques, associées aux stratégies de maintenance, envisageables dans un environnement industriel. Parmi les méthodes de diagnostic existantes, nous nous attarderons plus précisément sur les méthodes basées sur l'analyse fréquentielle des grandeurs "mesurables" qui sont couramment utilisées par la communauté du génie électrique.

II.1. Diagnostic appliqué aux systèmes industriels

Le diagnostic des systèmes industriels nécessite un certain nombre d'étapes. Ces dernières sont résumées dans la figure II.1 [29].

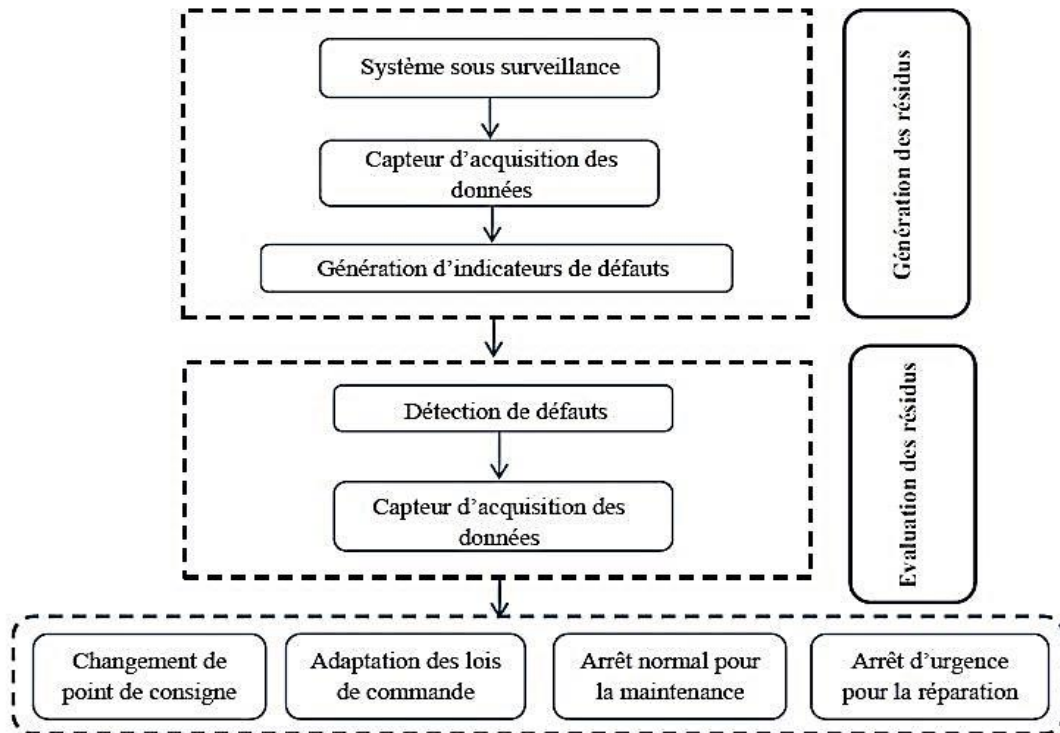


Figure II.1. Étapes du diagnostic d'un système industriel

• Acquisition de données

La procédure de diagnostic nécessite de disposer d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Cette étape implique l'utilisation de capteurs permettant de mesurer les différentes grandeurs de processus. La chaîne d'acquisition est donnée dans la figure ci-dessous.

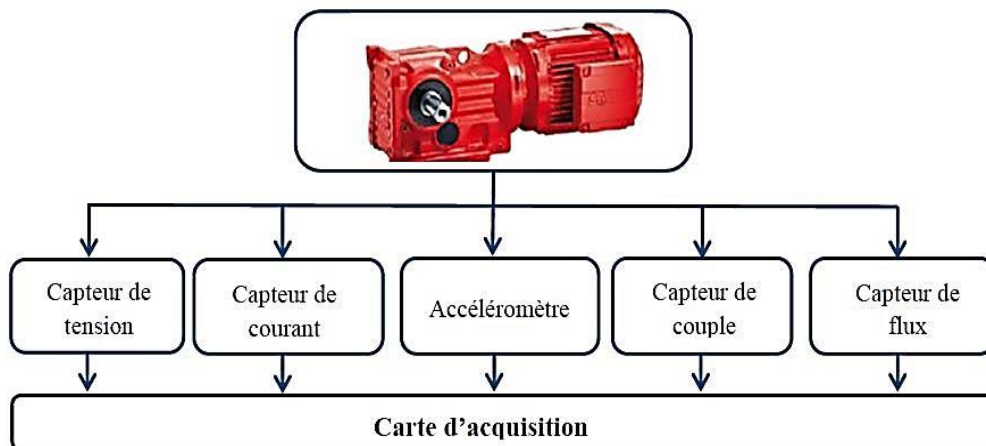


Figure II.2. Chaîne d'acquisition

- **Elaboration d'indicateurs de défauts**

Il s'agit à partir des mesures réalisées, d'élaborer des indicateurs permettant de mettre en évidences les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système.

- **Détection de défauts**

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve dans un état de fonctionnement normal ou non.

- **Localisation de défaut**

L'étape de diagnostic consiste à analyser les données issues de la surveillance (détection) pour tenter à identifier et localiser la ou les causes probables de la défaillance.

- **Prise de décision**

Dans cette étape, il s'agit de décider de la marche à suivre afin de conserver les performances souhaitées du système sous surveillance. Cette prise de décision doit permettre de générée les actions correctrices nécessaires à un retour au fonctionnement normal de l'installation [29].

II.2. Diagnostic des machines électriques

Les dispositifs électromécaniques et les machines électriques en particulier jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. Assurer la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci est une tâche fondamentale. Il est donc nécessaire de développer des systèmes permettant de détecter (surveillance) et d'évaluer (diagnostic) l'état de santé de ces dispositifs.

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps nous intéresser aux méthodes de diagnostic dans leur ensemble, puis focaliser nos propos sur les machines électriques [30].

II.2.1. Etat de l'art des méthodes de diagnostic

II.2.1.1. Types de maintenance

Les différents types de maintenance utilisés dans les applications industrielles dépendent principalement du niveau de criticité du système considéré. Plus la criticité est importante, plus les moyens et donc le coût associé seront élevés. On distingue : la maintenance préventive et la maintenance corrective [31].

La maintenance préventive consiste à changer les systèmes à date fixe prédéterminée. L'intervention s'effectue avant l'apparition des défauts.

La maintenance corrective s'effectue après défaillance. L'évaluation du système est réalisée fréquemment grâce à une instrumentation supplémentaire. Notons que plus cette évaluation est fréquente plus les coûts d'immobilisation du système seront réduits. C'est dans le cadre de la maintenance corrective que l'utilisation de méthodes de diagnostic devient fondamentale. En effet, plus le diagnostic sera précis, plus l'intervention sera courte [30].

Actuellement, pour des raisons financières, les industriels s'orientent de plus en plus vers la maintenance prédictive.

II.2.1.2. Types de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer en trois grandes familles (voir figure II.3) : la méthode de redondance matérielle, la méthode de redondance analytique et la méthode heuristique.

La méthode de redondance matérielle est associée aux systèmes très critiques où la moindre panne est inenvisageable (centrales nucléaires, aérospatiale, transport aérien,...). Il s'agit de multiplier les systèmes pour que, dans le cas d'une défaillance de l'un, un autre prenne immédiatement le relais. Si l'un des systèmes a un comportement trop éloigné des autres, il est exclu de l'ensemble. Cette approche est pertinente, par exemple, pour des mesures effectuées par un réseau de capteurs. Ce type d'approche est évidemment très cher à mettre en œuvre. La méthode de redondance [30]

La méthode de redondance analytique repose sur un modèle mathématique du système. Ce modèle comporte souvent quelques paramètres. Lors du fonctionnement, les paramètres sont estimés et comparés aux grandeurs théoriques, le différentiel étant la signature du défaut. Si ce différentiel dépasse un certain seuil, la présence du défaut est signalée à l'utilisateur. Cette approche est particulièrement utilisée par les automaticiens [30].

La méthode heuristique, ou s'appuyant sur une base de connaissance, ne nécessite pas forcément de modèle précis du système mais repose plutôt sur une reconnaissance de signatures déjà observées. Les signatures de défauts, obtenus par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une

base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal, par système experte ou par réseaux de neurones [32].

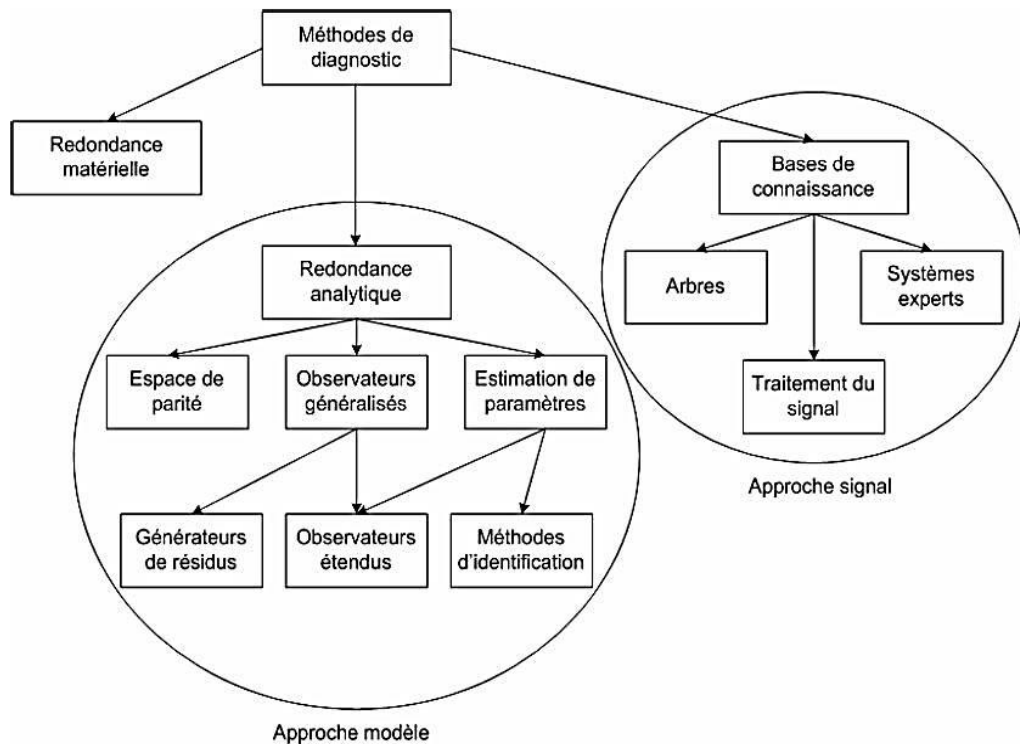


Figure II.3. Méthodes de diagnostic

En fait, toutes ces approches sont complémentaires les unes des autres dans la surveillance des systèmes complexes (avec contrôle, commande et vitesse variable) [31]. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'approche de redondance analytique est plutôt utilisée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser aux méthodes heuristiques. C'est à cette dernière approche que nous nous intéresserons dans notre étude.

L'approche par système expert est plutôt dédiée à la surveillance de l'état de vieillissement. Elle est basée sur l'expertise (récupération de critères et d'indicateurs) et l'analyse et réalisée par traitement des données hors ligne pour ensuite conduire à la prise de décision. Cette approche a actuellement un coût important, elle est longue à mettre en œuvre, et les difficultés auxquelles il faut faire face, telle que la définition des critères de choix, sont nombreuses [30].

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain et avec défauts, pour faire ensuite une comparaison

entre les deux signaux mesurés. Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie. Le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure. Il faut également citer les méthodes temps-fréquence qui peuvent être, dans certaines configurations, plus riches que l'analyse spectrale [30].

II.2.2. Diagnostic appliqué aux machines électriques

Dans le domaine des machines électriques, le diagnostic de défauts est aussi ancien que les machines elles-mêmes. Chaque famille de machines possédant des caractéristiques différentes, les méthodes de diagnostic qui leur sont associées sont également différentes. De même, la puissance et le coût des machines à surveiller jouent un rôle important dans la méthode de diagnostic choisie.

Les machines électriques sont soumises pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties de ces machines.

Pour la détection d'un dysfonctionnement d'une machine électrique, il est nécessaire de posséder :

- ✓ Une bonne connaissance du comportement de la machine, de son état et de son fonctionnement,
- ✓ Une bonne connaissance des défaillances et de leurs conséquences sur le fonctionnement de la machine [30].

En effet, les méthodes de modélisation jouent actuellement un rôle important dans la capitalisation des connaissances de l'état de la machine, du procédé et de la caractérisation des défaillances. Il existe à ce jour plusieurs méthodes de modélisation adéquates comme la méthode des éléments finis, la méthode des réseaux de perméances ou des méthodes analytiques. Grâce à ces approches, il est possible de décrire le comportement de la machine en présence d'un défaut et de permettre ainsi de caractériser son influence [30].

II.2.2.1. Grandeurs à analyser

Les méthodes de diagnostic heuristiques permettent maintenant au monde industriel de développer des systèmes de surveillance performants et efficaces. Elles peuvent

impliquer plusieurs domaines scientifiques et techniques. Elles reposent sur l'analyse de grandeurs de type (figure II.4) [33] :

- **Electrique** : analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine (tensions, courants,...),
- **Mécanique** : analyse de la vitesse, du couple ou même des vibrations (accéléromètres,...),
- **Thermique** : analyse de la température de la machine (sonde de température, mesure infrarouge),
- **Electromagnétique** : analyse des flux dans l'entrefer (spires de mesure de flux), des flux axiaux, des flux de fuite (bobines externes) ou des champs électriques externes (mesure de décharges partielles),
- **Chimique** : analyse des huiles et des gaz.

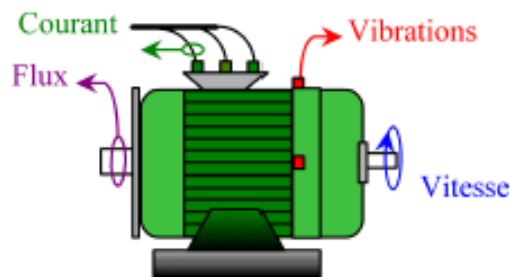


Figure II.4. Points de mesures

II.2.2.2. Nécessités et approches du diagnostic

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes, tels que le bruit, la température, les vibrations....etc. En s'appuyant sur leurs expériences, ces derniers sont dus à des modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables ou non [34]. Pour effectuer un diagnostic, il est nécessaire de procéder à une ou des analyses afin d'interpréter les signaux issus des capteurs tant sur le plan fréquentiel que temporel. Parmi tous les signaux permettant d'établir un diagnostic, ceux-ci peuvent provenir de la mesure du courant absorbé par le moteur électrique, le carré de ce courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park....

Il est important de savoir que les différentes méthodes de diagnostic des machines électriques sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches, comme vu précédement [35] :

- ✓ Approche sans modèle,
- ✓ Approche avec modèle.

A. Méthodes de diagnostic sans modèle (approche par signal)

Ces méthodes ne nécessitent pas nécessairement un modèle analytique précis du système, mais sont basées sur la reconnaissance de signatures, et se retrouvent généralement dans une base de données de fausses signatures, obtenues par modélisation ou mise à l'échelle sur un modèle. L'analyse est réalisée par interprétation du type de signal ou par un système expert.

À ce jour, l'analyse itérative de grandeurs mesurables est la plus largement utilisée pour le diagnostic d'erreurs, car la plupart des erreurs connues peuvent être détectées en utilisant ce type d'approche [36].

Les chercheurs et les fabricants utilisent également de plus en plus les techniques d'intelligence artificielle (IA) dans le domaine du diagnostic pour augmenter l'efficacité du système [37] [38]. En fait, le terme « intelligence artificielle » comprend diverses technologies telles que les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue, qui peuvent être utilisés indépendamment ou en combinaison pour améliorer leur efficacité.

Pour diagnostiquer une installation industrielle, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de signaux de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux peuvent être exploités pour détecter et identifier des anomalies qui affectent le bon fonctionnement de la machine. Elles font toutes parties de la famille des méthodes d'estimation spectrale non paramétriques. Cependant, les équipements nécessaires à l'acquisition et au traitement des signaux restent encore très coûteux.

B. Méthodes de diagnostic avec modèle

Deux approches peuvent être utilisées pour diagnostiquer les défauts à partir des modèles paramétriques. La première repose sur le suivi des paramètres électriques

caractérisant les modèles. Il s'agit de détecter un écart entre l'évolution des paramètres au cours d'un fonctionnement sain et celle suivie par le système en présence de défauts. L'identification des paramètres peut se faire hors ligne. Elle se base alors sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié. Les paramètres peuvent être aussi identifiés en cours de fonctionnement à l'aide d'observateurs étendus. Le plus couramment utilisé est le Filtre de Kalman [39], [40], [41].

La deuxième approche consiste à analyser les résidus générés à partir d'un modèle proche du système à surveiller. Le modèle de processus est constitué de relations de contraintes dynamiques liant deux types de variables : des variables inconnues (variables internes, perturbations, entrées inconnues, ...) et des variables connues (consignes, variables mesurées). Les résidus sont théoriquement nuls en fonctionnement normal et différents de zéro lorsqu'une défaillance survient. La difficulté majeure consiste à faire la liaison entre le résidu établi et un défaut particulier [42].

II.3. Techniques de diagnostic des machines électriques

II.3.1. Techniques mécaniques et chimiques

II.3.1.1. Diagnostic par mesure des vibrations

Toute machine électrique produit du bruit et des vibrations, leur analyse est peut être employée pour donner des informations sur l'état de la machine. Le bruit et les vibrations sont provoqués principalement par des forces qui sont d'origine magnétique, mécanique et aérodynamique. Les forces magnétiques sont créées par le champ d'entrefer. Leur expression s'exprime comme suit [43] [44] :

$$\sigma = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

B : Induction magnétique,

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.

Les vibrations dans les machines électriques peuvent être captées par des accéléromètres piézoélectriques. Ce sont les capteurs les plus utilisés pour la mesure des vibrations en raison de leur fiabilité, de leur gamme de fréquence élevée et de leur robustesse. Cette méthode 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,...). Après avoir capté les vibrations, une analyse spectrale est effectuée et comparée avec celle de la machine saine. Si les spectres des signaux captés sont différents de ceux de la machine saine, cela indique la présence d'un défaut dans la machine. La figure II.5 présente un banc de mesure du bruit et des vibrations d'une machine asynchrone.

S'il existe une asymétrie dans la machine, le spectre du signal de vitesse (de l'accélération) contient des harmoniques qui dépassent d'une fois ceux d'une machine saine. Pour une déflexion de l'arbre, le spectre contient des harmoniques qui sont deux fois ou quatre fois plus grandes que ceux d'une machine sans défauts.

Une mesure vibratoire passe par plusieurs phases [45] :

- ✓ la conversion des accélérations vibratoires en charges électriques (capteur),
- ✓ la transformation de ces charges en tension via l'amplificateur de charge (conditionneur),
- ✓ la conversion analogique-numérique pour l'acquisition des données (carte d'acquisition),
- ✓ le conditionneur permet aussi de calibrer les informations issues des accéléromètres et d'appliquer éventuellement les opérations nécessaires de filtrage.

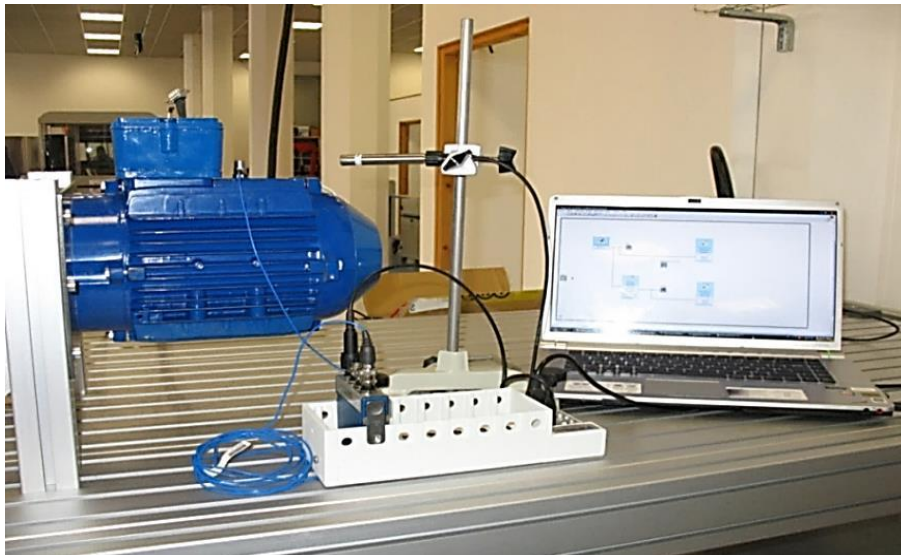


Figure II.5. Machine asynchrone avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique

II.3.1.2. Diagnostic par la mesure de la température

La machine électrique dissipe une certaine quantité de chaleur, due aux pertes mécaniques dans les paliers (frottement et ventilation), aux pertes électriques dans les conducteurs et aux pertes magnétiques dans le fer. Ils en découlent des échauffements générateurs de contraintes thermiques et une diminution du rendement [46] [47].

L'approche thermique ou la méthode de diagnostic par la mesure de la température consiste à mesurer la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite, si elle dépasse le taux admissible, on déduit une existence du défaut dans la machine.

Cette méthode est souvent utilisée pour la protection des enroulements statoriques, donc elle ne concerne pas la totalité des défauts dans la machine.

Dans l'industrie il existe des caméras thermiques qui enregistrent l'intensité du rayonnement dans la partie infrarouge du spectre électromagnétique, et la convertit en image visible. La figure ci-dessous présente une image visible et une image thermique d'un moteur électrique entraînant une pompe dans la salle des machines d'un bateau [45].

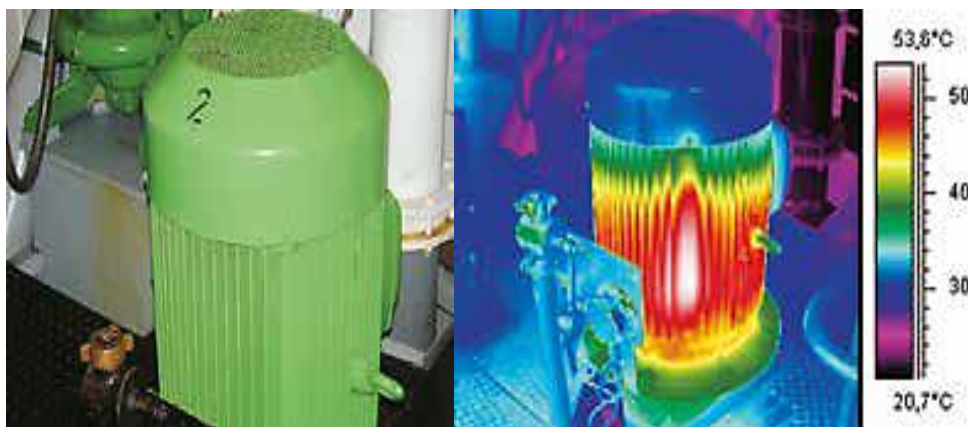


Figure II.6. Image visible et image thermique d'un moteur électrique entraînant une pompe dans la salle des machines d'un bateau

II.3.1.3. Diagnostic par l'analyse des lubrifiants

L'analyse des lubrifiants consiste à réaliser des essais physico-chimiques pour déterminer la qualité des huiles, graisses ou fluides hydrauliques. Les lubrifiants se dégradent sous l'action de la chaleur, de l'usure des organes ou par contamination du milieu ambiant (poussières, fuite d'eau, ...).

Le diagnostic chimique est basé sur l'analyse des fluides de refroidissement qui sont utilisés pour l'évacuation de la chaleur dans les moteurs à grandes puissances (eau, air ou huile).

La dégradation de l'isolation électrique dans la machine produit le gaz d'oxyde de carbone, qui apparaît dans le circuit de l'air de refroidissement et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

La méthode de diagnostic chimique est uniquement utilisée dans les moteurs à grande puissance, donc elle n'englobe pas tous les types de machines [48].

II.3.2. Techniques magnétiques et électriques

II.3.2.1. Diagnostic par mesure du flux axial de fuite

Pour une machine idéale, les courants statoriques et rotoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. Mais en pratique, cette valeur n'est pas atteinte à cause des défauts de fabrication ou le non homogénéité des sections des barres rotoriques dans les machines asynchrones. Ces problèmes produisent un flux de dispersion axial (flux magnétique de fuite) qui peut être utilisé pour la détection des différents défauts qui surgissent dans la machine tels que [46] [49] [50] :

- ✓ les ruptures des barres et des anneaux de court-circuit,
- ✓ le court-circuit entre spires statoriques,
- ✓ les coupures de phases.

Une ou plusieurs bobines exploratrices sont placées symétriquement autour de l'arbre où elles permettent de détecter le flux de fuite axial. Ces bobines sont le siège de tensions induites par le flux de fuite. Les tensions sont captées et analysées, puis comparées à celles d'une machine saine.

Seulement, c'est une technique qui manque de souplesse et nécessite un montage spécial. Elle est généralement utilisée pour la prévention contre les défauts dans des cas particuliers (les défauts des alternateurs et des moteurs de grandes puissances).

Dans une machine électrique tournante, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine, tel qu'il est montré sur la figure II.7 [45].

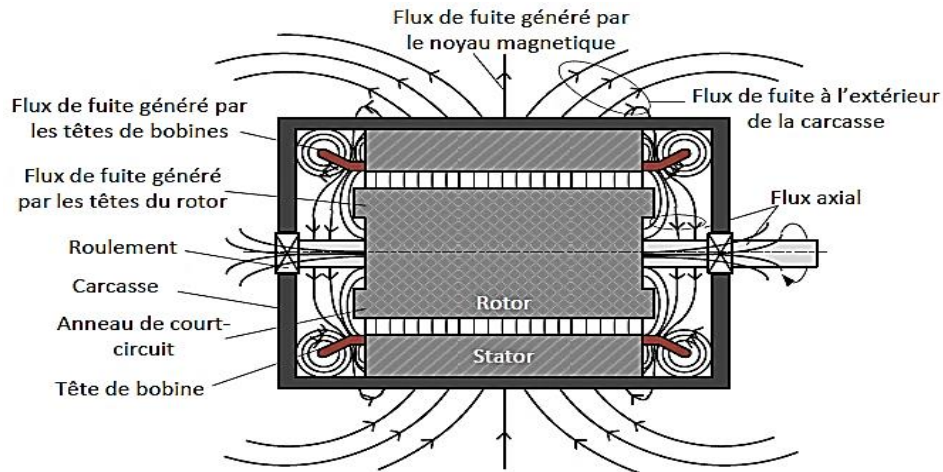


Figure II.7. Ensemble des flux dans une machine asynchrone, comme exemple

D'après la répartition des lignes de champ, on peut décomposer le champ extérieur en deux parties appelées champs externes axial et radial. Ces deux champs se combinent pour former le champ de dispersion. Le flux de dispersion peut donner une information sur la présence d'un défaut, parfois la localisation de celui-ci.

Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre, elles consistent à disposer un capteur à la périphérie de la machine et de récupérer le signal du champ de fuite (voir figure II.8). Or, selon la position du capteur, le champ mesuré n'émane pas forcément du même endroit, et ne résulte, par conséquent, pas forcément du même phénomène physique.

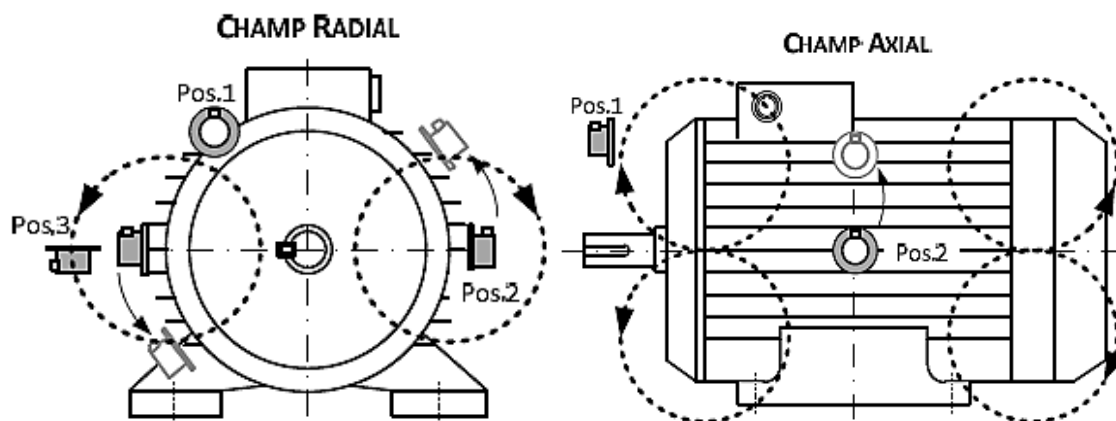


Figure II.8. Positions des capteurs utilisés pour la détection des champs radial et axial

Les tensions induites dans les bobines sont captées et analysées, puis comparées à celles de la machine saine. La condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic des défauts est que ce dernier doit avoir une valeur importante [48].

II.3.2.2. Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

Cette technique est basée sur l'exploitation du contenu fréquentiel de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques pendant la déconnexion de la machine du réseau. En utilisant cette approche, les effets de la non-idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non-linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [51].

II.3.2.3. Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parcequ'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image sur le courant de phase statorique.

C'est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique [52] [53] [54]. Sachant que dans un spectre de courant d'une machine sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la f.m.m, dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la f.m.m, en plus du fondamental apparaît des harmoniques de l'encoche rotorique.

Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone. L'existence de ce défaut engendre un courant de défaut dans le rotor. Ce courant produit une f.m.m pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est (gf) avec g et f sont respectivement le glissement et la fréquence d'alimentation. Cette f.m.m produit dans l'enroulement statorique une harmonique à deux composantes, la première ayant la fréquence $(1-2g)f$ et la deuxième ayant la fréquence $(1+2g)f$. Les deux figures II.9 et II.10 montrent respectivement, le schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique ainsi que les résultats expérimentaux du spectre du courant statorique, obtenu pour le moteur sain et avec défaut.

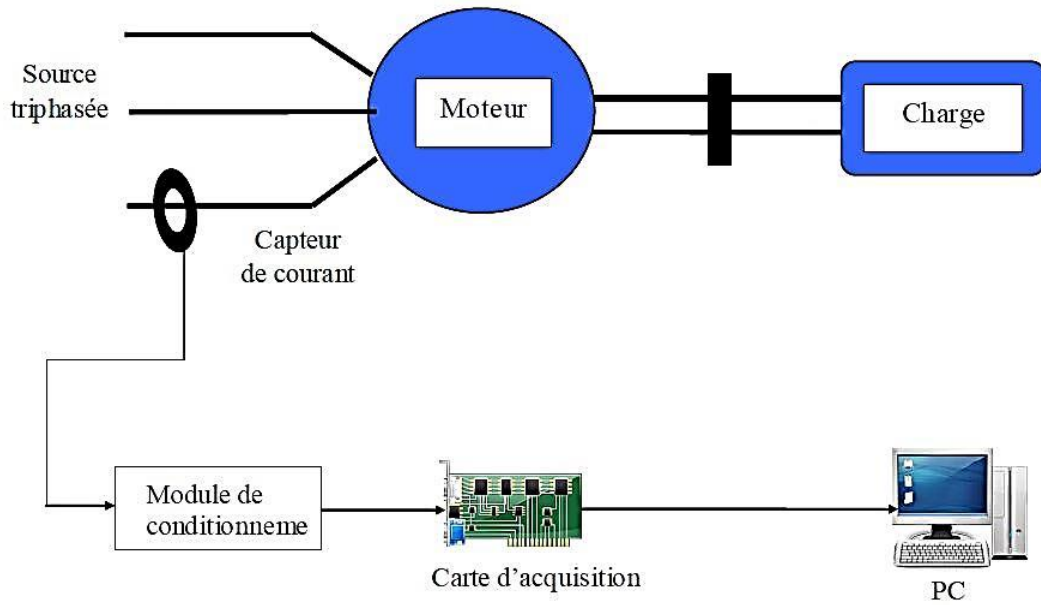
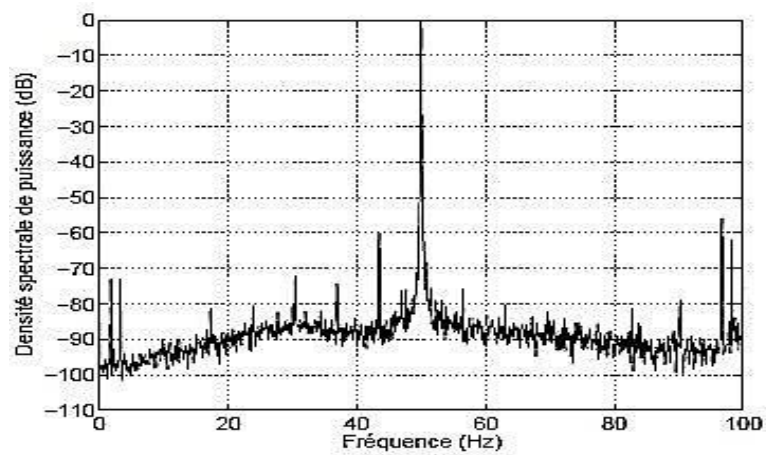
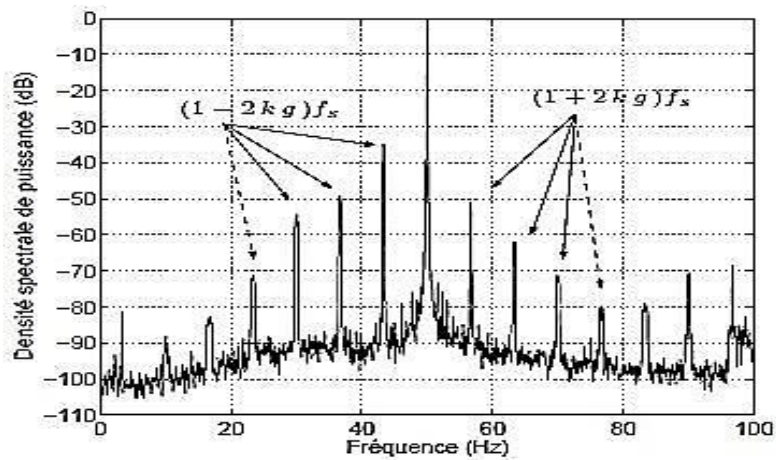


Figure II.9. Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique



(a) Rotor saine



(b) Rotor avec une barre casée

Figure II.10. Spectre du courant statorique (résultats expérimentaux). Cas d'un moteur asynchrone

II.3.2.4. Diagnostic par mesure de la puissance instantanée

La puissance instantanée est la somme des produits des courants et des tensions dans les trois phases statoriques. Donc, le niveau d'informations apporté par cette grandeur, est plus grand que celui apporté par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [55].

II.3.2.5. Diagnostic par mesure du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale du signal du couple (mesuré ou estimé), donne des informations sur l'état de santé de la machine [56].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des méthodes du diagnostic des défauts et leurs différentes techniques de détection. Ces techniques peuvent être utilisées seules ou d'une façon combinée, cela consiste dans tous les cas à estimer et suivre l'état de marche de la machine en fonctionnement, de manière à détecter des anomalies et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

De plus, dans ce chapitre, nous avons essayé de regrouper le maximum d'informations sur les symptômes qu'une machine électrique peut manifester. Pour chaque symptôme, une liste de causes possibles est nécessaire pour la détermination des possibles origines pour chaque type de défaut.

L'art du diagnostic et de détection des défaillances consiste à détecter de façon précoce un défaut avant qu'il ne conduise à un état de défaillance et donc de panne.

La technique choisit dans cette étude est celle du diagnostic par analyse du flux électromagnétique (du champ électromagnétique). C'est dans ce but que le chapitre qui suit va être consacré à la présentation de la procédure du calcul du champ électromagnétique.

Chapitre III

Calcul du champ Electromagnetique

Chapitre III

Calcul du champ électromagnétique

Introduction

Tout phénomène électromagnétique étudié dans un dispositif électrotechnique est régi par les quatre équations de Maxwell et par les trois relations des milieux considérées. Ces équations décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques et s'adaptent à tout milieu électromagnétique. Le calcul du champ électromagnétique passe par la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles [57] [58].

Ce chapitre va être consacré à la présentation de la procédure suivie lors de la modélisation d'un dispositif électromagnétique. On va présenter les différentes formulations ainsi que les méthodes de calcul du champ électromagnétique.

III.1. Outils de calcul du champ électromagnétique

L'étude de n'importe quel dispositif électromagnétique nécessite la connaissance de la distribution du champ électromagnétique dans ce dispositif et donc les valeurs du flux, des forces magnétiques, etc. Le calcul du champ électromagnétique passe par la résolution des formulations électromagnétiques (équations différentielles aux dérivées partielles) qui sont élaborées à partir des équations de Maxwell [59] [60].

III.1.1. Equations de Maxwell et lois de comportement

Les quatre équations de Maxwell relient des grandeurs vectorielles électriques et des grandeurs magnétiques [61].

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Équation de Maxwell-Ampère}) \quad (\text{III.1})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Équation de Maxwell-Faraday}) \quad (\text{III.2})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Lois de conservation du flux magnétique}) \quad (\text{III.3})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{équation de Maxwell-Gauss}) \quad (\text{III.4})$$

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].

Les densités des champs vectoriels précédents sont dépendants les uns des autres et leurs liaisons sont fonction du milieu où ils règnent. Ainsi pour définir complètement le phénomène électromagnétique à l'intérieur d'un milieu isotrope et homogène, caractérisé de point de vue électromagnétique par une conductivité électrique σ [Ω/m], une permittivité électrique ε [F/m] et une perméabilité magnétique μ [H/m], on rajoute aux équations précédentes les lois de comportement de ce milieu ainsi que la loi d'Ohm [62].

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Lois d'Ohm}) \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Relation magnétique}) \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{Relation diélectrique}) \quad (\text{III.7})$$

σ , μ et ε sont les caractéristiques de milieu considéré tel que [63] :

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{III.8})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{III.9})$$

Avec :

μ_0 : Perméabilité du vide égale à $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m],

μ_r : Perméabilité relative,

ε_0 : Permittivité du vide, elle vaut $10^9/36$ [F/m],

ε_r : Permittivité relative.

L'expression locale de la loi d'ohm est donnée comme suit :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

\vec{J}_s : Densité du courant source,

\vec{J}_{ind} : Densité du courant induit.

III.1.2. Conditions de passage

Pour résoudre les équations de Maxwell, il faut ajouter les conditions aux frontières du milieu. En effet, à la limite de séparation de deux milieux correspondant aux indices 1 et 2 avec \vec{n} désigne le vecteur normal à la surface de séparation dirigé vers l'extérieur, les relations de passage sont [64] [65] :

- ✓ La relation de continuité de la composante normale de l'induction magnétique

$$\vec{B}_1 \cdot \vec{n} = \vec{B}_2 \cdot \vec{n} \quad (\text{III.11})$$

- ✓ La relation de continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique

$$(\vec{E}_1 - \vec{E}_2) \times \vec{n} = 0 \quad (\text{III.12})$$

- ✓ La relation de continuité de la composante normale de la densité de courant

$$\vec{J}_1 \cdot \vec{n} = \vec{J}_2 \cdot \vec{n} \quad (\text{III.13})$$

- ✓ La relation de discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent

$$(\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \times \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{III.14})$$

- ✓ La relation de discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques si elles existent

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III.15})$$

Ici J_s est la densité surfacique de courants libres à l'interface et ρ_s est la densité surfacique de charges libres à l'interface.

III.1.3. Hypothèses simplificatrices

Généralement, les équations de Maxwell précédentes peuvent être simplifiées en se basant sur les conditions de travail. L'une des plus importantes simplifications est celle de négliger la densité du courant de déplacement ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) dans le matériau conducteur. Ceci revient au fait que sa densité est très faible par rapport à celle de conduction, aux fréquences usuelles en électromagnétique (basse fréquence), ce qui permet de négliger tout aspect propagatif du champ électromagnétique.

En considérant cette simplification, la loi d'Ampère se réécrit comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.16})$$

A partir des équations de Maxwell : (III.1), (III.3) et (III.4) on peut définir une nouvelle loi dite la loi de conservation de densité de courant qui s'exprime comme suit [59].

$$\text{div} \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{III.17})$$

Une autre simplification consiste à négliger la charge d'espace dans les matériaux conducteurs ($\rho = 0$). Dans ce cas, l'équation de conservation de la densité de courant se réécrit :

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (\text{III.18})$$

Tenant compte des simplifications mentionnées précédemment, les équations de Maxwell simplifiées sont données comme suit [66] :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.19})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.20})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.21})$$

$$\text{div} \vec{D} = 0 \quad (\text{III.22})$$

Sachant que la divergence de l'induction magnétique est nulle (équation (III.21)), et d'autre part la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut en tout point de l'espace identifier l'induction avec le rotationnel d'une grandeur vectorielle \vec{A} [T.m], comme l'indique l'équation ci-dessous :

$$\text{div} (\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A})) = 0 \quad (\text{III.23})$$

Donc on peut définir le potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que :

$$\vec{B} = \overrightarrow{\text{rot}} (\vec{A}) \quad (\text{III.24})$$

On dit que l'induction magnétique \vec{B} dérive de \vec{A} . L'emploi du potentiel vecteur \vec{A} permet de simplifier la résolution du problème électromagnétique.

III.1.4. Formulations électromagnétiques

Pour la résolution d'un problème électromagnétique on doit élaborer la formulation correspondante à ce problème et qui dépend des propriétés électriques et magnétiques du domaine d'étude (figure III.1).

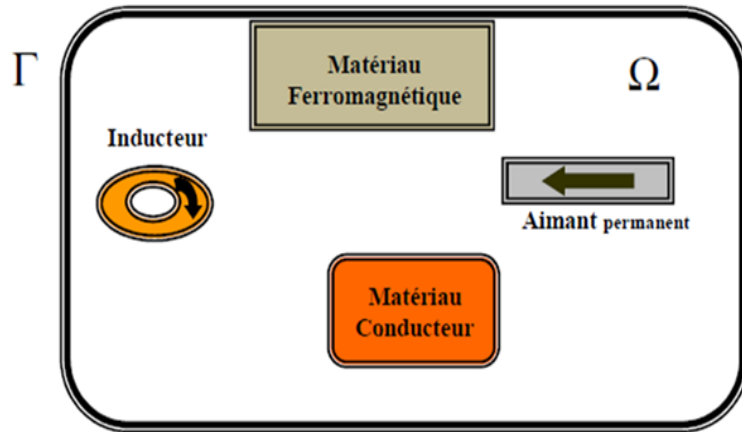


Figure III.1. Domaine d'étude

III.1.4.1. Formulation magnétostatique

En électrotechnique, la fréquence ne dépasse pas les quelques milliers de Hertz, ainsi on néglige les courants de déplacement. De plus, en statique, les équations de Maxwell se simplifient car les grandeurs sont indépendantes du temps.

Dans le problème magnétostatique, les équations à résoudre s'écrivent :

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.25})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{III.26})$$

A partir de l'équation (III.25), nous pouvons introduire le potentiel vecteur magnétique \vec{A} qui sert à réduire le nombre d'inconnues dans nos équations, d'où la facilité de résolution.

Considérons un système sans mouvement. A partir des équations (III.6) et (III.24), on obtient :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} \quad (\text{III.27})$$

$$\vec{H} = \vartheta \operatorname{rot} \vec{A} \quad (\text{III.28})$$

Où ϑ est la réluctivité magnétique ($\vartheta = \frac{1}{\mu}$)

En remplaçant \vec{H} dans l'équation (III.26), on trouve la formulation magnétostatique, en absence d'aimants permanents, donnée par l'expression ci-dessous :

$$\overrightarrow{\text{rot}} (\vartheta. \overrightarrow{\text{rot}} \vec{A}) = \vec{J} \quad (\text{III.29})$$

Pour assurer l'unicité de la solution, la contrainte supplémentaire de la jauge de Coulomb est naturellement vérifiée en 2D :

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III.30})$$

L'équation (III.29) est appelée équation de diffusion électromagnétique de la grandeur \vec{A} .

III.1.4.2. Formulation magnétodynamique

Tenant compte des hypothèses simplificatrices, en magnétodynamique les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.31})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.32})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.33})$$

Avec

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (\text{III.34})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma \vec{V} \wedge \vec{B} + \vec{J}_s \quad (\text{III.35})$$

Les sources du champ sont les densités de courant \vec{J}_s imposées (et/ou les aimants permanents caractérisés par leur induction \vec{B}_r). σ est la conductivité du milieu, \vec{V} sa vitesse et μ sa perméabilité magnétique.

Pour définir complètement le problème de la magnétodynamique, il est encore nécessaire de considérer les relations constitutives des milieux.

Plusieurs formulations ont été développé pour représenter le modèle de la magnétodynamique en vue de sa modélisation. Les principales formulations rencontrées peuvent être classées en deux grandes familles :

- ✓ Formulations de type électrique : en E, en A et en A-V,
- ✓ Formulations de type magnétique : en H et en T- ϕ .

❖ Formulation en potentiel vecteur magnétique A

Notre objectif est de déterminer la distribution du champ magnétique H dans un domaine borné Ω de frontière $T = T_b \cup T_h$ (pour notre cas, dans une machine électrique).

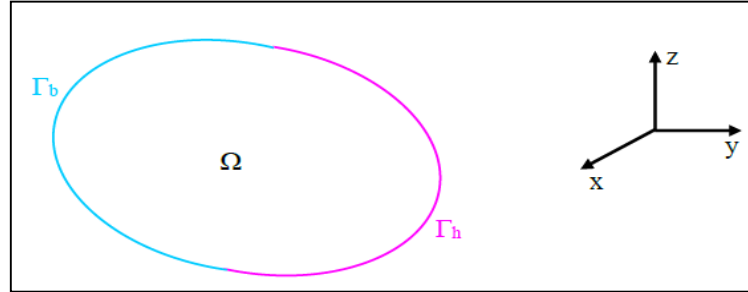


Figure III.2. Domaine d'étude borné

Pour résoudre le problème électromagnétique, il faut connaître les conditions aux limites sur les frontières du domaine d'étude (figure III.2). Deux types de conditions aux limites existent, condition de type Dirichlet sur T_h et condition de type Neumann sur T_b .

Donc, à partir des équations (III.24), (III.31) et (III.32), nous aboutissons à l'équation ci-dessous :

$$\overrightarrow{rot} \left(\frac{1}{\mu} \overrightarrow{rot} \vec{A} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_s \quad (\text{III.36})$$

C'est cette formulation qui va nous intéresser dans notre étude. Elle est la plus générale et peut être appliquée à divers problèmes d'électrotechnique. Sa résolution peut être effectuée soit en coordonnées cartésiennes ou en coordonnées cylindriques. Cela dépend de la géométrie du dispositif étudié. De plus, on cherche à ramener l'étude en 2D pour la simplifier et pour optimiser le temps de calcul.

Dans notre cas, le dispositif à étudier est une machine électrique. On va effectuer une étude 2D en coordonnées cartésiennes.

➤ Systèmes 2D cartésiens

Dans ces systèmes, le problème est bidimensionnel et la formulation de l'équation électromagnétique, en fonction du potentiel vecteur \vec{A} en coordonnées cartésiennes, présente des avantages. Dans ce cas, \vec{A} ne possède qu'une seule composante (dans la direction Oz) non nulle et ne dépend que de x et y . Sa divergence est naturellement nulle (Jauge de Coulomb).

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix}; \quad \vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{bmatrix} B_x(x, y) \\ B_y(x, y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

En magnétodynamique, l'équation de diffusion électromagnétique se réécrit comme suit, en coordonnées cartésiennes [68] :

$$-\frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z(x, y)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z(x, y)}{\partial x} \right) + \sigma \frac{\partial A_z(x, y)}{\partial t} = J_z(x, y) \quad (\text{III.38})$$

III.2. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP). Ces méthodes peuvent être analytiques, numériques ou mixtes (semi-analytiques). Le choix d'une méthode dépend de la nature et de la géométrie du problème [67].

III.2.1. Méthodes analytiques

Ce sont les premières méthodes utilisées. Elles sont d'emploi restreint à des géométries simples dans des approches unidimensionnelles, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels. La méthode analytique la plus puissante et la plus couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles est la méthode de séparation des variables. Le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnu sous forme d'un produit de fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable.

Soit, en coordonnées cartésiennes, l'inconnue $A_z(x, y)$ qui est écrit comme suit [67] :

$$A_z(x, y) = A_z(x) \cdot A_z(y) \quad (\text{III.39})$$

Tel que :

$A_z(x, y)$: solution de l'équation différentielle aux dérivées partielles considérée de sorte que :

$A_z(x)$: est une fonction qui ne dépend que de la variable x ,

$A_z(y)$: est une fonction qui ne dépend que de la variable y .

III.2.2. Méthodes semi-analytiques

Parmi les méthodes semi-analytiques, on peut citer la méthode des intégrales de frontières ainsi que la méthode des circuits couplés [67].

III.2.2.1. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

Cette méthode est basée sur la discrétisation des frontières du domaine. Pour cela on utilise le théorème de GREEN. Elle est limitée à la résolution des systèmes linéaires [67].

III.2.2.2. Méthode des circuits couplés (MCC)

La MCC permet de fournir la solution d'une équation aux dérivées partielles (EDP) par une expression intégrale de type Biot et Savart, et elle est couplée à une méthode numérique de discrétisation [67].

III.2.3. Méthodes numériques

Les méthodes numériques sont développées grâce au développement des outils informatiques. Ce sont des méthodes basées sur la discrétisation du domaine d'étude. Nous distinguons trois méthodes principales pour la résolution des équations électromagnétiques : la méthode des différences finis, la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis [67].

III.2.3.1. Méthode des différences finis (MDF)

Elle est basée sur le développement de Taylor de la fonction inconnue, autour d'un point x_0 et pour une fonction $f(x)$ continue et n fois dérivable. Cette méthode consiste à avoir une géométrie simple et un seul milieu homogène [67].

III.2.3.2. Méthode des volumes finis (MVF)

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 du maillage (celui des différences finies).

La forme intégrale de l'EDP est discrétisée dans le domaine d'étude et intégrée sur chacun des volumes élémentaires, pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire. La fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs. Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs, la procédure conduit à une solution plus précise que celle fournie par la MDF [67].

III.2.3.3. Méthode des éléments finis (MEF)

La MEF était utilisée au début par les spécialistes de la mécanique. Son introduction dans le domaine de l'électrotechnique a été faite par M.V. K. Chaurien en 1970.

Cette méthode est bien adaptée à la résolution des équations aux dérivées partielles sur des domaines de géométrie complexe, linéaire ou non linéaire. Elle consiste à subdiviser le domaine étudié en éléments finis, et approcher l'inconnu dans chaque élément par des fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de première ou deuxième degré. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction de ses valeurs nodales, ce qui impose la continuité de l'inconnu sur les interfaces des éléments [67].

✓ Formulation intégrale et application de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à trouver un ensemble de fonctions modélisant le phénomène sur chaque élément du maillage.

Le domaine d'étude est divisé en éléments triangulaires du premier ordre sur lesquels l'équation de diffusion électromagnétique va être résolue. A l'intérieur de chaque élément $A(x, y)$ est interpolé sous la forme [68] :

$$A(x, y) = \sum_{i=1}^3 N_i(x, y)A_i \quad (\text{III.40})$$

Où A_i ($i = 1, 2, 3$) sont les valeurs nodales de A aux sommets de l'élément, et $N_i(x, y)$ sont des fonctions de forme linéaires en x et en y . Elles sont définies de la manière suivante :

$$N_i(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{III.41})$$

x_j, y_j étant les coordonnées du $j^{\text{ème}}$ nœud.

Pour discrétiser l'équation à résoudre, on va utiliser la méthode des résidus pondérés où les fonctions de pondération qui vont être utilisées sont celles de Pétrov Galerkin (les fonctions de forme elles-mêmes). Cette technique consiste à projeter l'équation de diffusion sur l'ensemble des fonctions de pondération choisies sur chaque élément, et annuler l'intégrale du résidu sur le domaine de résolution.

Le système issu de cette discrétisation, peut être mis sous la forme donnée par l'équation ci-dessous. La résolution de cette dernière se fait après introduction des conditions aux limites, et permet d'évaluer les valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique.

$$[M] [A] = [J] \quad (\text{III.42})$$

Où $[J]$ est le vecteur source, $[M]$ est la matrice de rigidité magnétique et $[A]$ est le vecteur du potentiel vecteur magnétique aux nœuds du maillage.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des équations de Maxwell, des formulations mathématiques des modèles électromagnétiques ainsi que des différentes méthodes utilisées pour les résoudre.

Une grande variété de méthodes peut être utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Nous avons présenté dans ce chapitre les méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques qui se prêtent mieux à la résolution des problèmes vus les avantages qu'elles présentent. Nous nous sommes principalement intéressés à la méthode des éléments finis que nous utiliserons dans notre étude.

En guise de conclusion, ce chapitre a visé la présentation des outils mathématiques nécessaires pour la modélisation d'un dispositif électromagnétique. Ceci va nous permettre de pouvoir entamer le sujet du diagnostic de la machine synchrone à aimants permanents à étudier.

Chapitre IV

Modélisation et diagnostic des défauts d'un MSAP à flux radial

Chapitre IV

Modélisation et diagnostic des défauts

d'une MSAP à flux radial

Introduction

Tout industriel cherche à ce que ses installations fonctionnent de manière continue. Le diagnostic des machines électriques, considéré comme un « bilan de leur santé », peut intervenir avant et après une défaillance.

Ce chapitre vise la modélisation et le diagnostic des défauts d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Dans ce but, des modèles éléments finis ont été développés et mis en œuvre, sous environnement Matlab, en considérant quatre types de défauts.

IV.1. Objectif de l'étude

L'objectif de ce travail de mémoire est le diagnostic de défauts d'une MSAP, par l'analyse du flux électromagnétique. Premièrement, on va modéliser cette machine en régime harmonique, dans le cas linéaire, et en considérant une source de courant (attaque courant).

Pour mener cette étude, on va utiliser la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation aux dérivées partielles (EDP), formulée en termes de potentiel vecteur magnétique A , qui caractérise le comportement électromagnétique de la machine à étudier. Après calcul du potentiel vecteur magnétique, on peut déterminer l'induction ainsi que le flux électromagnétique.

Le modèle électromagnétique développé va être appliqué dans les deux cas : machine saine et machine défectueuse. Une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas va être effectuée [69].

IV.2. Présentation de la machine à étudier

IV.2.1. Géométrie

Le moteur synchrone à aimants permanents à étudier comporte dix-huit encoches et six aimants, donc il a six pôles. Ce moteur est décrit à l'aide de points, de segments, de droites et d'arcs. Un enchaînement de procédures a été suivi pour réaliser cette étape :

- création d'un système de coordonnées (définition du centre du système, type de coordonnées de système, validation du système),
- insertion et identification des points suivant le type de coordonnées du système,
- création et identification des segments et arcs,
- création et identification des différentes faces. Pour pouvoir créer une face réelle, il faut connecter tous les segments et arcs qui la composent.

Après la réalisation de toutes les étapes précédentes, nous avons obtenu la configuration de la figure IV.1.

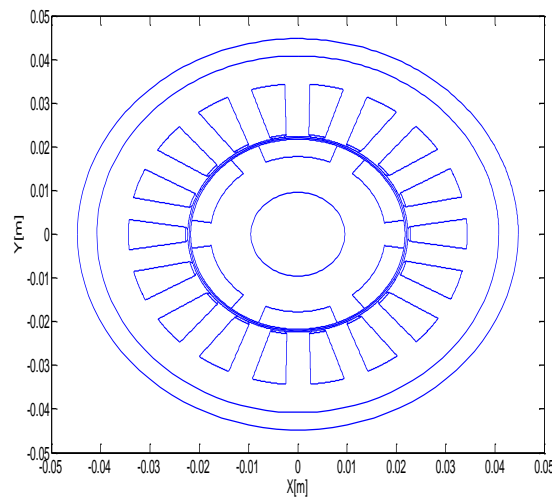


Figure IV.1. Configuration géométrique de la MSAP à étudier

IV.2.2. Caractéristiques

Les différentes caractéristiques de la MSAP à étudier sont indiquées dans le tableau IV.1 [69].

Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine à étudier

Caractéristiques	Valeurs
Nombre de phases	3
Nombre de paires de pôles	3
Diamètre extérieur du stator (mm)	81.60
Diamètre intérieur du stator (mm)	44.7
Longueur active de la machine (mm)	160
Nombre d'encoches statoriques	18
Nombre d'aimants	6
Type de couplage	Etoile
Courant nominal (A)	5.3

IV.2.3. Création des régions

Cette partie de la description de la MSAP est très importante puisqu'elle concerne la caractérisation des matériaux composant la machine. Ainsi, le logiciel Matlab regroupe les surfaces élémentaires en régions géométriques ayant les mêmes propriétés physiques.

Cette machine est constituée d'une partie statorique et d'une partie rotorique. Les propriétés des matériaux constituant ces deux parties sont :

➤ **Partie statorique :**

Cette partie est constituée de :

- Matériau ferromagnétique doux supposé linéaire et ayant une perméabilité relative $\mu_r = 1000$,
- Bobinage parcouru par une densité de courant supposée uniformément répartie dans la section des conducteurs et dont la valeur est :

$$J_s = 1.2541 \times 10^5 \text{ [A/mm}^2\text{]}.$$

➤ **Partie rotorique :**

Cette partie est constituée de :

- Matériau ferromagnétique doux supposé linéaire et ayant une perméabilité relative $\mu_r = 1000$,
- Aimants permanents de types terres rares NdFeB caractérisés par :
 $B_r = 1.1 \text{ [T]}$: induction rémanente avec une aimantation radiale,

$\mu_r = 1.06$: perméabilité relative. La figure ci-dessous montre les différentes régions constituant la MSAP à étudier. Les aimants sont insérés dans le rotor.

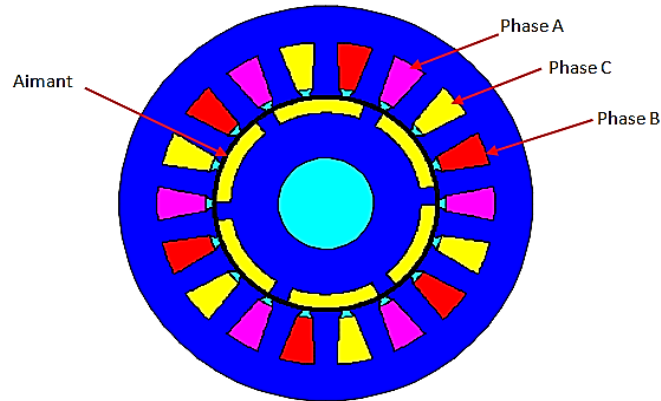


Figure IV.2. Régions constituant la machine synchrone à aimants insérés

IV.3. Modélisation de la MSAP à étudier

En supposant que la MSAP est suffisamment longue, on peut ramener l'étude au plan xoy. Donc, en bidimensionnelle, le domaine de résolution considéré correspond à la section transversale de la machine.

Nous imposons une valeur nulle du potentiel vecteur magnétique sur les frontières du domaine de résolution (conditions aux limites de type Dirichlet : $A=0$ sur la surface externe de la machine).

L'équation électromagnétique, en terme du potentiel vecteur magnétique A à résoudre, peut être écrite en magnétodynamique sous cette forme :

$$\overrightarrow{rot}(\vartheta \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_S + \overrightarrow{rot}(\vartheta \vec{B}_r) \quad (IV.1)$$

Où :

\vec{A} : Composante suivant z du potentiel vecteur magnétique,

\vec{J}_S : Densité de courant imposé,

\vec{B}_r : Induction rémanente,

σ, ϑ : conductivité électrique et réductivité magnétique, respectivement.

L'organigramme ci-dessous résume les différentes étapes du code de calcul électromagnétique développé.

La figure IV.4 représente le maillage éléments finis adopté pour cette étude.

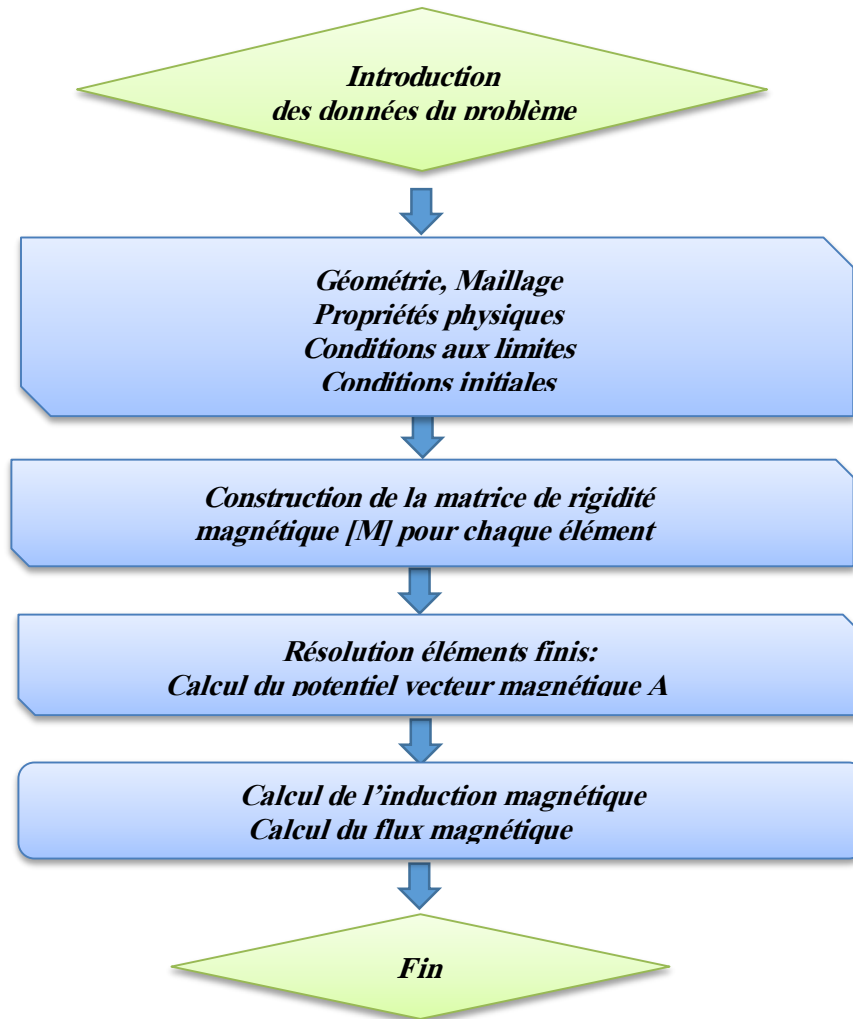


Figure IV.3. Organigramme du code de calcul développé

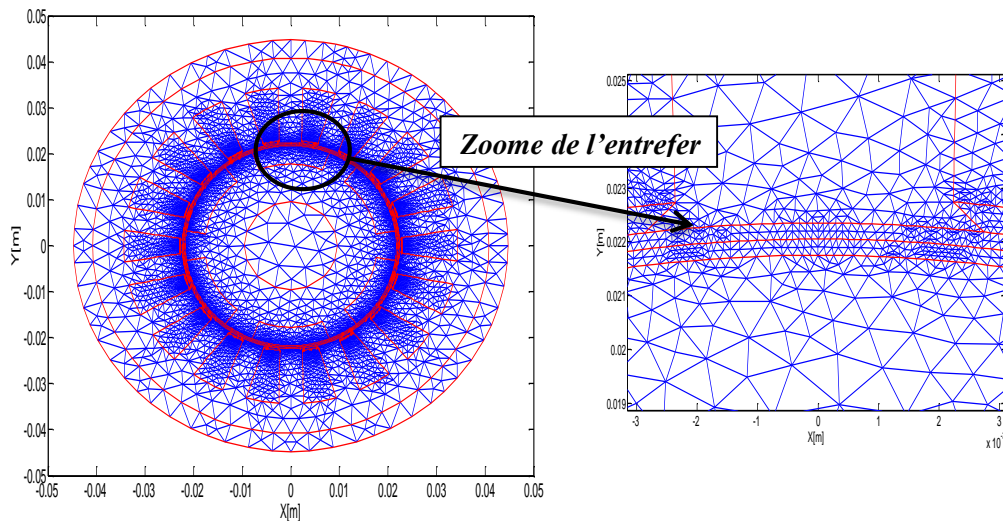


Figure IV.4. Maillage éléments finis adopté à cette étude

Ce maillage est généré par le mailleur automatique du logiciel Matlab. Il est très bien affiné au niveau de l'entrefer pour que la solution soit exacte (plus de deux mailles dans l'entrefer). Il est constitué d'éléments triangulaires du premier ordre.

IV.3.1. Résultats et interprétations

La solution en potentiel vecteur magnétique A est obtenue dans chaque nœud du maillage éléments finis du domaine d'étude, pour un fonctionnement en moteur de la MSAP. La figure IV.5 présente les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique. Ces lignes sont distribuées dans l'entrefer ainsi que dans les parties magnétiques de la machine. Cette distribution est plus concentrée dans les endroits étroits.

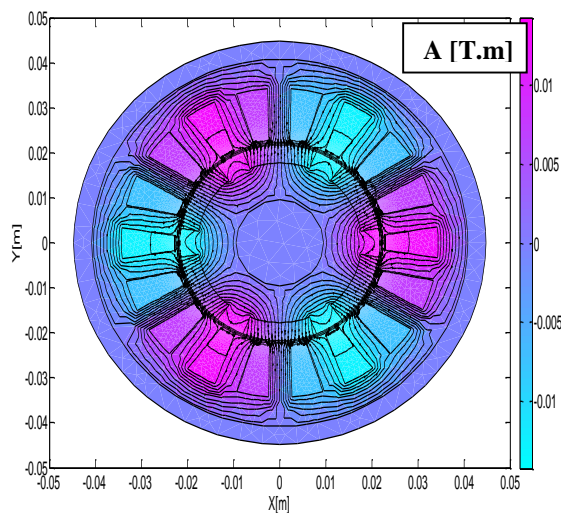


Figure IV.5. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

La figure ci-dessous montre l'évolution du potentiel vecteur magnétique suivant un contour dans l'entrefer.

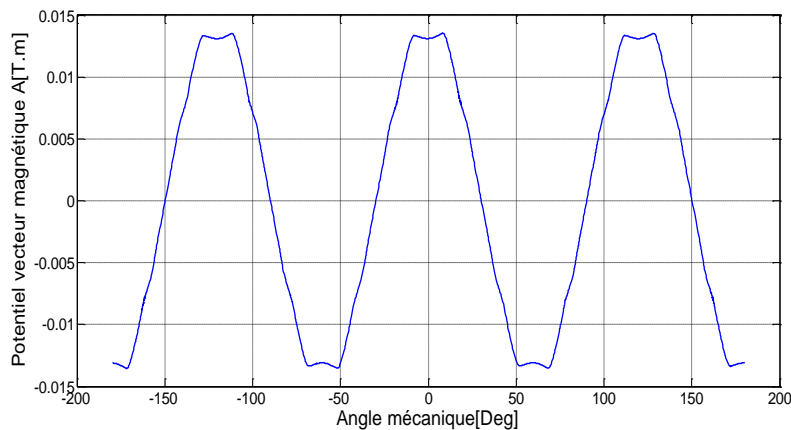


Figure IV.6. Evolution du potentiel vecteur magnétique suivant un contour dans l'entrefer

Les figures IV.7 et IV.8 représentent, respectivement, l'évolution de l'induction magnétique ainsi que celle du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer. A partir de ces figures, on peut remarquer que ces grandeurs électromagnétiques sont plus importantes aux endroits où il y a plus de concentration des lignes du champ. Les pics constatés reviennent à l'encoche et aux aimants. Le passage d'un point face à une encoche à un autre face à une dent et d'un point face au circuit magnétique rotorique à un autre face à un aimant fait qu'il va y avoir des pics dans les amplitudes de l'induction magnétique (flux magnétique).

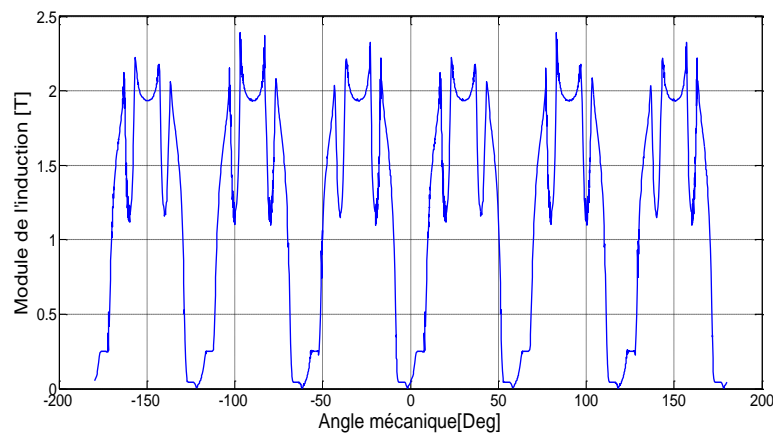


Figure IV.7. Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer

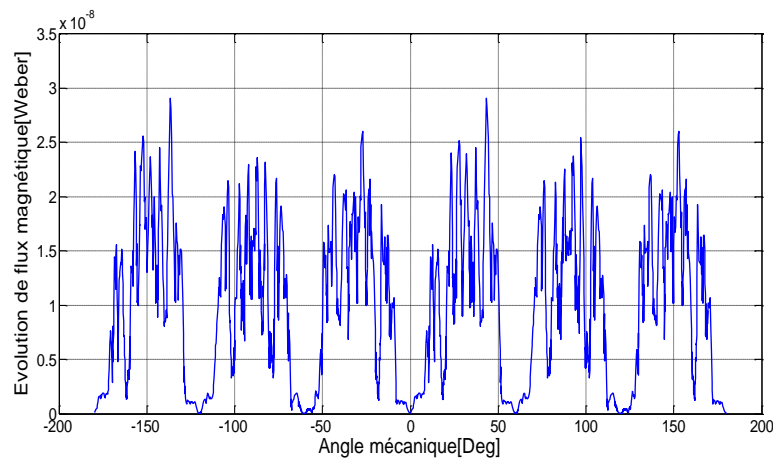


Figure IV.8. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer

IV.4. Diagnostic des défauts de la MSAP

Dans le but d'effectuer ce travail, on va intervenir au niveau de l'introduction des paramètres géométriques et physiques de la machine. Ceci pour modifier ces paramètres de telle façon à créer des défauts de différentes natures. Donc, on va modéliser et diagnostiquer

la machine en absence et en présence de ces défauts et faire ensuite une comparaison entre les spectres fréquentiels obtenus dans les deux cas : machine saine et machine défectueuse.

Parmi les techniques du diagnostic des défauts des machines électriques existantes, on va adopter celle du diagnostic par analyse du flux électromagnétique. Parce que le flux est la grandeur la plus dépendante des paramètres géométriques et physiques de la machine. La procédure à suivre, dans ce cas, est celle présentée dans l'organigramme ci-dessous.

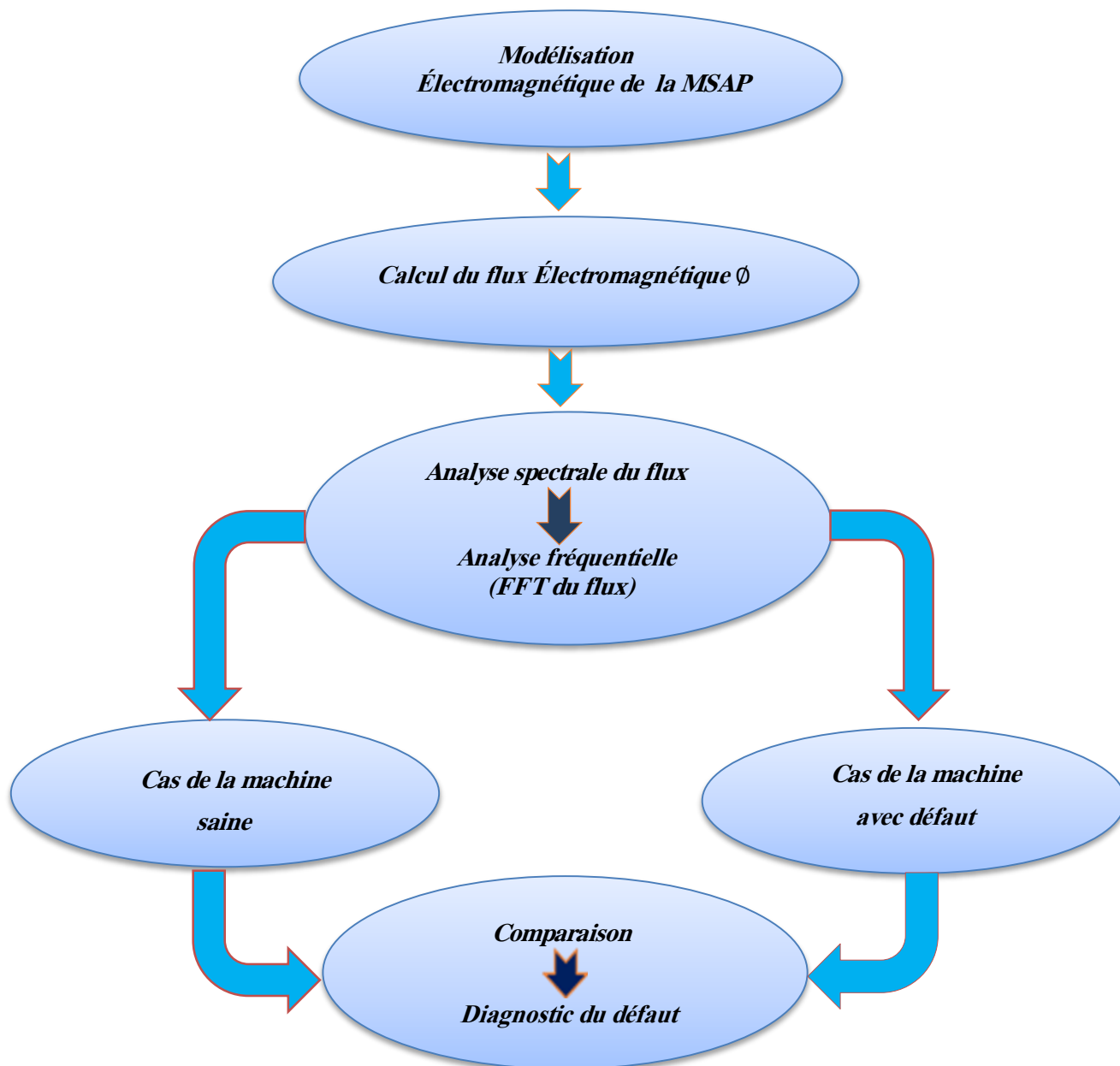


Figure IV.9. Procédure du diagnostic des défauts dans une MSAP par analyse du flux électromagnétique

L'analyse du flux électromagnétique dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée car le spectre résultant contient une source de renseignements sur la majorité des défauts électriques, magnétiques et mécaniques pouvant apparaître au sein d'une machine électrique.

L'analyse spectrale est basée sur l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (F.F.T) pour obtenir le spectre du flux électromagnétique.

Dans cette étude, on va considérer des défauts internes ainsi que des défauts externes et qui sont soit des défauts électriques ou mécaniques.

IV.4.1. Diagnostic de défauts mécaniques par analyse du flux électromagnétique

On va considérer deux des défauts fréquents, qu'ils soient de fabrication ou résultant d'une mauvaise exploitation de la machine, le premier est une fissure dans le stator et le deuxième défaut est un décalage d'un des aimants de rotor de sa place d'origine.

IV.4.1.1. Défaut de fissure dans le stator

Pour créer ce défaut, on a intervenu au niveau du dessin de la machine en ajoutant deux segments tel qu'il est montré dans la figure IV.10.

L'évolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer et le spectre fréquentiel correspondant sont présentés dans les deux figures IV.11 et IV.12, respectivement. Dans un souci de bien constater l'influence de la présence de défaut de fissure, une superposition des deux spectres: en présence et en absence de défaut, a été effectuée (figure IV.12).

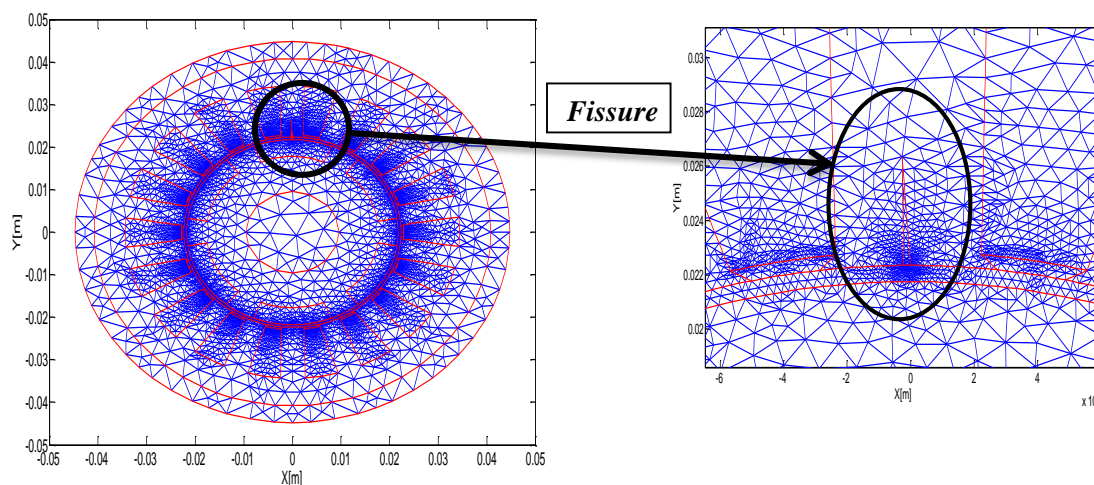


Figure IV.10. Maillage de la MSAP en présence de défaut de fissure dans le stator

On note l'apparition d'une distorsion dans toute la courbe de flux magnétique de l'état sain. Cela est dû à la localisation de la fissure adjacente à l'activité du champ tournant résultant et à son impact direct sur le champ à chaque instant. De plus, on remarque l'émergence d'autres harmoniques dans la courbe spectrale, tel que le deuxième et le quatrième harmonique, et une augmentation de l'amplitude des autres.

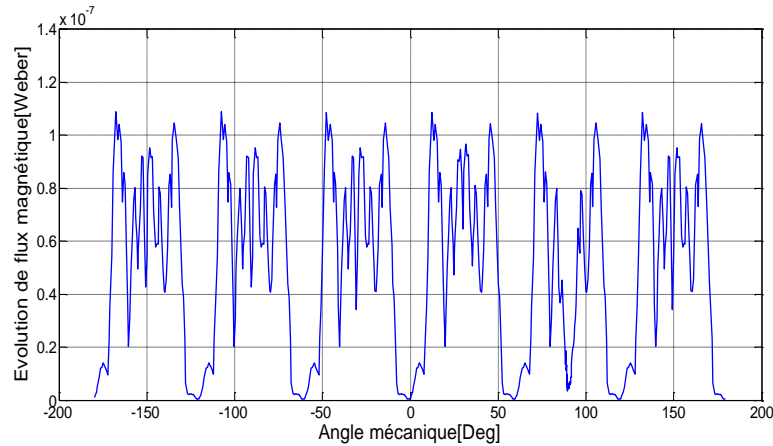


Figure IV.11. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer en présence d'un défaut de fissure dans le stator

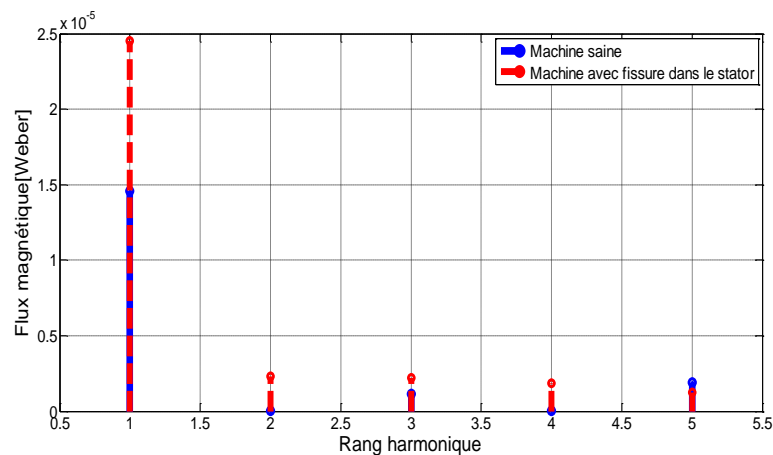


Figure IV.12. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence d'une fissure dans le stator

IV.4.1.2. Défaut d'aimant décalé

Ce défaut a été créé aussi en modifiant les propriétés géométriques du rotor au niveau de la partie du dessin de la machine. Donc, on a fait des modifications de telle façon qu'un des aimants sera décalé plus que les autres aimants à l'intérieur du rotor (figure

IV.13). Ce type de défaut peut apparaître dès la phase de construction de la machine (défaut d'assemblage des parties de la machine).

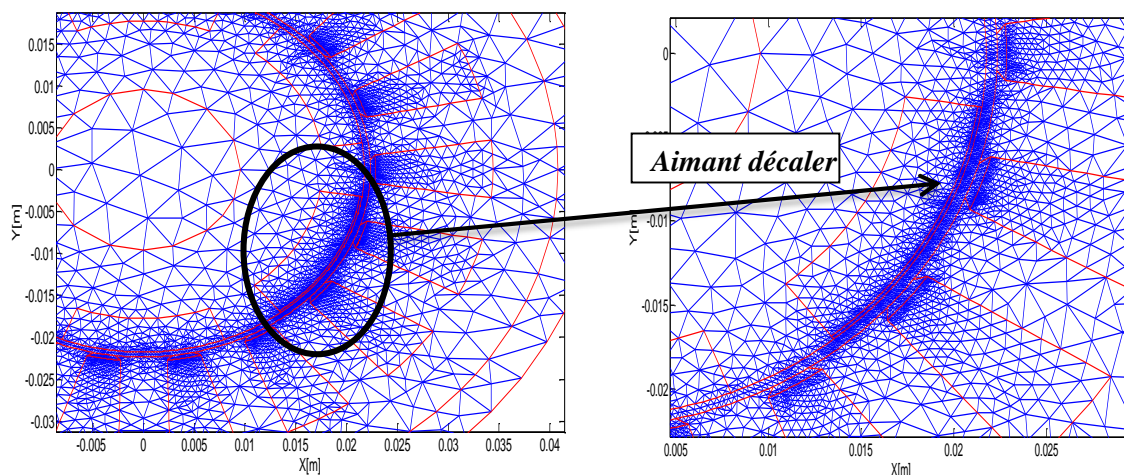


Figure IV.13. Maillage éléments finis de la MSAP avec aimant décaler

La figure IV.14 montre l'évolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer en présence d'un décalage d'un des aimants. Tandis que la figure IV.15 présente une superposition des contenus spectrales du flux en présence et en absence de ce défaut de décalage d'aimant.

A partir de ces figures, on peut clairement voir la diminution significative du flux électromagnétique face à l'aimant décalé. De plus, une apparition d'autres harmoniques est constatée dans le spectre fréquentiel. On remarque bien l'apparition des harmoniques d'ordes deux et quatre ainsi que l'augmentation des amplitudes des autres harmoniques.

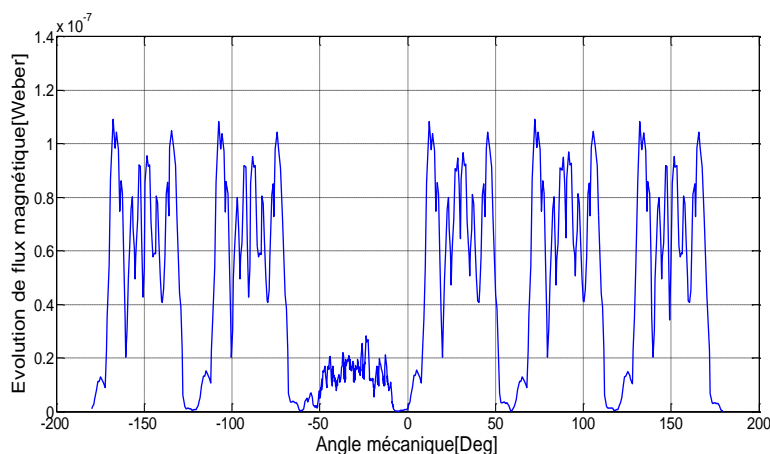


Figure IV.14. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer dans le cas d'un défaut d'aimant décalé

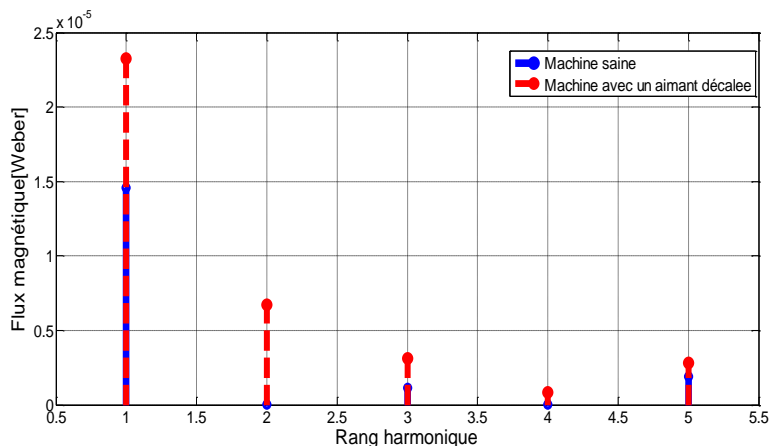


Figure IV.15. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence de défaut d'aimant décalé

IV.4.2. Diagnostic de défauts électriques par analyse du flux électromagnétique

Dans ce cas on va considérer deux défauts, l'un concerne une propriété physique du stator qui est la perméabilité relative et l'autre concerne la source d'alimentation lorsqu'elle est déséquilibrée.

IV.4.2.1. Défaut de perméabilité relative du stator non homogène

Dans ce type de défaut, nous examinons l'effet de la perméabilité relative qui est une propriété physique très importante dans la détermination de la qualité du matériau dont est fait le stator. La figure IV.16 présente la portion du stator là où il y a un défaut de perméabilité relative.

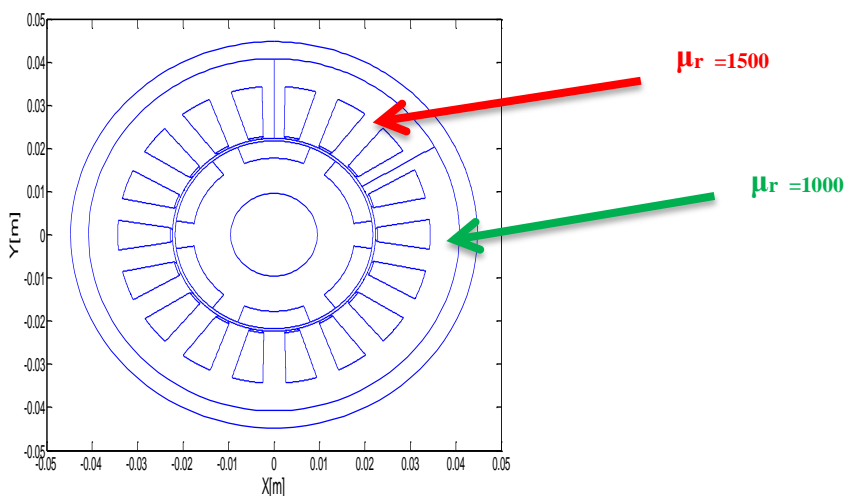


Figure IV.16. Portion du stator là où il y a un défaut de perméabilité relative

Les deux figures IV.17 et IV.18 montrent, respectivement, l'évolution du flux électromagnétique dans l'entrefer, ainsi que les spectres fréquentiels obtenus dans les deux cas : machine saine et machine avec défaut de perméabilité.

A travers ces deux figures, on peut constater une nette différence de la répartition du flux électromagnétique au niveau de l'entrefer par rapport à l'état sain de la machine, avec une augmentation de l'amplitude de certaines harmoniques et la disparition d'autres. Ceci explique l'effet de la perméabilité relative sur la distribution du champ électromagnétique et donc sur les performances de la machine.

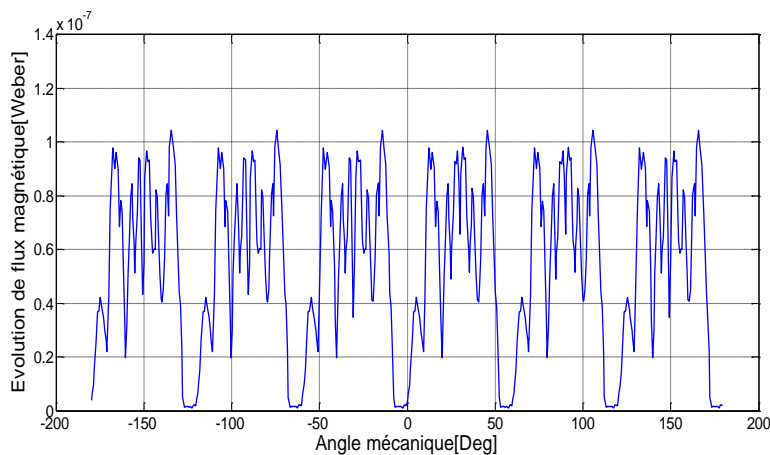


Figure IV.17. Evolution du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer dans le cas d'un défaut de perméabilité relative du stator

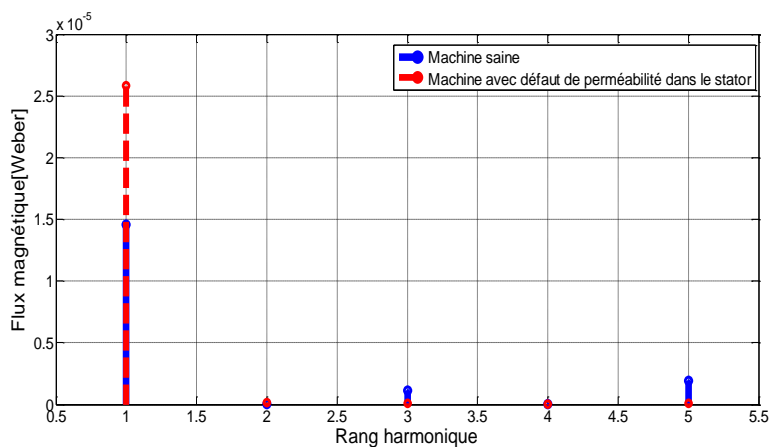


Figure IV.18. Contenu spectral du flux électromagnétique dans les deux cas : machine saine et en présence d'un défaut de perméabilité relative du stator

IV.4.2.2. Défaut de source d'alimentation déséquilibrée

Un déséquilibre de la source d'alimentation peut entraîner des contraintes sur l'ensemble des circuits de phase d'un système triphasé. Au niveau le plus simple, les trois phases de tension devraient toujours avoir la même grandeur.

Ce déséquilibre génère une circulation excessive du courant sur une ou plusieurs phases, ce qui augmente les températures de fonctionnement et dégrade l'isolement du moteur [70].

Pour introduire ce type de défaut, on doit intervenir dans le code de calcul électromagnétique au niveau de la partie introduction des propriétés physiques et imposer des valeurs de courant déséquilibrées. Donc, on a amplifié par 5 l'amplitude du courant d'une phase et modifier son déphasage. L'évolution du flux électromagnétique dans l'entrefer ainsi que le contenu spectral correspondant sont donnés, respectivement, par les figures IV.19 et IV.20.

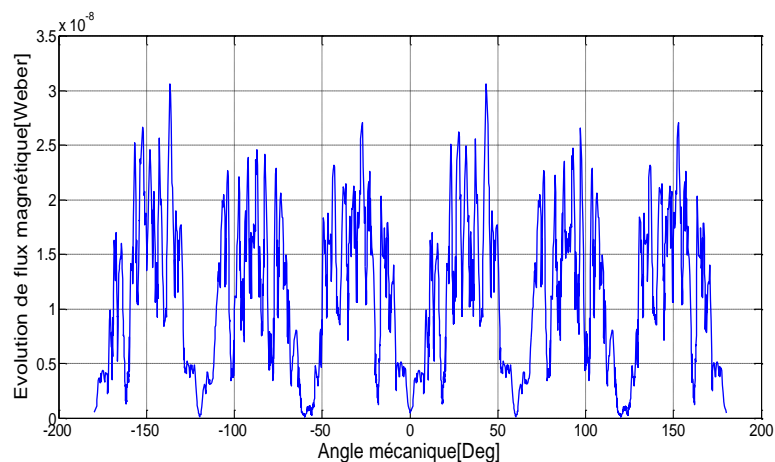


Figure IV.19. Evolution du flux électromagnétique dans l'entrefer dans le cas d'une source d'alimentation déséquilibrée

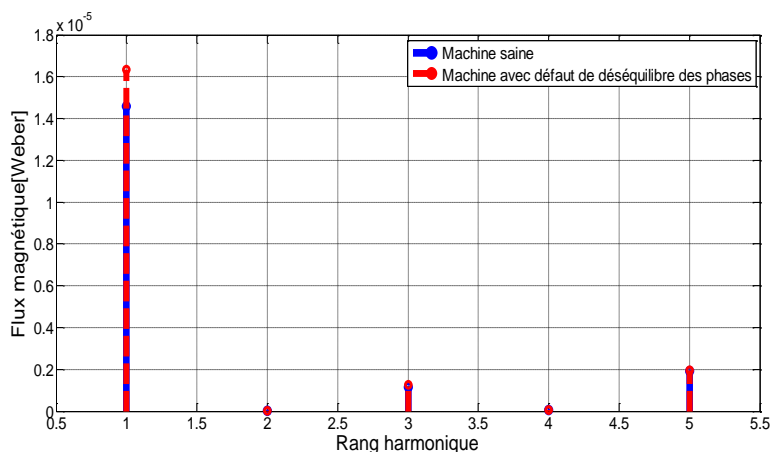


Figure IV.20. Contenu spectral du flux électromagnétique en présence et en absence de défaut de déséquilibre de la source

Ces résultats montrent bien que l'augmentation soudaine du courant dans une phase du moteur (déséquilibre des phases) a un effet significatif sur la distribution et l'amplitude du flux électromagnétique. Ceci est bien clair dans le contenu spectral du flux qui montre l'amplification des harmoniques d'ordres 1, 3 et 5. Donc, le flux électromagnétique est un bon indicateur de défaut d'alimentation déséquilibrée d'une MSAP.

Le déséquilibre des phases engendre des composantes inverses de courant qui provoquent des couples de freinage et des échauffements dans le moteur, et plus on augmente le courant de réseaux plus les performances électromagnétiques de la machine augmentent [71].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'application du code de calcul numérique développé pour la modélisation et le diagnostic d'une MSAP. Ce code permet la détermination des valeurs nodales du potentiel vecteur magnétique, de l'induction et du flux magnétiques.

La technique du diagnostic par analyse du flux électromagnétique est celle qui a été choisie pour le diagnostic des différents défauts de la MSAP.

L'analyse spectrale du flux et la comparaison des résultats obtenus, dans les deux cas : machine saine et machine défectueuse, nous ont bien montré l'intérêt de cette technique du diagnostic pour la détection de défauts de fissure et de perméabilité relative dans le stator. De plus, on a pu montrer l'intérêt de cette technique dans le cas d'un défaut de décalage d'aimant et de déséquilibre de sources d'alimentation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'étude porte sur la mise en œuvre d'un modèle d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) dans des conditions saines et défaillantes. Dans ce contexte, le modèle de paramètres géométriques et physiques développé, basé sur la méthode des éléments finis dans un environnement MATLAB, traite les défauts de la MSAP en analysant des quantités électromagnétiques.

Cette étude a visé le diagnostic des défauts d'une MSAP par analyse de flux électromagnétique. On a considéré quatre défauts : défaut de fissure dans le stator, défaut de décalage d'un des aimants, défaut de non homogénéité de perméabilité magnétique dans le circuit magnétique statorique et source d'alimentation déséquilibrée.

La méthode des éléments finis, qui est actuellement considérée comme l'une des méthodes numériques les plus puissantes pour résoudre des problèmes différentiels difficiles, a été appliquée pour calculer le champ électromagnétique. En connaissant ce dernier, on peut calculer le flux électromagnétique dans n'importe quel point de la machine. Une analyse spectrale du flux sur un contour dans l'entrefer a été effectuée.

La technique de diagnostic des défauts par analyse du flux électromagnétique a bien montré son efficacité pour la détection des défauts électriques et mécaniques qui ont été considérés. Cette technique est donc très bien adaptée à ce genre de défauts.

Cette étude peut également être élargie en considérant d'autres types de défauts (défaut de court-circuit, défaut de désaimantation, défaut de roulements, etc.). Comme on peut utiliser d'autres techniques de diagnostic, tels que les techniques de diagnostic par analyse des vibrations ou du bruit de la machine.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] K.Alameh, « contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents », automatique, université de normandie, 2017.français. « Nnt : 2017normr072 ».
- [2] Macamo bernardo amizade & maiga djibril « diagnostic des défauts statoriques d'un moteur synchrone à aimant permanant » mémoire de master académique, université saad dahlab de blida, 2016 / 2017
- [3] B.Multon : « les machines synchrones autopilotées » notes de cours : ecole normal supérieur de cochan, auteonne de bretagne, 2004.
- [4] Benbrahim amel, commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, université de batna, algérie, année 2009.
- [5] Farooq jawad ahmed, etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, thèse de doctorat, université de technologie de belfort, montbeliard, france. Année 2008.
- [6] M.s.mahgoun. Application de la commande aux systèmes linéaires perturbés, mémoire de magister, université ferhat abbas-setif (ufas), 2012
- [7] H.aid, w.aina. synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entrainement électrique a vitesse variable basé sur un moteur synchrone a aimants permanents, mémoire de master, université abou bekr belkaid, tlemcen, 2013
- [8] M.Oubidar, s.bendaoud. Machine synchrone/asynchrone, projet de fin d'étude en ingénierie, université du québec en abitibi-témiscamingue, 2010
- [9] Karoui abdelmounaim, brahimi ammar, « détection de défaut statorique par suivi paramétrique d'un moteur synchrone a aimants permanents », master académique, ukm ouargla, 09 juin 2014.

- [10] Aubert brice « détection des courts-circuits inter-spores dans les générateurs synchrones a aimants permanents - méthodes basées modèles et filtre de kalman étendu » thèse doctorat de l'université de toulouse 2014.
- [11] M.D. Bidart. Commande coopérative des systèmes monoconvertisseurs multimachines synchrones, thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de toulouse (inp toulouse), 2011
- [12] M. Brice aubert, « détection des courts-circuits inter-spores dans les generateurs synchrones a aimants permanents : methodes basees modeles et filtre de kalman étendu, » doctorat de l'université de toulouse 31mars 2014.
- [13] « Rare-Earth permanent magnets acodym– vacomax », brochure commercial, société vaccuumschmelze, 2012
- [14] M. Staroswiecki and a.l. gehin, « from control to supervision », in annual reviews in control, vol 25, pp 1-11, 2001.
- [15] R. Casimir and all, «Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronous motor in case of defects, » in 9th IEEE International Power Electronics Congress - CIEP 2004, 2004, pp.101-108. Jadwal
- [16] S.Rajagopalan, « detection of rotor and load faults in brushless dc motors operating under stationary and non-stationary conditions », phd dissertation, school of electrical and computer engineering, georgia institute of technology, usa, 2006.
- [17] B.Vaseghi, « contribution a l'étude des machines electriques en présence de défaut entre-spores modélisation – réduction du courant de défaut », thèse de doctorat, université nancy, 2009.
- [18] L.Liu, « robust fault detection and diagnosis for permanent magnet synchronous motors », florida state university, 2006.
- [19] A.Ibrahim, « contribution au diagnostic de machines électromécaniques : exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », université de jean monnet - saint-etienne, 2009.
- [20] R.Z.S.Haddad, « fault detection and identification in permanent magnet synchronous machines », Michigan state university, 2016.

- [21] B. M. Ebrahimi, j. faiz, and m. j. roshtkhari, « static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors, » IEEE trans. ind. electron. vol. 56, no. 11, pp. 4727–4739, 2009.
- [22] G.B.Kliman, w.j. permerlani, b yazici, r.a. koegl, j.mazereeuw, « sensorless, online motor diagnostics », iee computer application in power, vol. 10, issue 2, pp.39-43, april 1997.
- [23] S.Barker, « avoiding premature bearing failure with inverter fed induction motors », power engineering journal, vol.14, issue 4, pp.182-189, aug.2000.
- [24] A.Ibrahim, « contribution au diagnostic de machines électromécaniques : exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », université de jean Monnet - Saint-Etienne, 2009.
- [25] Belhadj Saad « diagnostique des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes techniques de commande » lgep de l'université de Biskra 2014.défaut statorique.
- [26] A. H. Bonnett, g. c. soukup, « cause and analysis of stator and rotor failures in threephase squirrel cage induction motors » iee transactions on industry applications, vol.28 no.4, pp 921-937, aug 1992.
- [27] M .khov, « surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : détection des courts-circuits par suivi paramétrique », « thèse de doctorat de l'université de toulouse, le 17 décembre 2009. »
- [28] Bechkaoui Amar « diagnostic des défauts dans les machines synchrones à vitesse variable » doctorat, université badji Mokhtar –Annaba, 14 juin 2016.
- [29] H.Grad, « apport de la mcsa par rapport à l'analyse vibratoire pour le suivi de l'état de la machine asynchrone », master génie électrique, université Mohammed v – Soussi Maroc, 2013.
- [30] Bui.Viet-Phuong, coulomb.jean-louis, « diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite application a l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur a vide », thèse de doctorat, génie électrique, institut national polytechnique de grenoble, 04.10.2007.

- [31] B.Raison, « détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique », thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de grenoble, 1999.
- [32] H.T. Grimmelius, « three state-of-the-art methodes for condition monitoring », 1999.
- [33] S.Nandi, H.A.Toliat, x.li, « Condition monitoring and fault diagnostic of electric machines - a review », *eee transactions on energy conversion*, vol. 20, no. 4 déc. 2005.
- [34] F.Babaa « modélisation et diagnostic des machines asynchrones : application à la détection de défaut », université mentourie constantine.
- [35] R. Casimir « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes », thèse de doctorat, ecole central de lyon, 2003.
- [36] E.Boussage, s.bouaziz, « detection de defauts de court- circuit entres spires statoriques d'une machines synchrone à aimants permanents », mémoire de master, université de msila, 2018.
- [37] L. Baghli « contribution à la commande de la machine asynchrone par estimation paramétriques », thèse de doctorat, université de poitier, 2002.
- [38] B.Monja ben khader « diagnostic de défaut de la machine asynchrone par réseaux de neurones », thèse de doctorat, génie électrique, tunis, 2009.
- [39] M. Khelif « contribution à l'étude et la prédiction des défauts de vieillissement par fatigue thermique des composants d'électronique de puissance », thèse de doctorant, ecole centrale de lyon, cegely, 1994.
- [40] R.E. kalman and R.S. bucy « new results in linear filtering and prediction theory », *transactions of ASME journal of basic engineering*, vol.83d, pp.35-45, March 1961.
- [41] M.S. naït-saïd, m.e.h. benbouzid et a. benchaib « detection of broken bars in induction motors using an extended kalman filter for rotor resistance sensor less estimation », *ieee transactions on energy conversion*, vol.15, no.1, pp. 66-70, mars 2000.
- [42] M. Gaouaoui « diagnostic par reconnaissance des formes : application à la machine asynchrone », thèse de magister. Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Algérie 2012.

- [43] P.J. Tavner, b.g. gaydon and d.m.ward «monitoring generators and large motors », IEEE proceedings, vol 133, pt, b n°4 may 1986.
- [44] P. Alger «the induction machine their behavior and uses », oxford press 1970.
- [45] N, Ferkha. Diagnostic de pannes dans les installations électriques. Jijel. Mohamed Seddiki ben Yahia, 2éme année master, cours, 2020.
- [46] D. Toumi «détection des défauts rotoriques dans la machine asynchrone (cassure des barres et excentricité) », mémoire de magister, usto Oran 2002.
- [47] Boudouia khedidja « diagnostic automatique des défauts dans les moteurs à induction par la méthode nouro-floue » mémoire de magister, usto Oran 2002.
- [48] Penman, j., sedding, h.g., lloyd, b.a., fink, w.t. « detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors », iee transactions on energy conversion, 1994, pp. 652-658.
- [49] D.Yang and j. penman « intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring », pages 461-470, proceedings of comadem 2000, 3-8 December, 2000.
- [50] W.Jarzyrna « diagnostic characteristics of axial flux an induction machine », department of electrical drive system's, technical university of Lublin, Poland.
- [51] J. S. Hsu « monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation », IEEE transactions on industry applications, vol. 31, no.5, sept. /Oct. 1995, pp. 1016-1021.
- [52] D.Yang and j.penman, « intelligent detection of induction motor bearing faults using current and vibration monitoring », proceeding of comadem 2000, 3-8 December 2000pages 461-470.
- [53] M.Drif, n.benouzza, b.kraloua, a. bendiabdellah and j.a.dente, « induction motor load effect diagnostic by instantaneous power spectrum », proceeding of acemp 2001, June 27-29, 2001, kujadasi, turkey.
- [54] M.Drif, n.benouzza, b.kraloua, a.bendiabdellah and j.a.dente, « squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach », proceeding of IEEE sdemped 01, Sep. 1-3, 2001, gorizia, Italy.

- [55] C. Gerada; k.j Bradley, « integrated pm machine design for an aircraft ema », industrial electronics, IEEE transactions on, volume 55, issue 9, page(s):3300 – 3306, sept. 2008.
- [56] M. Sahraoui « étude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones », thèse de doctorat, université de Biskra, déc. 2010.
- [57] S.S.Rao, « engineering optimisation, theory and practice », john Wiley & sons, New York, 1996.
- [58] C.W.Caroll, « the creates response surface technique for optimizing nonlinear restrained systems », operational research, no.9, pp. 169-184, 1961.
- [59] H.Achouri, m.belaggoun, « étude et modélisation de la machine synchrone à réluctance variable », mémoire d'ingénieur, université de Jijel, 2010.
- [60] I.Bouchareb, « modélisation et simulation de défauts d'une machine synchrone à réluctance variable », mémoire de magister, université de Constantine, 2009.
- [61] R.Raonimanarivo, a.f.antonio, « étude de fonctionnement des moteurs linéairesreluctant et hybride », mémoire d'ingénieur, école supérieure polytechnique d'antananarivo, 2004.
- [62] R.Amieur, « étude et conception d'une machine synchrone à aimants permanents », mémoire d'ingénieur, université de Jijel, 2009.
- [63] A.Fedsi, a.tioune, « optimisation de forme d'une machine synchrone à réluctance variable », mémoire d'ingénieur, université de jijel, 2008.
- [64] I.Gourragui, « modélisation numérique, optimisation et commande de machines à réluctance variable », thèse de doctorat, université de Metz, 2006.
- [65] N.Chabou, s.zigha, « l'influence de l'alimentation en tension sur les forces magnétiques : application aux actionneurs linéaire », mémoire d'ingénieur, université de Jijel, 2005.
- [66] K.Bouhrine, c.merrouche, « modèles éléments finis pour le calcul de forces d'origine magnétiques », mémoire d'ingénieur, université de Jijel, 2005.
- [67] S.Ferkha, z.belkhelfa, « modélisation et diagnostic des défaillances d'une mas par analyse de ses grandeurs électromagnétiques », mémoire de master, université de Jijel, 2017.

- [68] N.Ferkha, « modélisation dynamique et conception optimale d'une machine électrique en vue de la réduction des phénomène vibratoire » thèse de doctorat, université de Jijel.
- [69] Yahi, Sara. Boufligha, Souad. N, hacib-ferkha. « Modélisation et diagnostic des défaillances d'une msap par analyse ses grandeurs électromagnétiques » mémoire master. . Électrotechnique. Université de Jijel, 2019.
- [70] Fluke corporation for manufacturing. 13 causes fréquentes de panne de moteur. [Enligne]. (Modifié le 14 mai 2021). Disponible sur : « <https://www.fluke.com/fr-fr/apprendre/blog/moteurs-variateurs-pompes-compresseurs/13-causes-frequentes-de-panne-de-moteur> » (consulté le 18 juin 2021)
- [71] Yakhlafe, Nabil. Compatibilité électromagnétique : sources de perturbations. Jijel. Mohamed Seddiki ben Yahia, 1ère année master, cours, 2020, 13p