

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

N° :/2022

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Scienceset Technologies

FILIERE: Electrotechnique

SPECIALITE : Electrotechnique Industrielle

Thème

Diagnostic d'une MSAP
par analyse vibratoire

Présenté Par :

Boutbiba Walid

Encadré Par :

Dr : Hacib-Ferkha Nassira

Date de soutenance: 14 / 07 / 2022

Jury de Soutenance

Président : Dounia Sedira

Grade MCB

Univ MSB jijel

Encadreur : Ferkha Nassira

Grade MCB

Univ MSB jijel

Examineur 1: Ammar Boulassel

Grade MCB

Univ MSB jijel

Promotion : 2021 /2022



Remerciements et dédicaces

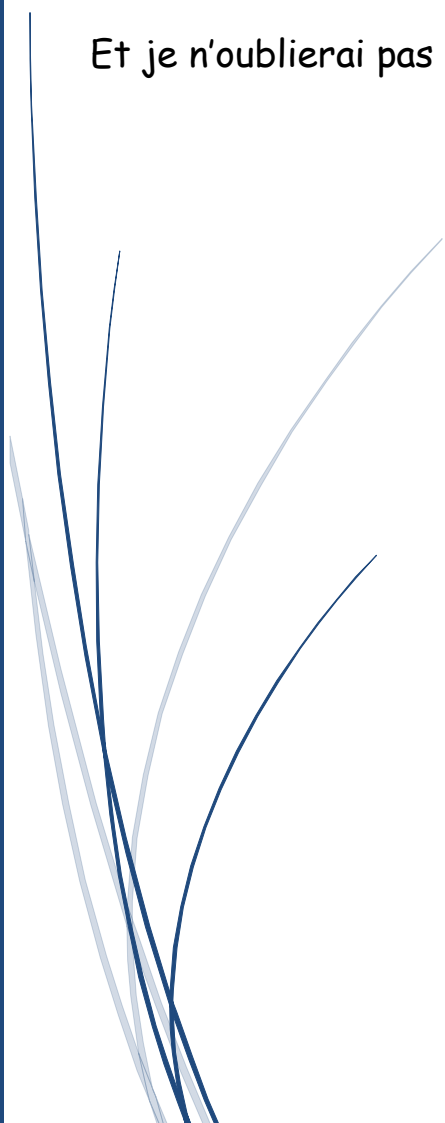
Remerciements

Je tiens tout d'abord de remercier et d'exprimer ma gratitude envers **Dieu** tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

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

Je tiens aussi à présenter mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger mon modeste travail.

Et je n'oublierai pas tous les personnes qui m'ont aidé pour finaliser ce mémoire.





Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à ceux
Qui me sont les plus chers au monde :*

Ma mère

Mon père « Allah yerahmou »

Mes chers frères : Houssam, Ahmed, Mouhammed Et Ammar.

Et mes chères sœurs : Farida, Mounira , Manal et Saïda

Je le dédie aussi à :

Toute ma famille

Tous mes amis

Et surtout : Issam., Amine, Nadjwa, Hadjer Et Louhra.



Sommaire

Sommaire

<i>Introduction général</i>	1
-----------------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur les défauts dans les MSAP

Introduction	3
I.1- Généralités sur les MSAP	3
I.1.1- Constitution d'une MSAP	4
I.1.2- Principe de fonctionnement d'une MSAP	5
I.1.3- Types des machines synchrones à aimants permanents	6
I.1.4- Avantages de la MSAP	6
I.1.5- Inconvénients de la MSAP	7
I.1.6- Domaines d'application des MSAP	7
I.2- C'est quoi un aimants permanents ?	7
I.3- Différents types d'aimants permanents	8
I.3.1- Matériaux céramiques : ferrites	9
I.3.2- Matériaux métalliques	9
I.4- Présentation des différentes défaillances des MSAP	12
I.4.1- Défauts statoriques	13
I.4.1.1- Court-circuit entre spires	14
I.4.1.2- Court-circuit entre phases	14
I.4.1.3- Défauts d'isolant	15
I.4.2- Défauts rotoriques	15
I.4.2.1- Excentricité statique et dynamique	16
I.4.2.2- Désaimantation des aimants permanents	17
I.4.2.3- Défauts de roulements	17
Conclusion	18

Chapitre II

Diagnostic des défauts dans les machines électriques

Introduction	19
II.1- Mise en œuvre du diagnostic	19
II.1.1- Identification du défaut	20
II.1.2- Localisation de la source de perturbation	20

II.2- Différentes étapes de diagnostic	20
II.2.1- Etape d'acquisition de données	20
II.2.2- Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts	21
II.2.3- Etape de détection	21
II.2.4- Etape de localisation	21
II.2.5- Etape de prise de décision	21
II.3- Fiabilité du diagnostic	22
II.4- Diagnostic appliqué aux machines électriques	22
II.5- Etat de l'art des méthodes de diagnostic	23
II.5.1- Différents types de maintenance	23
II.5.2- Méthodes de diagnostic des machines électriques	24
II.5.2.1- Méthodes de connaissances	24
II.5.2.2- Méthodes de redondances analytiques	25
II.5.2.3- Méthodes par modélisation de signaux	25
II.6- Techniques de traitement du signal	25
II.6.1- Analyse temporelle	25
II.6.2- Analyse fréquentielle	26
II.6.3- Analyse temps-fréquence	26
II.7- Types de grandeurs à analyser	26
II.8- Techniques de détection des défauts dans les machines électriques	27
II.8.1- Méthodes de diagnostic sans modèle	27
II.8.1.1- Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques	27
II.8.1.2- Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	28
II.8.1.3- Diagnostic par mesure du couple électromagnétique	30
II.8.1.4- Diagnostic par mesure de température	30
II.8.1.5- Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites	31
II.8.1.6- Diagnostic par mesure de la puissance instantanée	31
II.8.1.7- Diagnostic par l'analyse des lubrifiants	31
II.8.1.8- Diagnostic par mesure du courant statorique	31
II.8.2- Méthodes de diagnostic avec modèle	32
Conclusion	33

Chapitre III

Modélisation magnéto-mécanique : Calcul vibratoire

Introduction	34
III.1- Intérêt du calcul du champ électromagnétique	34
III.2- Calcul du champ électromagnétique	35
III.2.1- Equations de Maxwell	35
III.2.2- Lois de comportement des matériaux	36
III.2.3- Conditions de passage entre deux milieux différents	38
III.2.4- Hypothèses simplificatrices	39
III.2.5- Problème électromagnétique	40
III.2.6- Formulations électromagnétiques	40
III.2.6.1- Formulation magnétodynamique	41
III.2.7- Conditions aux limites	43
III.2.8- Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles	44
III.2.8.1- Méthodes analytiques	44
III.2.8.2- Méthodes semi-analytiques	45
III.2.8.3- Méthodes numériques	45
III.3- Calcul des forces magnétiques	49
III.4- Calcul vibratoire	50
Conclusion	53

Chapitre IV

Application et résultats

Introduction	54
IV.1- Objectif de l'étude	54
IV.2- Caractéristiques géométriques et physiques de la machine à étudier	54
IV.2.1- Géométrie	54
IV.2.2- Caractéristiques	56
IV.2.3- Création des régions	56
IV.3- Modélisation magnéto-mécanique de la MSAP	57
IV.3.1- Procédure suivie	57
IV.3.2- Résultats obtenus	59
IV.4- Diagnostic des défauts de la MSAP étudiée par analyse vibratoire	64
IV.4.1- Défaut de circuit magnétique (fissure)	64

IV.4.2- Défaut de court-circuit	66
IV.4.3- Défaut de désaimantation des aimants permanents	68
IV.4.4- défaut d'excentricité	69
Conclusion.....	72
<i>Conclusion générale</i>.....	73
Bibliographie	74

Listes des figures

Listes des figures

Chapitre I

Généralités sur les défauts dans les MSAP

Figure I.1. Structure d'un moteur synchrone à aimants permanents	4
Figure I.2. Schéma d'un bobinage statorique régulier	4
Figure I.3. Structure d'une machine synchrone à aimants permanents montés en surface	5
Figure I.4. Différentes structures rotoriques pour une MSAP	6
Figure I.5. Evolution de la densité d'énergie $(BH)_{\max}$ des aimants permanents	8
Figure I.6. Aimants ferrites	9
Figure I.7. Aimants Alnico	10
Figure I.8. Samarium Cobalt (Sm-Co)	11
Figure I.9. Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)	11
Figure I.10. Principaux défauts des MSAP	13
Figure I.11. Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques	14
Figure I.12. Types d'excentricité : a) statique, b) dynamique, c) mixte	16
Figure I.13. Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée	18

Chapitre II

Diagnostic des défauts dans les machines électriques

Figure II.1. Différentes étapes du processus de diagnostic	20
Figure II.2. Méthodes de diagnostic des machines électriques	24
Figure II.3. MAS avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique	28
Figure II.4. Flux de dispersion	29
Figure II.5. Champs axial et radial dans une machine électrique	29
Figure II.6. Image colorée infrarouge thermique	30

Chapitre III

Modélisation magnéto-mécanique : Calcul vibratoire

Figure III.1. Domaine d'étude avec deux milieux différents M1 et M2	39
Figure III.2. Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique	40
Figure III.3. Diagramme de Toni	41
Figure III.4. Domaine d'étude borné	43
Figure III.5. Éléments classiques en une et deux dimensions	47
Figure III.6. Représentation des conditions aux limites d'un problème mécanique	51

Chapitre IV

Application et résultats

Figure IV.1. Photo de la MSAP à étudier	55
Figure IV.2. Configuration géométrique de la MSAP étudiée	55
Figure IV.3. Différentes régions constituant la MSAP étudiée	56
Figure IV.4. Organigramme du code de calcul magnéto-mécanique appliqué	59
Figure IV.5. Maillage éléments finis adopté à cette étude	60
Figure IV.6. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique	60
Figure IV.7. Distribution spatiale des forces magnétiques	61
Figure IV.8. Evolution de la force magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques	61
Figure IV.9. Spectre fréquentiel de la force magnétique obtenue suivant un	62
Figure IV.10. Amplitude du déplacement obtenu sur la surface externe de la machine	63
Figure IV.11. Amplitude de l'accélération obtenue sur la surface externe de la machine	63
Figure IV.12. Maillage de la MSAP en présence de défaut de fissure	64
Figure IV.13. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de fissure	65
Figure IV.14. Spectre fréquentiel du déplacement en présence et	65
Figure IV.15. Spectre fréquentiel de l'accélération en présence et	66
Figure IV.16. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de court-circuit	66
Figure IV.17. Spectres fréquentsiels de déplacement dans les deux cas: machine saine	67
Figure IV.18. Spectres fréquentsiels de l'accélération dans les deux cas: machine saine	67
Figure IV.19. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de désaimantation	68
Figure IV.20. Spectres fréquentsiels de déplacement en présence et en absence	69
Figure IV.21. Spectres fréquentsiels de l'accélération en présence et en absence	69
Figure IV.22. Maillage éléments finis de la MSAP en présence de défaut d'excentricité	70

Figure IV.23. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence d'un défaut d'excentricité70

Figure IV.24. Spectre fréquentiel de déplacement en présence et en absence71

Figure IV.25. Spectre fréquentiel de l'accélération en présence et en absence71

Liste des tableaux

Chapitre II

Diagnostic des défauts dans les machines électriques

Tableau II.1. Pannes typiques observées sur un moteur	23
--	----

Chapitre IV

Application et résultats

Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine étudiée	56
Tableau IV.2. Caractéristiques mécaniques du stator et de la carcasse	58
Tableau IV.3. Fréquences propres de l'ensemble stator-carcasse	62

Introduction générale

Introduction générale

La maintenance prédictive et le diagnostic de défauts dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont pris une place importante, au cours des dernières décennies, puisque les exigences de sécurité, de disponibilité et de fiabilité des processus industriels sont devenues de plus en plus sévères. Cela revient principalement à l'incorporation prépondérante de ce type de machines dans de nombreuses applications critiques telles que: l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, la robotique et le médical [1].

L'augmentation croissante de l'utilisation des machines électriques dans diverses applications a grandement contribué à la forte demande d'énergie dans le monde. Afin de limiter l'importante consommation d'énergie et les problèmes d'environnement générés, les solutions d'entraînements électriques plus compactes et à rendement plus élevé sont devenues très recherchées. Ainsi, les machines conventionnelles sont de plus en plus remplacées par les machines synchrones à aimants permanents à structures spéciales.

Plusieurs techniques de détection de défauts sont aujourd'hui à la disposition des ingénieurs de maintenance, pour la détection des défauts d'origine électrique ou mécanique, la détection ultrasonore et l'analyse des vibrations mécaniques.

Dans ce travail de fin d'études, on va s'intéresser à la modélisation et au diagnostic des défauts d'une MSAP par analyse vibratoire. Dans le but de présenter cette étude, ce mémoire va être divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre a pour objectif de donner quelques rappels élémentaires sur la MSAP. De plus, une présentation des différents défauts pouvant survenir dans ce type de machines va être effectuée.

Le deuxième chapitre vise la présentation de la procédure ainsi que des méthodes de diagnostic de ces défauts. Ces méthodes sont classées en deux catégories, celles qui utilisent un modèle mathématique du système et celles qui consistent à analyser les signaux mesurés. De plus, on va discuter les techniques de détection des défauts dans les machines électriques.

Le troisième chapitre va être consacré à la présentation des différentes formulations permettant de traduire le comportement de tous les systèmes électromagnétiques. Premièrement, on va présenter les différentes méthodes de résolution de ces formulations. On va viser plus

particulièrement, la méthode des éléments finis et son emploi en électrotechnique pour la modélisation des dispositifs électromagnétiques. Ensuite, on va donner un aperçu sur les méthodes de calcul des forces électromagnétiques et celles utilisées pour le calcul de la réponse dynamique d'une structure.

Dans le dernier chapitre, on va exploiter les modèles numériques développés pour la modélisation et le diagnostic d'une MSAP en considérant quatre types de défauts. Les résultats obtenus vont être présentés dans les deux cas: machine saine et machine défectueuse.

Enfin, ce mémoire va être clôturé par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
Généralités sur les défauts dans les
MSAP

Chapitre I

Généralités sur les défauts dans les MSAP

Introduction

Actuellement, environ 65% de l'énergie électrique est consommée par les machines électriques, l'amélioration de ces machines est plus que jamais souhaitable. Les machines électriques sont utilisées depuis presque deux siècles. En ce moment, L'exigence en termes de fiabilité et de disponibilité sur les machines électriques ne cesse d'accroître non seulement chez les utilisateurs mais aussi chez les fabricants.

Les moteurs à aimants se développent de manière importante à l'heure actuelle grâce à la mise au point d'aimants de bonne qualité, ce qui permet l'obtention de couple massique élevé. Aussi l'utilisation d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement. Ces apports importants sont le résultat de l'élargissement de leur gamme d'application [2].

Ce premier chapitre a pour objectif de donner quelques rappels élémentaires sur la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). De plus, une présentation des différents défauts pouvant survenir dans ce type de machines va être effectuée.

I.1- Généralités sur les MSAP

Le terme machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Ce type de machines peut avoir un fonctionnement en moteur ou en génératrice. C'est seulement le sens de transmission de l'énergie qui distingue les deux fonctionnements : Le moteur synchrone transforme l'énergie électrique sous forme de courant alternatif en énergie mécanique tandis que la génératrice transforme l'énergie mécanique en énergie électrique [3], [4].

Cette famille de machines regroupe plusieurs sous familles telles que :

- Les machines synchrones à rotor bobiné.
- Les machines synchrones à aimants permanents.
- Les machines synchrones à réluctance variable.



Figure I.1. Structure d'un moteur synchrone à aimants permanents

I.1.1- Constitution d'une MSAP

La machine synchrone à aimants permanents se compose d'un stator triphasé et d'un rotor monté avec des aimants permanents qui fournissent le flux de champ. Cette machine n'a pas besoin d'un approvisionnement extérieur pour exciter le rotor.

➤ **Stator** : Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage : Les bobinages dits réguliers, parmi lesquels on trouve les bobinages à pas diamétral et les bobinages à pas raccourcis. La figure I.2 présente un exemple de bobinage statorique régulier à une seule voie par phase et deux paires de pôles [5].

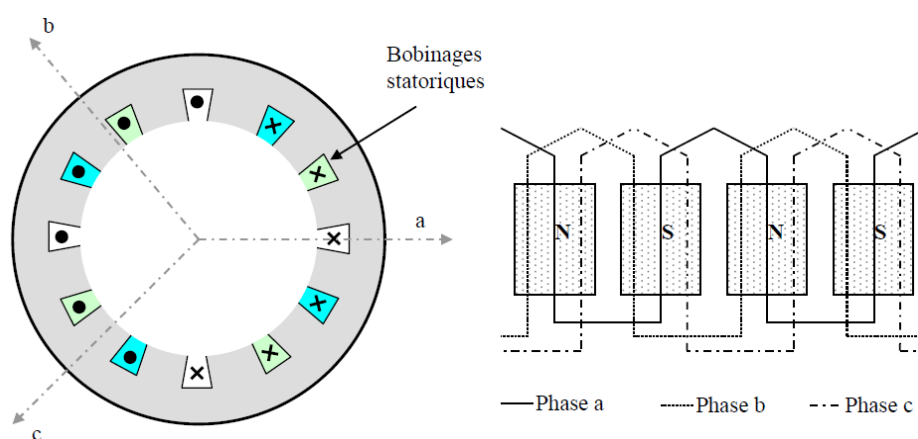


Figure I.2. Schéma d'un bobinage statorique régulier

➤ **Rotor** : Le rotor est quant à lui constitué d'un noyau de fer sur lequel sont disposés des aimants permanents qui servent à générer une excitation permanente. Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques « durs », c'est-à-dire des matériaux qui, une fois aimantés, conservent leur aimantation à la température d'utilisation. Les aimants permanents peuvent être montés en surface ou insérés dans le rotor. A titre d'exemple la figure I.3 présente une machine synchrone à aimants montés en surface [5].

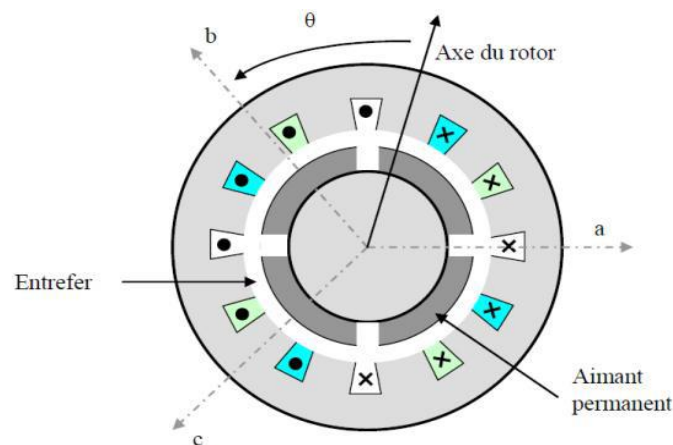


Figure I.3. Structure d'une machine synchrone à aimants permanents montés en surface

I.1.2- Principe de fonctionnement d'une MSAP

La MSAP est un système électromécanique, dont le fonctionnement est basé sur le principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor. Le champ tournant de l'induit (stator) est créé par les courants quasi-sinusoïdaux parcourant ses enroulements et générés par la source d'alimentation en tension ou en courant. L'inducteur (rotor) est la partie mobile de la machine, liée à son axe de rotation et sur lequel sont disposés les aimants permanents générant son excitation permanente [7].

Les courants statoriques créent dans l'entrefer un champ magnétique tournant de même fréquence que ces courants. Les aimants permanents qui remplacent l'enroulement rotoriques n'ont pas besoins d'être alimentés. Le champ magnétique ainsi créé cherche en permanence à s'aligner sur celui du stator. C'est pour cela que cette machine est dite synchrone : elle tourne à la même vitesse que le champ statorique (la vitesse de synchronisme).

I.1.3- Types des machines synchrones à aimants permanents

Il existe plusieurs types de la MSAP qui dépendent du placement des aimants permanents sur le rotor de la machine. En effet, la disposition des aimants a une influence directe sur la saillance de la machine.

Les principales structures des rotors utilisées dans les MSAP sont les suivantes [6] :

- **Aimants montés en surface (machine à pôles lisses) :** Dans ce type de machines, les aimants sont collés directement à la surface du rotor. La perméabilité des aimants étant proche de celle de l'air, l'entrefer de la machine peut être considéré comme constant (Figure I.4.a).
- **Aimants insérés (machine à pôles saillants) :** Cette structure est analogue à celle des aimants montés en surface. Cette machine à pôles saillants présente également un bon rapport poids puissance et le collage des aimants ne nécessite plus d'être consolidé (Figure I.4.b).
- **Aimants enterrés (machine à pôles saillants) :** Dans ce type de machines, les aimants permanents sont directement enterrés dans le rotor (Figure I.4.c).
- **Aimants à concentration de flux (machine à pôles saillants) :** Cette structure utilise une distribution tangentielle de l'aimantation (au lieu d'une distribution radiale dans les structures précédentes), ce qui implique une forte concentration du flux magnétique dans le rotor (Figure I.4.d).

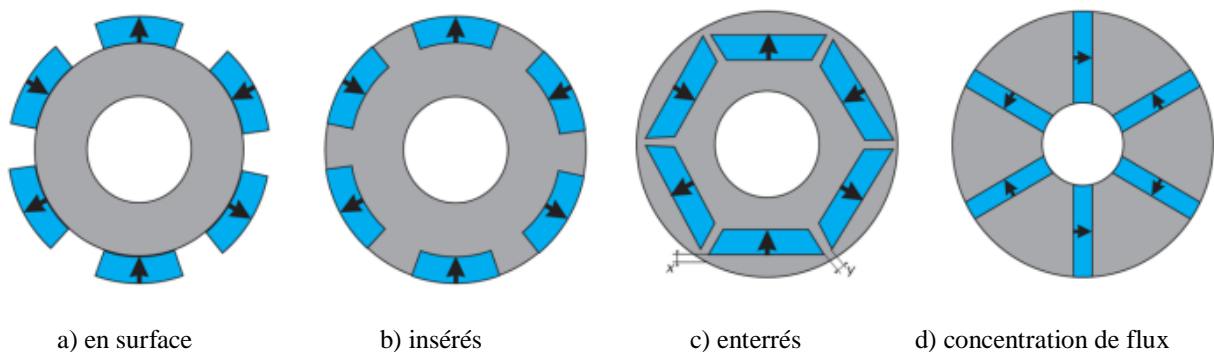


Figure I.4. Différentes structures rotoriques pour une MSAP

I.1.4- Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines tels que [8] :

- ✓ Fonctionnement en survitesse,
- ✓ Un bon rendement,

- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue,
- ✓ Puissances massiques élevées,
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage,
- ✓ Absence de contacts glissants

I.1.5- Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on peut citer [8] :

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

I.1.6- Domaines d'application des MSAP

La MSAP peut être très utile dans de nombreuses applications, comme [9] :

- ✓ les applications robotiques,
- ✓ les automobiles,
- ✓ les applications de l'énergie de l'éolienne,
- ✓ la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins,
- ✓ les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- ✓ les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- ✓ la production d'électricité,
- ✓ les machines-outils.

I.2- C'est quoi un aimants permanents ?

Un aimant permanent est un matériau magnétique qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est-à-dire une aimantation rigide qui ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieur [10].

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.5).

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*) [11].

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 [12].

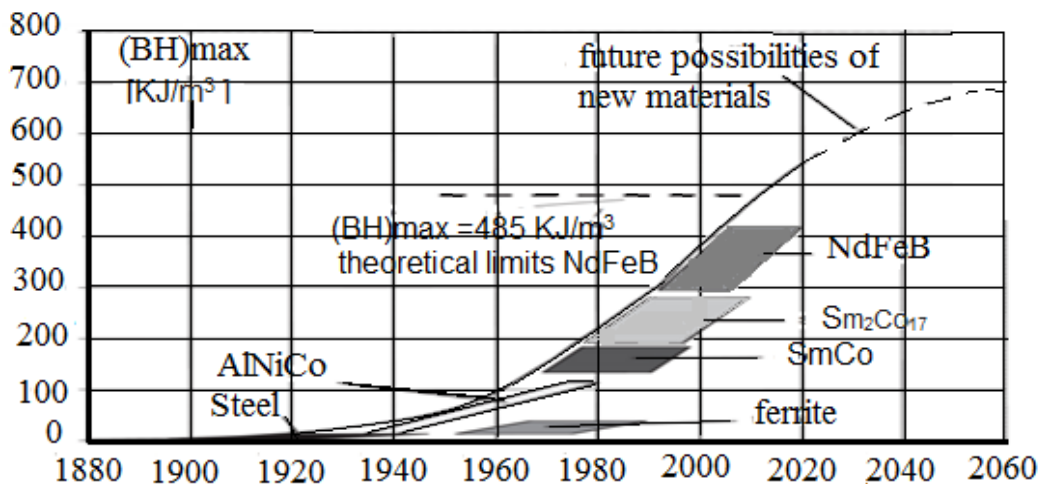


Figure I.5. Evolution de la densité d'énergie $(BH)_{\max}$ des aimants permanents

I.3- Différents types d'aimants permanents

Actuellement, il existe une très grande variété de matériaux pour aimants permanents dont les propriétés et les applications sont diverses. Pour les fabriquer, on a recours à différents alliages de toute sorte de substances : Fer, Aluminium, Nickel, Cuivre, Platine, Carbone...

Idéalement, les matériaux utilisés pour la fabrication des aimants permanents doivent donc posséder, à la fois, une induction rémanente (B_r) élevée et un champ coercitif (H_c) de grande intensité de sorte que l'énergie requise pour les désaimanter soit aussi grande que possible.

Les aimants permanents sont classés en deux grandes familles, les matériaux céramiques et ceux métalliques.

I.3.1- Matériaux céramiques : ferrites

Obtenus par frittage, ces matériaux sont fabriqués à base d'Oxyde de Fer, Baryum et Strontium. Ils possèdent une densité de flux rémanent B_r plus basse mais développent des champs coercitifs très élevés qui peuvent dépasser 350 kA/m pour certaines nuances.

D'ailleurs, lorsqu'ils fonctionnent dans un champ démagnétisant important, ils retrouvent les conditions initiales sans ou avec peu de dégradation de leur induction [13]. De plus, leur résistivité est équivalente à celle des bons isolants [14], ce qui réduit les pertes par courants de Foucault lorsque les ferrites opèrent dans un milieu où règne un champ magnétique variable.

Les ferrites sont fragiles mais présentent une stabilité chimique. On les retrouve dans les pièces polaires de certains moteurs de faible puissance et dans les applications électriques de moyenne puissance (automobile, robotique...).



Figure I.6. Aimants ferrites

I.3.2- Matériaux métalliques

La métallurgie moderne a permis de réaliser des alliages qui sont aujourd'hui largement employés dans l'industrie des aimants permanents. Ces matériaux sont classifiés en deux catégories, les Alnico et les terres rares.

I.3.2.1- Alnico

On désigne généralement sous le nom d'Alnico, les alliages constitués de Fer, Aluminium et de Nickel. Ils sont caractérisés par une induction rémanente B_r relativement élevée et un champ coercitif H_c faible. On trouve des aimants ayant une induction B_r proche de 0.7 T pour les Alnico isotropes et 1.2 T pour les anisotropes.

Leur champ coercitif présente un inconvénient majeur pour usage dans les machines électriques. Afin d'y remédier, l'addition du Cobalt à des taux de 30% est envisageable tout en gardant une rémanence modérée [13].

Les Alnico sont appliqués principalement dans les systèmes nécessitant un fonctionnement à haute température (point de Curie élevé), dans les moteurs pas à pas hybrides, dans l'appareillage de mesure, etc.



Figure I.7. Aimants Alnico

I.3.2.2- Terres rares

L'apparition de ces alliages métalliques vers les années 60, représente un énorme progrès dans le domaine des aimants permanents grâce à leur dureté magnétique. En effet, ils réunissent simultanément deux qualités essentielles à savoir une très haute énergie magnétique et une grande résistance à la désaimantation [15].

Essentiellement deux types d'aimants permanents à base de terres rares sont utilisés, à savoir le Samarium-Cobalt et le Néodyme-Fer-Bore.

A. Samarium-Cobalt (Sm-Co)

En plus des qualités déjà citées, ces aimants ont une aimantation suffisamment rigide pour considérer, leur perméabilité proche de celle de l'air et autorisant une température de fonctionnement avoisinant les 250°C. Ils sont utilisés là où le critère de puissance volumique est prépondérant, adaptés pour les machines électriques notamment les moteurs de grande puissance.

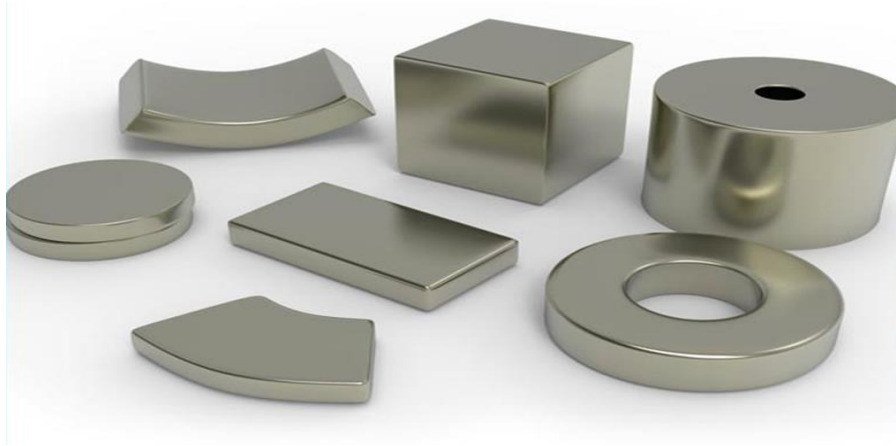


Figure I.8. Samarium Cobalt (Sm-Co)

B. Néodyme-Fer-Bore (Ne-Fe-B)

Plus puissants que les (Sm-Co), ces aimants possèdent une aimantation qui peut atteindre 1.3T et un champ coercitif dépassant 1500 kA/m suivant l'addition du praséodyme ou du dysprosium, ils détiennent de ce fait tous les records de $(-BH)_{\max}$ à température ambiante[16]. La faible valeur de la température de Curie des (Ne-Fe-B) limite leurs performances.

Des solutions intermédiaires à savoir l'ajout des liants plastiques ou techniques d'usinage particulières, sont portées soit pour améliorer leur rigidité mécanique ou pour réduire leurs prix qui est très cher.



Figure I.9. Néodyme-Fer-Bore (Nd-Fe-B)

I.4- Présentation des différentes défaillances des MSAP

Une défaillance d'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 électriques tournantes ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation, l'environnement de travail, la nature de la charge et le calendrier de maintenance [17].

Les machines synchrones à aimants permanents sont des éléments critiques dans les applications électromécaniques et dans les processus industriels. Une panne dans une machine peut causer l'arrêt de l'unité de production ou nécessiter l'utilisation d'un équipement pour contourner le problème.

Les défauts dans les machines synchrones à aimants permanents ont des origines multiples. Les plus communs sont [18] :

- ✓ Contraintes mécaniques : vibrations de la machine, usure des roulements,
- ✓ Contraintes électriques : élévation de la tension avec l'utilisation de convertisseurs statiques,
- ✓ Contraintes environnementales : température, humidité, poussière, pression...
- ✓ Fonctionnement anormal : surcharge, survitesse...
- ✓ Défaillance d'un composant externe : refroidissement, convertisseur...
- ✓ Mauvais dimensionnement et mauvaise installation ou maintenance de la machine.

Les principaux défauts des MSAP peuvent être regroupés en deux catégories principales, comme le montre la figure ci-dessous.

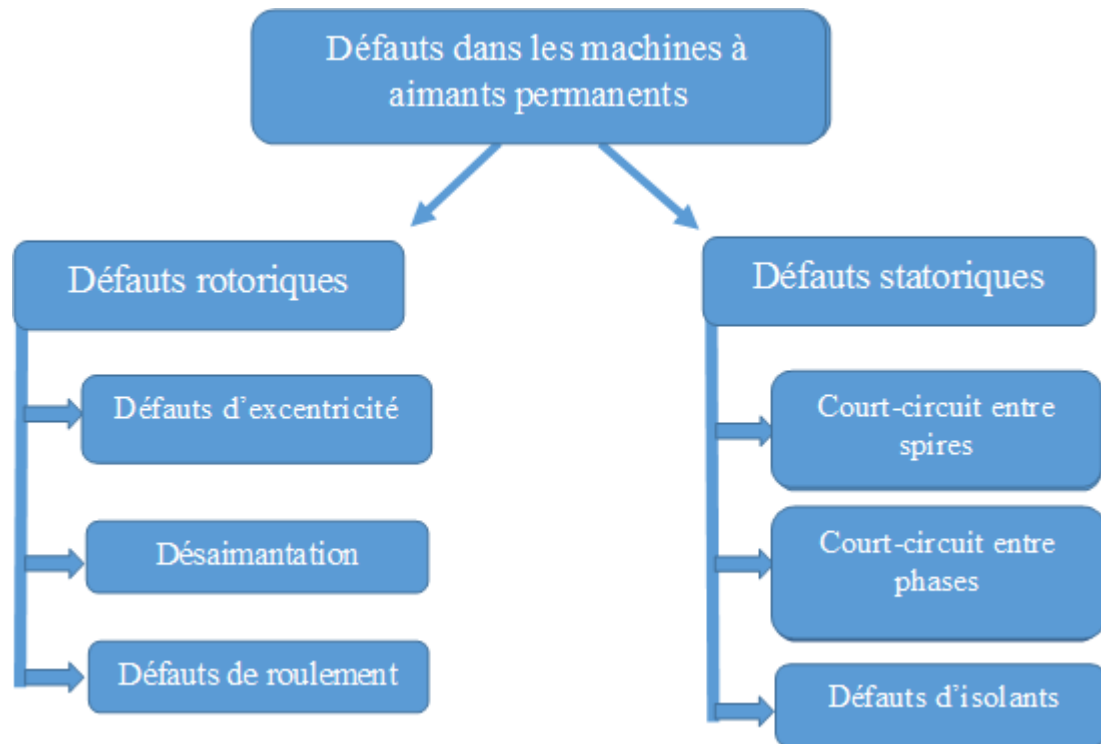


Figure I.10. Principaux défauts des MSAP

I.4.1- Défauts statoriques

Les défauts statoriques qui sont les plus récurrents ainsi que leurs causes, peuvent être définis comme suit [19] :

- ✓ court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibrations, humidité,
- ✓ court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibrée, défaut d'installation.
- ✓ défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, température et humidité extrêmes.
- ✓ défaut entre le stator et la carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc.
- ✓ déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de têtes de bobines.
- ✓ défaillance des connecteurs : vibrations excessives.
- ✓ vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

I.4.1.1- Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. D'autre part, il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases et dans le cas des machines asynchrones, il amplifie les courants dans le circuit rotorique.

La contrainte thermique amenée par le courant de court-circuit risque d'entraîner la propagation du défaut à d'autres spires, ce qui peut conduire au déclenchement des protections électriques dans l'alimentation [17].

I.4.1.2- Court-circuit entre phases

Un court-circuit entre phases peut arriver en tout point du bobinage, mais les plus fréquents apparaissent dans les têtes de bobines, puisque c'est dans celles-ci que les conducteurs de phases différentes se côtoient.

L'influence de ce type de défaut sur le fonctionnement de la machine dépend de la localisation du défaut (de la partie affectée). Si le court-circuit est proche de l'alimentation, il induit des courants très élevés qui conduisent à la fusion des conducteurs d'alimentation ce qui provoque un arrêt net de la machine. Si le court-circuit est proche du neutre entre deux phases, il engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque moindre de fusion des conducteurs [17].

La figure I.11 présente un exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques.



Figure I.11. Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques

I.4.1.3- Défauts d'isolant

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts-circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction. Dans ce cas, un court-circuit peut apparaître dans l'enroulement concerné.

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).

Les différentes causes pour ce type de défaut sont [20] :

- vieillissement naturel des isolants.
- fonctionnement dans un environnement sévère.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge.
- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- vibrations mécaniques.

1.4.2- Défauts rotoriques

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du rotor, ainsi que leurs causes peuvent être définis comme suit [19] :

- ✓ défauts de roulements : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, haute température, perte de lubrifiant, charge déséquilibrée, corrosion.
- ✓ rupture de barres : cycle thermique, régime transitoire à longue durée, déséquilibre magnétique.
- ✓ rupture d'une portion d'anneau : cycle thermique.
- ✓ Excentricité : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, défauts des roulements.
- ✓ désalignement des roulements : défaut de couplage, mauvaise installation, surcharge.
- ✓ défaut du circuit magnétique : défaut de fabrication, surcharge, cycle thermique.
- ✓ déséquilibre mécanique : mauvais alignement, mouvement des anneaux de court-circuit.
- ✓ désaimantation des aimants.

1.4.2.1- Excentricité statique et dynamique

Des fois, une machine peut être soumise à un décentrement du rotor, qui se traduit par des oscillations de couple. Il s'agit du décalage entre le centre du stator et le centre de rotation de l'arbre. Ce défaut peut modifier les comportements mécaniques et les comportements magnétiques de la machine. En effet, une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que sur l'enroulement est dû aussi à une augmentation de l'excentricité de l'entrefer. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquences des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci nous donne naissance à des niveaux de vibrations considérables au niveau des enroulements [21].

On appelle ce phénomène excentricité statique et/ou dynamique dont l'origine est liée à un positionnement non correct des paliers lors de l'assemblage, à un défaut de roulements, à un défaut de charge, ou à un défaut de fabrication.

En générale, on distingue trois cas d'excentricité (figure I.12) [21] :

- ❖ **Une excentricité statique**, le rotor se déplace du centre de l'alliage stator mais tourne toujours autour de son axe,
- ❖ **Une excentricité dynamique**, le rotor est positionné au centre de l'alliage mais ne tourne plus autour de son axe,
- ❖ **Une excentricité mixte**, associant les deux cas précédemment cités.

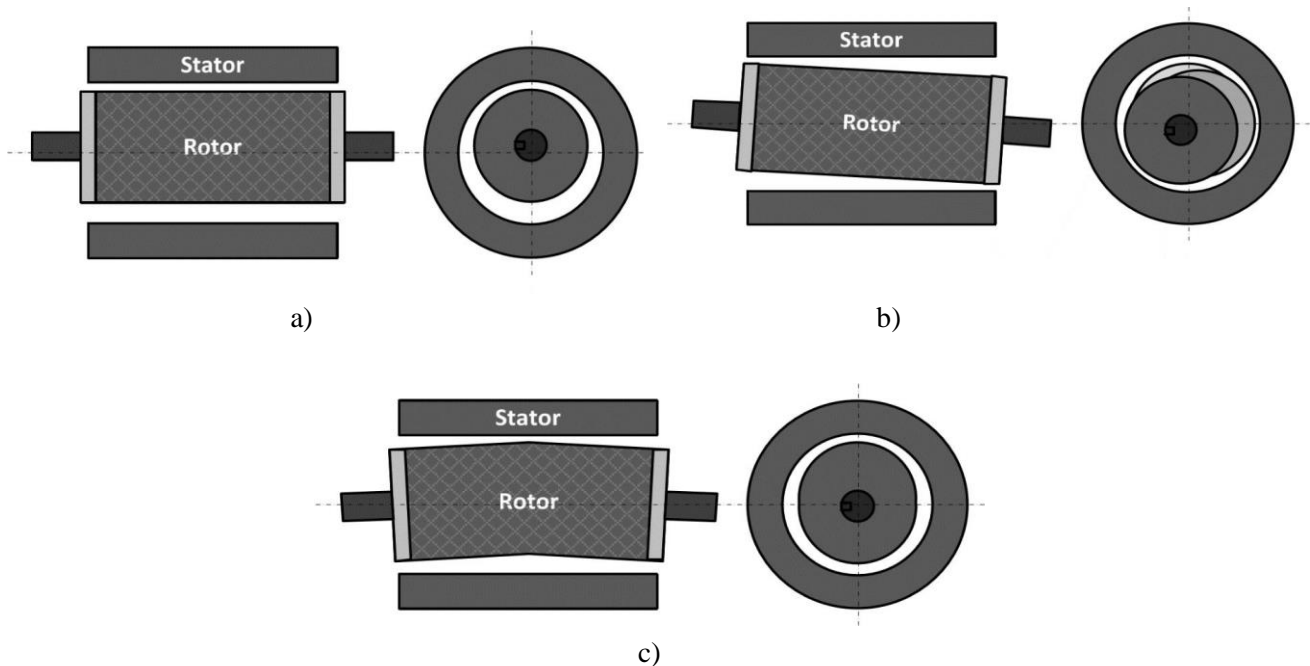


Figure I.12. Types d'excentricité : a) statique, b) dynamique, c) mixte

I.4.2.2- Désaimantation des aimants permanents

Un défaut de désaimantation se traduit par une démagnétisation des aimants permanents, entraînant une réduction ou un déséquilibre du flux magnétique produit. Ce type de défaillance survient principalement à cause d'un problème de fabrication, d'un mauvais dimensionnement des aimants, ou suite à une contrainte thermique (élévation de la température) ou électrique (Champ magnétique inverse) trop forte [22].

I.4.2.3- Défauts de roulements

Les défauts de roulements entraînent, de manière générale, plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine. Ce type de défauts induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor [17].

Les défauts de roulements représentent de 40% à 90% du total de défauts en fonction du type et de la taille de la machine. Nous pouvons distinguer quatre types de défauts de roulements, en fonction de leur localisation [23] :

- Défaut de bague externe.
- Défaut de bague interne.
- Défaut de billes.
- Défaut de cage.

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 [9].

La figure I.13 présente une vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée. Les causes externes possibles des endommagements de roulements sont :

- mauvais alignement du rotor.
- courant traversant le roulement et causant des arcs électriques.
- problèmes d'environnement.

- contamination du roulement par des particules minuscules comme : les poussières et les grains de sable, ...
- mauvaise lubrification provoquant l'échauffement et l'usure des roulements.
- installation inexacte du roulement.

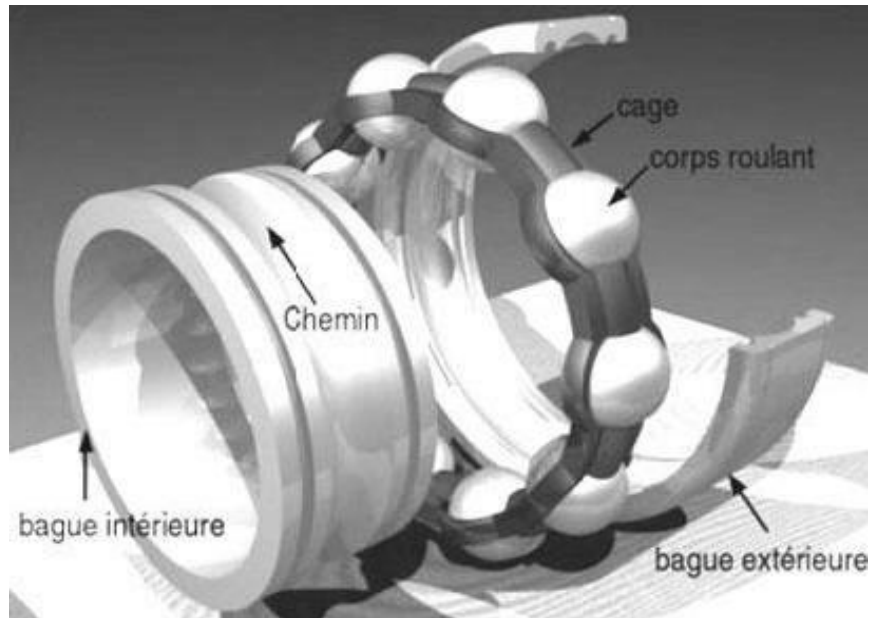


Figure I.13. Vue éclatée des éléments constitutifs d'un roulement à billes à une rangée

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur la machine synchrone à aimants permanents. Tout d'abord, nous avons présenté son principe de fonctionnement, ces avantages, ces inconvénients ainsi que ces domaines d'application. Ensuite, les différents types des aimants permanents et leurs structures sur le rotor ont été présentés. De plus, nous avons donné un aperçu sur les différents types de défauts dans les MSAP.

Le chapitre qui suit sera consacré à une discussion du problème de diagnostic des défauts dans les machines électriques.

Chapitre II

Diagnostic des défauts dans les machines électriques

Chapitre II

Diagnostic des défauts dans les machines électriques

Introduction

Le diagnostic de défauts des machines électriques 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.

Le diagnostic est une composante principale du module de supervision. Il consiste à déterminer à chaque instant le mode de fonctionnement dans lequel le système se trouve. Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations prévenants d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

Ce chapitre vise la présentation de la procédure ainsi que des méthodes de diagnostic de ces défauts. Ces méthodes sont classées en deux catégories, celles qui utilisent un modèle mathématique du système et celles qui consistent à analyser les signaux mesurés. De plus, on va discuter les techniques de détection des défauts dans les machines électriques.

II.1- Mise en œuvre du diagnostic

La mise en œuvre du diagnostic est difficile et cette difficulté devient plus grande avec la complexité du système étudié. Pour la réaliser nous devons :

- avoir une connaissance approfondie de la machine en fonctionnement et de ses différents paramètres,
- faire le maximum de mesure,
- connaître les phénomènes en interaction,
- enfin simuler les pannes avec le modèle représentatif.

Ce dernier point est bien souvent une aide précieuse dans le cas où l'on ne dispose pas de données expérimentales et devant une dégradation énergétique inexplicée. Evidemment, plus le modèle représentatif reproduit fidèlement le fonctionnement de la machine et plus le diagnostic est facilité (les symptômes seront retenus avec plus de précision).

II.1.1- Identification du défaut

Cette opération permet de connaître les caractéristiques du défaut (le syndrome). Les symptômes sont le moyen unique d'identification. Il se peut qu'un ensemble de défauts présente les mêmes symptômes globaux et pour faire la distinction entre tel ou tel défaut, il faut revenir vers le diagnostic différentiel et effectuer des tests de précision sur l'identification de nouveaux symptômes. La découverte de nouvelles caractéristiques confirme le défaut détecté [24].

II.1.2- Localisation de la source de perturbation

Là aussi, la localisation fait appel au contenu de la base des faits, qui permet le retour vers les causes probables pour localiser la source réelle de l'incident [24].

II.2- Différentes étapes de diagnostic

Effectuer un diagnostic nécessite un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent tel qu'il est montré dans la figure ci-dessous.

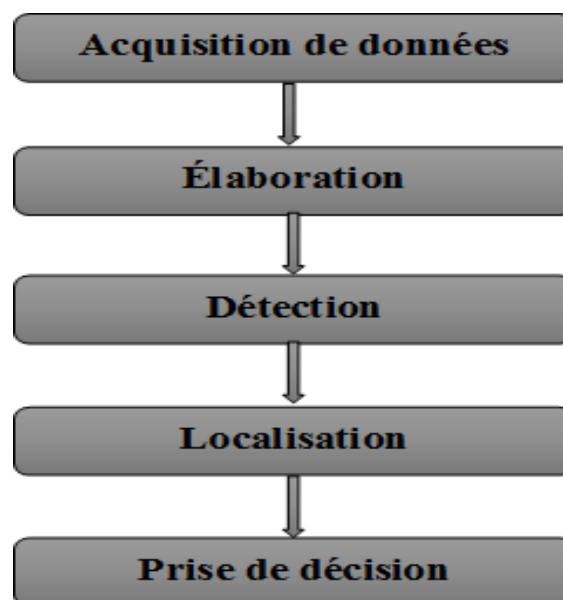


Figure II.1. Différentes étapes du processus de diagnostic

II.2.1- Etape d'acquisition de données

La procédure de diagnostic nécessite une disponibilité d'informations sur le fonctionnement du système à surveiller. Ces informations sont recueillies lors d'une phase d'acquisition de données suivie d'une validation.

Cette étape implique l'utilisation de capteurs appropriés permettant de mesurer les différentes variables du processus.

II.2.2- Etape d'élaboration d'indicateurs de défauts

Il s'agit de construire des indicateurs permettant de mettre en évidence les éventuels défauts pouvant apparaître au sein du système, à partir des mesures réalisées et des observations issues des opérateurs en charge de l'installation. Dans le domaine du diagnostic, les indicateurs de défauts sont couramment dénommés les résidus ou les symptômes.

II.2.3- Etape de détection

Cette étape doit permettre de décider si le système se trouve ou non dans un état de fonctionnement normal. Il ne suffit pas de tester la non nullité des résidus pour décider de l'apparition d'un défaut car, dans la pratique, les grandeurs mesurées sont toujours entachées de bruits et le système à surveiller est toujours soumis à des perturbations. Par conséquent, cette étape fait le plus souvent appel aux tests statistiques ou, de manière plus simple, elle est réalisée à l'aide d'un seuillage.

II.2.4- Etape de localisation

Il s'agit, à partir des résidus non nuls statistiquement, de localiser le défaut, c'est-à-dire de déterminer le ou les éléments défaillants. La procédure de localisation nécessite l'utilisation d'un ensemble (ou vecteur) de résidus, qui doivent avoir des propriétés permettant de caractériser de manière unique chaque défaut. Pour ce faire, deux méthodes peuvent être utilisées :

- la construction de résidus structurés,
- la construction des résidus directionnels.

II.2.5- Etape de prise de décision

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 générer, éventuellement sous le contrôle d'un opérateur humain, les actions correctrices nécessaires à un retour à la normale du fonctionnement de l'installation.

En résumé, quelle que soit la méthode employée, la procédure de diagnostic comprend deux principales étapes, une étape de génération de résidus et une étape d'évaluation des résidus [25].

II.3- Fiabilité du diagnostic

Le diagnostic sera souvent facilité si l'expert dispose de :

- la fiche cinématique de la machine, un historique des pannes et les modifications apportées à la machine depuis sa mise en service.
- l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature initiale de l'installation considérée en bon état et leurs profils d'évolution. La signature initiale apporte dans ce cas à l'expert les éléments de référence qui lui permettront de statuer sur l'importance et la gravité des évolutions. L'établissement de la signature initiale d'une installation doit donc faire l'objet du plus grand soin et faire appel aux mêmes techniques et méthodologies d'investigation que le diagnostic.

Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic mais sont rarement disponibles, tout au moins sous une forme facile à exploiter. Comme la fiabilité du diagnostic repose avant tout sur l'identification de toutes les images des grandeurs contenues dans les signaux délivrés par les capteurs, le traitement du signal joue un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase de l'identification systématique de toutes les images de la grandeur considérée nécessite de suivre une démarche rigoureuse en méthodologie [26].

II.4- Diagnostic appliqué aux machines électriques

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.

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence de symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela [27].

Le médecin, pour faire un diagnostic réussi, fait plusieurs tests à la recherche de nouveaux symptômes car ceux signalés par le système nerveux central le guident vers plusieurs causes, particulièrement si la maladie s'est aggravé avec le temps. Dans ces cas, c'est l'analyse différentielle associée aux résultats des tests qui permettra de rattacher ces symptômes à l'un ou à l'autre des

causes probables. A partir de là, on conclut que : le diagnostic est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs.

Le tableau II.1 indique quelques modes de pannes typiques observées sur les moteurs électriques.

Tableau II.1. Pannes typiques observées sur un moteur

Symptômes	Causes probables
- Intensité réduite, vitesse élevée et température réduite	Diminution de la charge
-Température exagérée	Ventilation incorrecte
-Intensité élevée, vitesse réduite et température élevée	Surcharge
-Intensité exagérée, vitesse très réduite et température exagérée	Blocage de rotor Mauvais branchement Moteur chauffé
-Vitesse réduite	Moteur faible
-Intensité de l'une des phases est exagérée et température exagérée, ou -Intensité de deux phases est exagérée et température exagérée, ou -Intensité de l'une des phases est exagérée, température exagérée et vitesse réduite	Court-circuit entre spires

II.5- Etat de l'art des méthodes de diagnostic

II.5.1- Différents 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 [28]. On distingue :

- ✓ La maintenance préventive. Celle-ci consiste à changer les systèmes à date fixe prédéterminée. Le coût associé est important,
- ✓ La maintenance corrective. 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,

- ✓ La maintenance prédictive. L'intervention est effectuée avant l'apparition des défauts.

II.5.2- Méthodes de diagnostic des machines électriques

A partir des travaux qui ont été effectués dans le domaine du diagnostic des machines électriques, trois méthodes de diagnostic peuvent être distinguées (figure II.2) [29] :

- Méthodes de connaissances,
- Méthodes de redondances analytiques,
- Méthodes par modélisation de signaux.

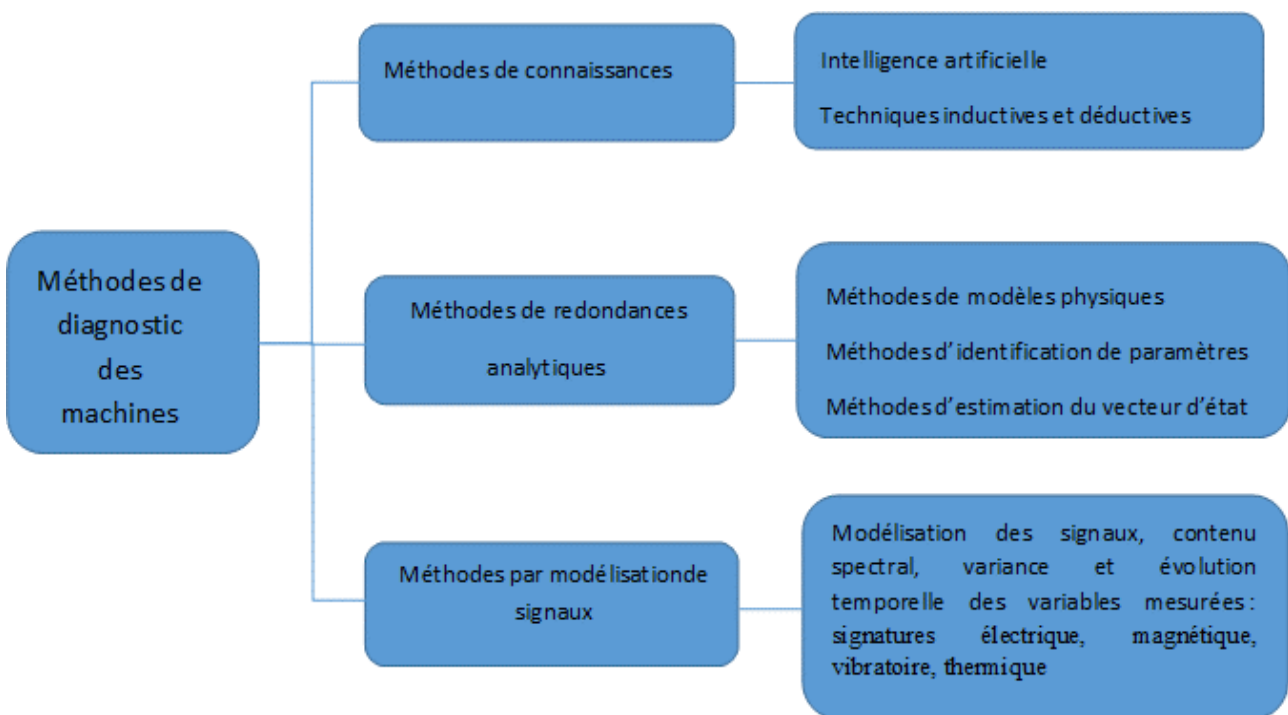


Figure II.2. Méthodes de diagnostic des machines électriques

II.5.2.1- Méthodes de connaissances

Elles n'utilisent pas de modèle mathématique pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expérience humaine confortée par des retours d'expérience. Les techniques basées sur l'intelligence artificielle mettent en œuvre la reconnaissance de formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones et la logique floue, qui peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés pour améliorer leur efficacité.

Les méthodes inductives ou déductives ne s'appliquent pas directement au diagnostic, mais peuvent y aider. Elles sont essentiellement utilisées pour définir les causes du défaut en utilisant des modèles de pannes. Il est à noter que ces méthodes sont davantage du ressort des automaticiens que des électrotechniciens.

II.5.2.2- Méthodes de redondances analytiques

Elles se basent sur une modélisation quantitative du système et exploitent les relations entre les variables du système considéré pour identifier les paramètres physiques à surveiller. On y distingue trois classes : les méthodes de modèles physiques, les méthodes d'identification de paramètres et les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

II.5.2.3- Méthodes par modélisation de signaux

Elles sont des méthodes basées sur une modélisation des signaux, du contenu spectral, de la variance et de l'évolution temporelle des variables mesurées. Ces méthodes exploitent essentiellement les signatures électrique, magnétique, vibratoire, thermique ou la puissance instantanée.

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et des signaux de défaut.

II.6- Techniques de traitement du signal

Le traitement du signal regroupe un ensemble de techniques permettant de créer, d'analyser et de transformer les signaux d'entrée en vue d'extraire des paramètres indicateurs de défauts.

Il est possible de classer les techniques de traitement du signal selon ces trois classes [30] :

- Analyse temporelle.
- Analyse fréquentielle.
- Analyse temps-fréquence.

II.6.1- Analyse temporelle

L'analyse temporelle permet d'extraire des paramètres indicateurs de défauts à partir de données brutes du capteur. Les paramètres décrits ici sont appelés «paramètres statistiques» car ils sont basés sur une analyse des caractéristiques temporelles du signal enregistré.

II.6.2- Analyse fréquentielle

L'analyse du spectre fréquentiel d'un signal est la technique la plus couramment utilisée pour identifier les défauts dans un système. Cette technique est basée sur le fait qu'un défaut localisé génère un signal périodique avec une fréquence caractéristique unique.

À l'inverse de l'analyse temporelle, l'analyse fréquentielle permet d'identifier le défaut présent dans le système en identifiant sa fréquence caractéristique. Cette technique est généralement appliquée pendant le régime permanent du système.

Un classique parmi les techniques utilisées dans le domaine fréquentiel est l'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide FFT. La technique de spectrogramme permet d'effectuer des analyses fréquentielles des signaux en régime dynamique de fonctionnement du système. Cette technique consiste à effectuer un calcul répétitif de la FFT sur une fenêtre temporelle glissante.

II.6.3- Analyse temps-fréquence

L'analyse en temps-fréquence des signaux traite à la fois le domaine temporel et le domaine fréquentiel. Les signaux non stationnaires sont mieux représentés par une distribution temps fréquence, qui vise à montrer la répartition de l'énergie du signal sur l'espace à deux dimensions temps-fréquence.

Les techniques les plus utilisées pour l'analyse temps-fréquence sont la transformée de Fourier à court terme (STFT pour Short-Time Fourier Transforme), la distribution de Wigner-Ville et la transformée en ondelettes.

II.7- Types de grandeurs à analyser

Le diagnostic de l'état d'une machine électrique repose sur l'analyse de plusieurs grandeurs qui peuvent être de types :

- **électrique** : analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine (tension, courant,...),
- **mécanique** : analyse de la vitesse, du couple ou même des vibrations,
- **thermique** : analyse de la température de la machine,
- **électromagnétique** : analyse des flux dans l'entrefer, des flux axiaux,...,
- **chimique** : analyse des huiles et des gazes.

II.8- Techniques de détection des défauts dans les machines électriques

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 [31].

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 sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches [32] :

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

II.8.1- Méthodes de diagnostic sans modèle

Ces méthodes ne nécessitent pas forcément de modèle analytique précis du système mais reposent plutôt sur une reconnaissance de signatures. Les signatures de défauts, obtenues par une modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal ou par système expert. Parmi ces méthodes on trouve celles citées ci-dessous.

II.8.1.1- Diagnostic par mesure des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts par mesure des vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine. Ces vibrations peuvent être captées par des accéléromètres. Les spectres des signaux de vibrations, issus de la machine en défaut, sont comparés avec ceux enregistrés lorsque la machine est en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor [33]. La figure II.3 présente une machine asynchrone (MAS) avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique.

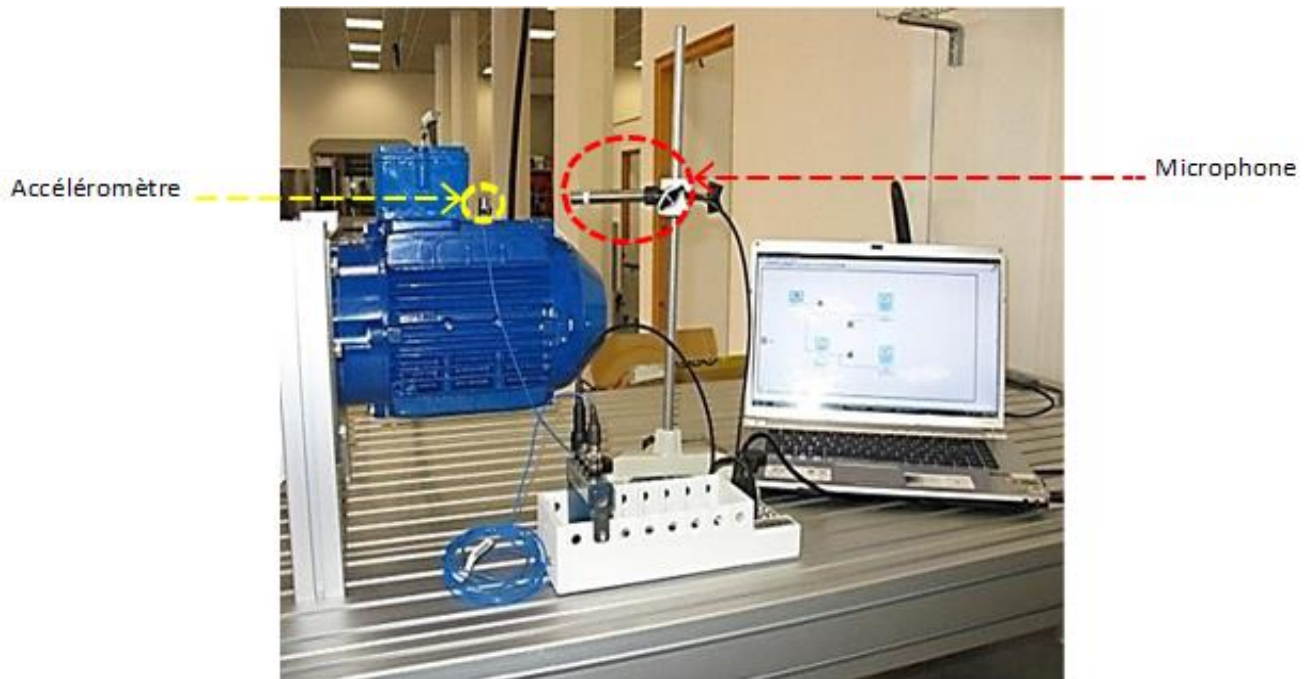


Figure II.3. MAS avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique

II.8.1.2- Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Dans une machine idéale et sans défauts, les courants et les tensions statoriques sont équilibrés, ce qui annule le flux de fuite axial. La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator ce qui donne naissance à des flux de fuite axial de valeurs dépendantes du degré de sévérité du défaut. Si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de la tension induite dans cette bobine, peut être exploité pour détecter les différents défauts [34].

A partir du flux de dispersion axial (flux magnétique de fuites), on peut détecter différents défauts qui surgissent dans la machine électrique. Dans un moteur asynchrone, par exemple, on peut détecter :

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

Dans une machine électrique tournante, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine telle qu'il est montré sur la figure ci-dessous [35].

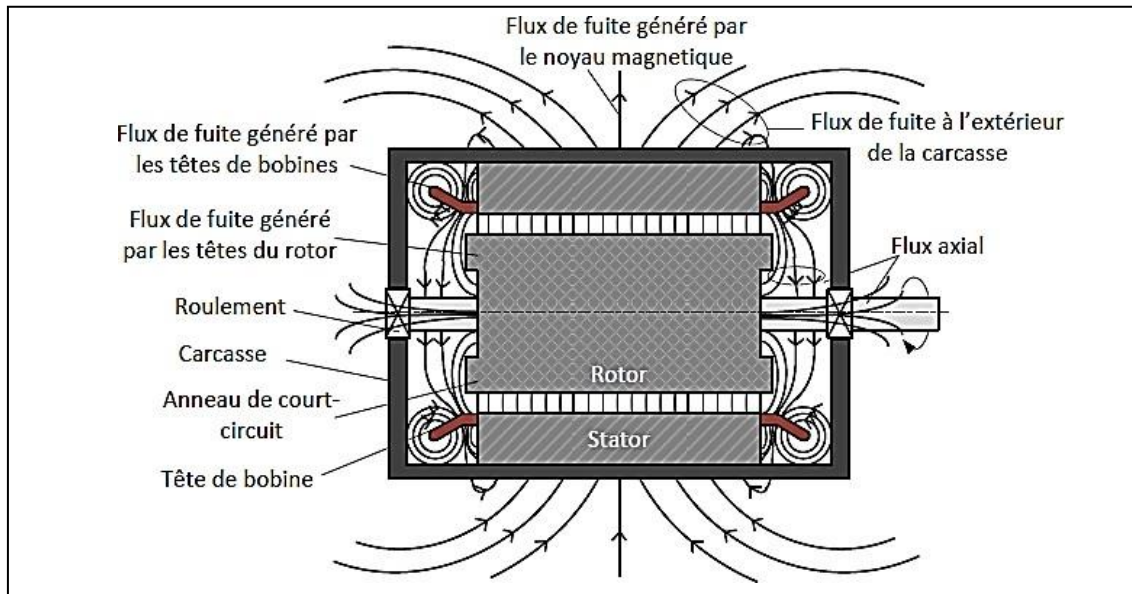


Figure II.4. Flux de dispersion

D'après la répartition des lignes de champ, on peut décomposer le champ extérieur en deux parties appelées champs externes axial et radial (figure II.5). 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 du moteur et de récupérer le signal du champ de fuite [36]. 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.

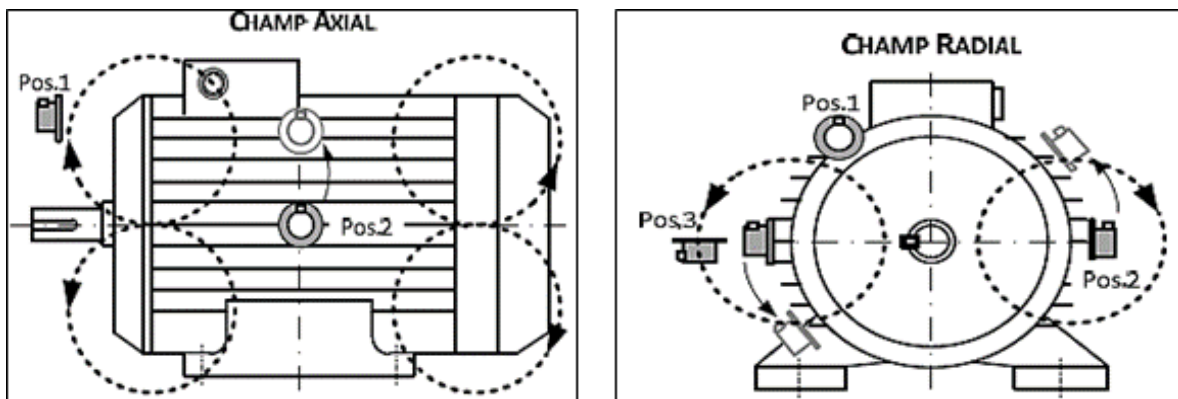


Figure II.5. Champs axial et radial dans une machine électrique

Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés pour la mesure du champ de dispersion. Les plus souvent utilisés sont : les capteurs de type bobiné, les capteurs magnéto-résistifs et les capteurs à effet Hall.

II.8.1.3- 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 du moteur [37].

II.8.1.4- Diagnostic par mesure de température

Cette méthode consiste à mesurer la valeur de la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite. Si elle dépasse le taux admissible, on déduit l'existence d'un défaut dans le moteur. Pour mesurer cette température, on utilise des capteurs thermiques (platine 100, ou des thermistances) postés aux différents endroits du moteur (enroulements statoriques, encoches) [38].

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 [39].

Cette méthode est souvent utilisée pour la protection des enroulements statoriques, donc elle ne concerne pas la totalité des défauts dans la machine. La figure ci-dessous présente une image colorée infrarouge thermique.

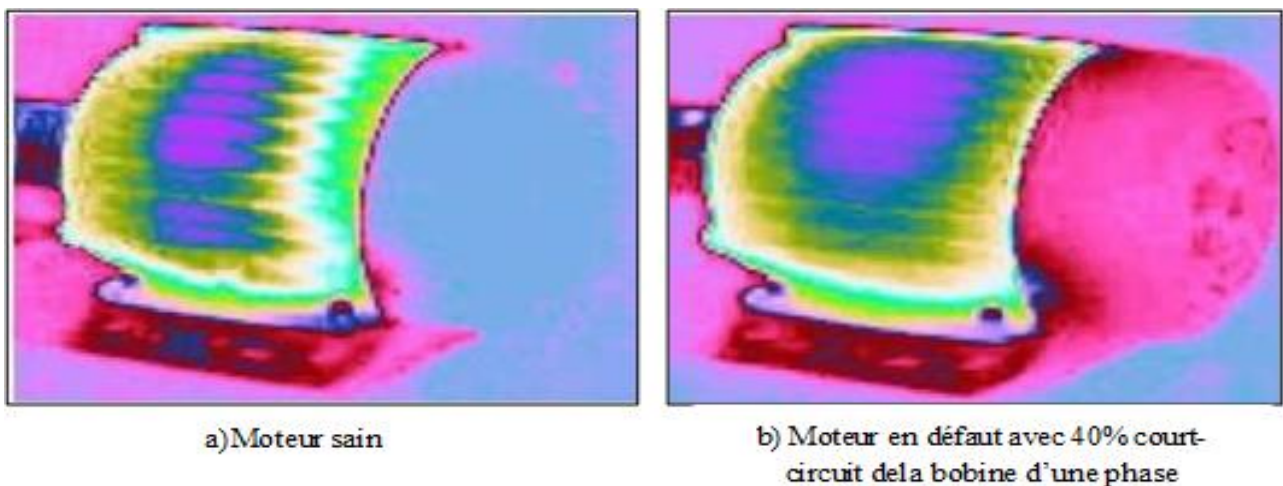


Figure II.6. Image colorée infrarouge thermique

II.8.1.5- 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 non-idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques) ainsi que la non-linéarité des caractéristiques magnétiques de la machine peuvent être évitées [40].

II.8.1.6- 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 apportées par cette grandeur, est plus grand que celui apportées par le courant d'une seule phase. Ceci présente l'avantage de cette méthode par rapport aux autres [41].

II.8.1.7- 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,...). L'analyse des lubrifiants permet de déceler la présence anormale d'eau, l'éventuelle perte de viscosité du produit, ou encore la présence de métaux d'usure [42].

Le diagnostic chimique dans les machines électriques est basé sur l'analyse des fluides de refroidissement qui sont utilisés pour l'évacuation de la chaleur dans les moteurs à grande puissance (eau, air ou huile). Ainsi la dégradation des isolants électriques des enroulements d'un moteur par excès de température produit un gaz : le monoxyde du carbone (Co) qui s'infiltré dans le circuit d'air de refroidissement. Le gaz (Co) peut être décelé par les rayons infrarouges et, selon la densité du (Co) contenu dans l'air d'évacuation de la chaleur, un défaut peut être détecté.

Comme cette méthode est utilisée uniquement dans les moteurs à grande puissance (à tension d'alimentation élevée), elle n'englobe pas tous les types de moteurs.

II.8.1.8- Diagnostic par mesure du courant statorique

Parmi tous les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques

que les défauts purement mécaniques [34]. Les défauts de la machine synchrone à aimants permanents se traduisent dans le spectre du courant statorique par :

- l'apparition des raies spectrales dont les fréquences sont directement liées à la fréquence de rotation de la machine, aux fréquences des champs tournants et aux paramètres physiques de la machine (nombre d'encoches rotoriques et nombre de paires de pôles),
- la modification de l'amplitude des raies spectrales, déjà présentés dans le spectre du courant.

La surveillance via le courant statorique nécessite une bonne connaissance des défauts et de leurs signatures.

II.8.2- 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 se base sur un algorithme d'optimisation de l'erreur entre les paramètres du modèle et ceux du système étudié [43], [44]. 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 [44], [45].

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 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 [29].

La procédure à suivre, dans le diagnostic des défauts par analyse vibratoire, est celle présentée dans l'organigramme ci-dessous:

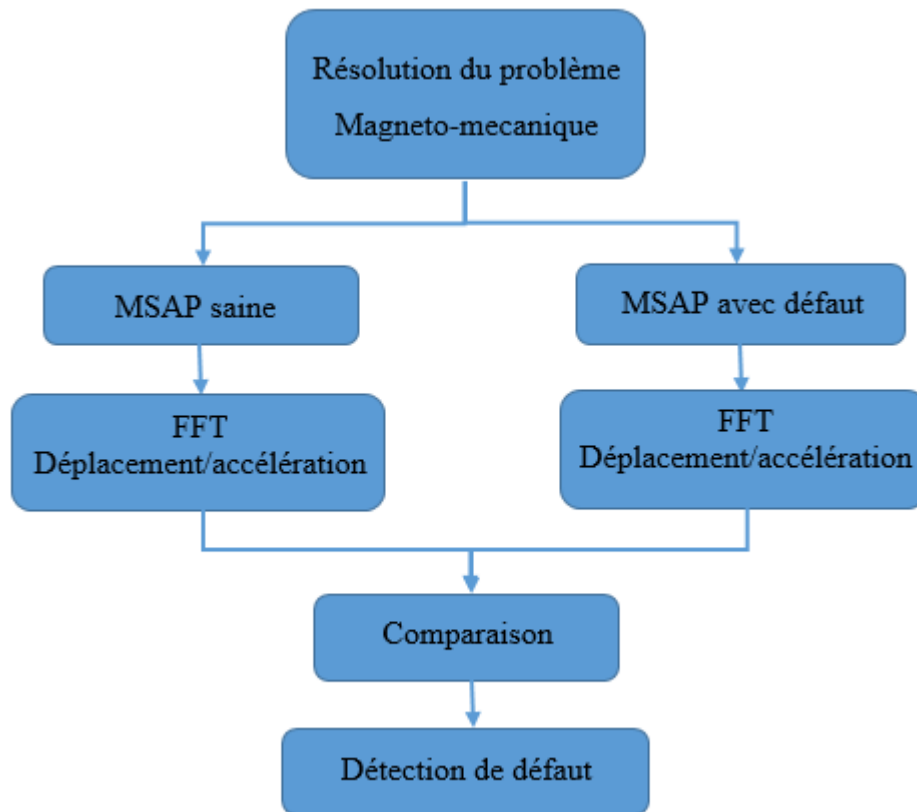


Figure II.7. Procédure du diagnostic des défauts dans une MSAP par analyse vibratoire

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de diagnostic, les méthodes de diagnostic des défauts dans les machines électriques ainsi que leurs différentes techniques de détection. Ces techniques permettent d'estimer et de suivre l'état de marche de la machine en fonctionnement, de manière à détecter les anomalies et programmer à l'avance les interventions de maintenance.

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.

Comme la technique de diagnostic choisie dans cette étude est celle par analyse des vibrations, le chapitre qui suit va être consacré à la présentation du problème de calcul vibratoire.

Chapitre III

Modélisation magnéto-mécanique : Calcul vibratoire

Chapitre III

Modélisation magnéto-mécanique : Calcul vibratoire

Introduction

Les phénomènes électromagnétiques sont à la base de tous les concepts électrotechniques, quels que soient. Il est par conséquent indispensable, avant de vouloir réaliser pratiquement un dispositif électromagnétique, de modéliser et simuler en utilisant les équations de Maxwell dans ce système [46].

Dans les machines à aimants, le champ électromagnétique peut provenir soit de la circulation des courants à travers les bobinages statoriques ou bien entendu des aimants permanents disposés au niveau du rotor.

Les phénomènes électromagnétiques étudiés dans un dispositif électromagnétique sont régis par les quatre équations de Maxwell et par les trois relations des milieux considérés. 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 [47].

Ce chapitre va être consacré à la présentation de la procédure suivie lors de la modélisation magnéto-mécanique d'une machine électrique. On va présenter les différentes formulations, les différentes méthodes de calcul du champ électromagnétique, la procédure suivie pour le calcul des forces électromagnétiques ainsi que celle suivie pour le calcul des vibrations.

III.1- Intérêt du calcul du champ électromagnétique

Durant leur fonctionnement, les machines électriques ainsi que tout dispositif électrotechnique sont soumis à l'action du champ électromagnétique. Dans toute machine électrique, l'enroulement d'excitation produit un champ magnétique constant ou variable dans le temps et souvent dans l'espace. La connaissance du champ permet, dans tout dispositif électromagnétique, d'avoir accès au calcul des performances du fonctionnement de ce dispositif en régime permanent ou transitoire.

Dans une machine électrique, l'évaluation du champ en chaque point de l'espace permet d'en déduire les flux et donc les forces électromotrices pour un fonctionnement en générateur ou les couples pour un fonctionnement en moteur.

Aujourd'hui, grâce au développement de la technologie, l'utilisation des ordinateurs est devenue courante pour la modélisation du champ électromagnétique avec des temps de calcul considérablement réduits.

L'évaluation du champ électromagnétique apparait comme un travail nécessaire, dans de nombreuses étapes du processus de conception d'un dispositif électromagnétique. C'est ainsi que le calcul de ce champ est devenu une discipline à part entière de l'électrotechnique qui s'occupe de développer de nouvelles méthodes de résolution des équations aux dérivées partiales [48].

III.2- 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 nécessite une résolution des formulations électromagnétiques qui sont élaborées à partir des équations de Maxwell.

III.2.1- Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations, présentées ci-dessous, sont généralement interdépendantes de faire que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [49].

❖ Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques. Dans le deuxième cas, l'équation ci-dessous peut être écrite :

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

❖ Equation de Maxwell-Faraday

Un champ électrique peut induire un champ magnétique. Ce champ induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Un aimant permanent en rotation qui crée un champ magnétique en mouvement, génère un champ électrique dans un fil à proximité tel que :

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

❖ Equation de conservation de flux magnétique

L'induction \vec{B} est toujours à flux conservatif donc on a :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.3})$$

❖ Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Ce champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique, à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée, aux charges électriques tel que [50] :

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

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].

III.2.2- Lois de comportement des matériaux

Dès lors que les champs vectoriels présentés précédemment sont fonction du milieu où ils règnent, il faut joindre aux équations de Maxwell des relations qui définissent le milieu, et ce, pour résoudre les problèmes électromagnétiques [51].

❖ Relation magnétique

Sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante. Quel que soit le milieu, on écrit par définition:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (\text{III.5})$$

tel que:

$\mu = \mu_0 \mu_r$: Perméabilité magnétique absolue [H.m^{-1}],

\vec{M} : Aimantation des aimants [A/m],

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H.m^{-1}],

μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu.

❖ Loi d'ohm

On appelle conducteur tout milieu possédant des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique sous l'effet d'un champ électrique [52]. Quand un tel milieu est soumis à un champ électrique, les charges électriques (électrons libres dans les métaux) se mettent en mouvement, créant ainsi un courant électrique.

Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet que:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

Qui est l'expression de la loi d'Ohm.

Si le milieu est anisotrope, on aura:

$$\vec{J} = [\sigma] \vec{E} \quad (\text{III.7})$$

avec $[\sigma]$ c'est le tenseur de la conductivité électrique.

Un conducteur parfait est un milieu fictif tel que $\sigma \rightarrow \infty$. Dans un tel conducteur, \vec{E} est nul. A l'inverse, un isolant parfait est un milieu dans lequel la conductivité électrique est nulle ($\sigma=0$).

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

$$\vec{J} = \vec{J}_{ext} + \vec{J}_{eddy} \quad (\text{III.8})$$

tel que:

σ : conductivité électrique [S.m^{-1}],

\vec{J}_{ext} : densité de courant provenant des enroulements d'alimentation [A.m^{-2}],

\vec{J}_{eddy} : densité de courants de Foucault [A.m^{-2}].

❖ Comportement diélectrique

Le comportement diélectrique d'un matériau est régi par l'équation ci-dessous:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$: permittivité électrique absolue [F/m],

ε_0 : permittivité électrique du vide $10^{-9}/36.\pi$ [F/m],

ε_r : permittivité électrique relative du milieu.

III.2.3- Conditions de passage entre deux milieux différents

Sur une limite de séparation de deux milieux différents notés M1 et M2 (figure III.1), on peut trouver des conditions de continuité du type:

- ✓ Relation de continuité de la composante normale de l'induction magnétique

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.10})$$

- ✓ Relation de continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{III.11})$$

- ✓ Relation de continuité de la composante normale de la densité de courant

$$\vec{J}_1 \cdot \vec{n} = \vec{J}_2 \cdot \vec{n} \quad (\text{III.12})$$

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

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s \quad (\text{III.13})$$

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

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III.14})$$

Ici \vec{n} est le vecteur normal à l'interface dirigé du milieu 1 vers le milieu 2, J_s est la densité surfacique de courant libre à l'interface et ρ_s est la densité surfacique de charge libre à l'interface.

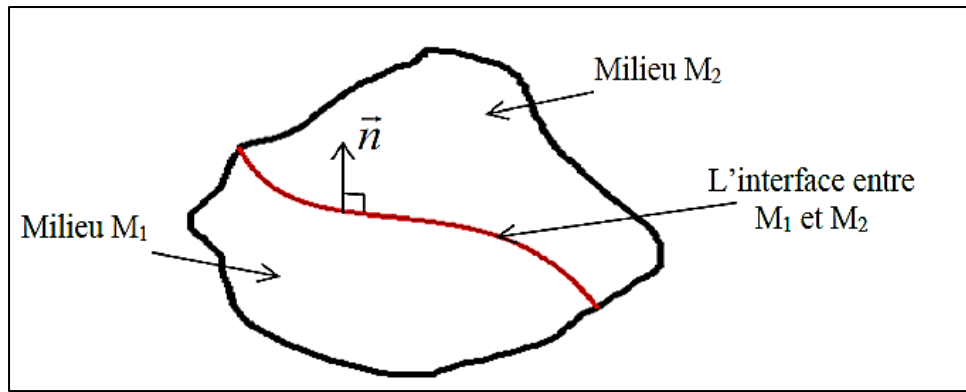


Figure III.1. Domaine d'étude avec deux milieux différents M1 et M2

III.2.4- Hypothèses simplificatrices

En pratique, il est généralement usuel de simplifier les équations de Maxwell précédentes 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) qui permet de négliger tout aspect propagatif du champ électromagnétique.

A partir des équations de Maxwell II.2 et II.4, et sachant que la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut définir une nouvelle loi dite loi de conservation de la densité de courant [53]. Cette loi s'exprime comme suit:

$$\text{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{III.15})$$

Une autre simplification consiste à négliger la charge d'espace dans les matériaux conducteurs ($\rho = 0$). L'équation de conservation de la densité de courant se réécrit alors sous cette forme:

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (\text{III.16})$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.17})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (\text{III.18})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.19})$$

$$\text{div} \vec{D} = 0 \quad (\text{III.20})$$

III.2.5- Problème électromagnétique

Un problème électromagnétique est constitué de façon schématisée, tel que le montre la figure III.2, par différents domaines physiques susceptibles d'être rencontrés dans un dispositif électromagnétique [54]. Alors, ce problème type est constitué des parties suivantes:

- des inducteurs parcourus par des courants de densité J_{ext} donnée,
- des conducteurs où peuvent circuler des courants induits,
- des régions constituées de matériaux ferromagnétiques,
- des aimants permanents,
- une région qui englobe les autres régions. Elle est composée d'air.

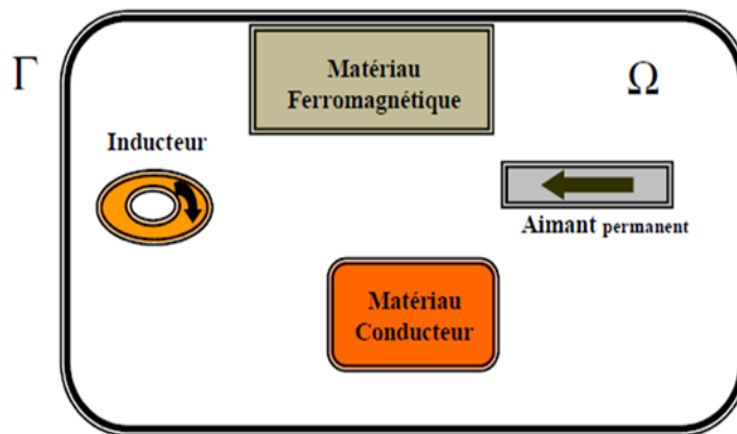


Figure III.2. Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique

III.2.6- 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.2).

Les équations précédentes permettent, théoriquement, de décrire tous les systèmes quasi-stationnaires dans la plupart des dispositifs utilisés en électrotechnique. Elles sont souvent transformées avant tout traitement numérique pour être appliquées aux problèmes physiques à résoudre. Alors, une mise en forme préliminaire s'impose afin de réduire le nombre d'inconnues et le nombre d'équations à résoudre. De nombreuses méthodes ont été proposées, utilisant des variables de type potentiel vecteur ou scalaire, magnétique ou électrique ou de type champ. D'après la littérature, dans le cas de l'étude des problèmes électromagnétiques, les modèles (donc les formulations) magnétostatique et magnétodynamique sont tout à fait adéquats [55]. Dans notre étude, on va s'intéresser au modèle magnétodynamique.

III.2.6.1- Formulation magnétodynamique

Dans le cas des systèmes alimentés par des sources variables dans le temps et dans lesquels il y'a présence de courants induits produits par la variation du champ dans le temps, les équations de Maxwell s'écrivent:

$$\overline{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{III.21})$$

$$\overline{\text{rot}} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (\text{III.22})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma V \wedge \vec{B} + \vec{J}_{ext} \quad (\text{III.24})$$

où V c'est la vitesse du mouvement de la partie mobile.

La figure III.3 montre le diagramme de Toni, propre à la magnétodynamique. Les lois de comportement sont alors des opérateurs qui relient le champ électrique et le champ magnétique avec la prise en compte de la dérivée par rapport au temps [56].

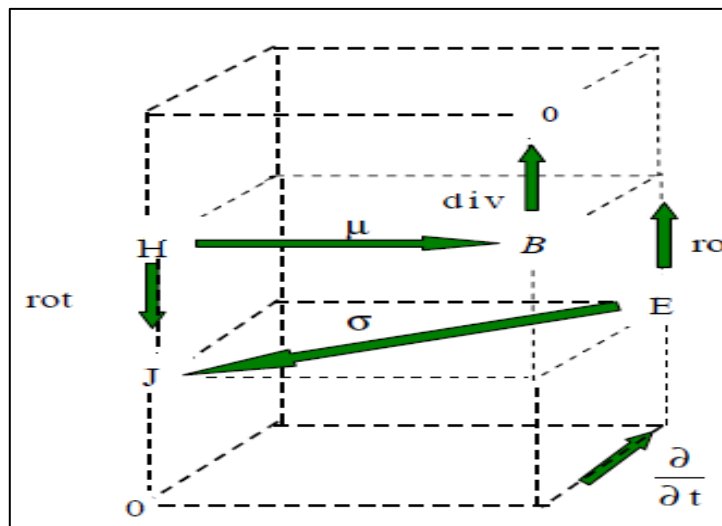


Figure III.3. Diagramme de Toni

Les sources du champ sont les densités de courant imposées \vec{J}_{ext} (et/ou les aimants permanents caractérisés par leur induction rémanente B_r). σ est la conductivité du milieu, 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 développées pour représenter le modèle de la magnétodynamique en vue de sa modélisation. Les principales formulations qu'on peut rencontrer sont: les formulations en E , en A , en $A-V$, en H et en $T-\Phi$.

Dans notre travail, on va utiliser la formulation en A puisqu'elle est la mieux adaptée pour résoudre notre problème.

❖ Formulation en potentiel vecteur magnétique \vec{A}

Le potentiel vecteur du champ magnétique, ou plus simplement potentiel vecteur quand il n'y a pas de confusion possible, est une quantité physique assimilable à un vecteur intervenant en électromagnétisme. Elle n'est pas directement mesurable, mais sa présence est intimement liée à celle d'un champ électrique et/ou d'un champ magnétique.

Sachant que la divergence de l'induction magnétique \vec{B} est nulle (Equation III.23), 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:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{III.25})$$

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

A partir des équations III.21, III.22, III.24 et III.25 et en considérant un système sans mouvement, nous aboutissons à l'équation, à résoudre, qui s'exprime comme suit:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} (\vec{A}) \right) + \sigma \partial \vec{A} / \partial t = \vec{J}_{ext} \quad (\text{III.26})$$

Cette formulation est celle qu'on va utiliser dans notre étude, mais en considérant la présence d'aimants permanents. C'est la formulation la plus générale et elle peut être appliquée à divers problèmes d'électrotechnique. Selon la géométrie du dispositif étudié, sa résolution peut être effectuée soit en coordonnées cartésiennes ou en coordonnées cylindriques. De plus, on cherche à ramener l'étude en 2D pour la simplifier et pour optimiser le temps de calcul. Dans ce travail, on va effectuer une étude 2D en coordonnées cartésiennes.

La résolution du problème en 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 A_z (dans la direction Oz) non nulle et ne dépend que de x et y tel que:

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix}; \quad \vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{bmatrix} B_x(x, y) \\ B_y(x, y) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

En magnétodynamique, l'équation de diffusion électromagnétique de la grandeur \vec{A} (équation III.26) se réécrit, comme suit, en coordonnées cartésiennes [57] :

$$-\frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z(x,y)}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \cdot \frac{\partial A_z(x,y)}{\partial x} \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = J_z(x,y) \quad (\text{III.28})$$

où ν est la reluctivité magnétique ($\nu = \frac{1}{\mu}$).

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

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III.29})$$

III.2.7- Conditions aux limites

Pour résoudre le problème électromagnétique dans un domaine borné Ω de frontière $\Gamma = \Gamma_b \cup \Gamma_h$ (figure III.4), il faut connaître les conditions aux limites sur ces frontières.

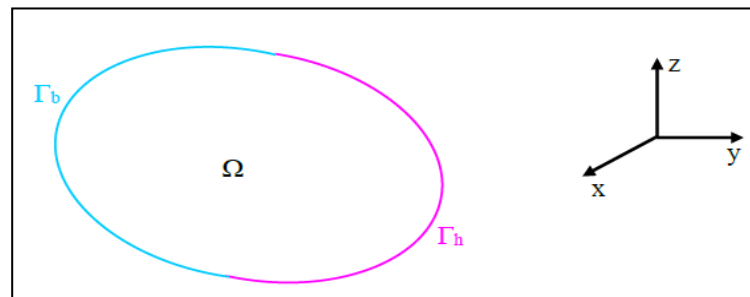


Figure III.4. Domaine d'étude borné

Généralement les conditions aux limites peuvent être des conditions de types Dirichlet ou Neumann.

➤ Conditions de type Dirichlet sur Γ_h :

La valeur du potentiel vecteur est imposée sur la frontière Γ_h :

$$A/\Gamma_h = A_0 \quad (\text{III.30})$$

A titre d'exemple, lorsque le problème possède une géométrie symétrique et les sources sont disposées de manière antisymétrique, on a une condition naturelle de Dirichlet $A=0$ sur l'axe d'antisymétrie.

➤ **Conditions de type Neumann sur Γ_b :**

Dans ce cas, la dérivée du potentiel vecteur par rapport à la normale à la frontière Γ_b est imposée:

$$\partial A / \Gamma_b = 0 \quad (\text{III.31})$$

Cette condition est utilisée pour des problèmes qui possèdent une symétrie géométrique et physique.

Dans les dispositifs électromagnétiques présentant des symétries ou des conditions de fonctionnement périodiques ou anti-périodiques, une réduction du domaine d'étude peut être effectuée.

III.2.8- Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation. Celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement. Une telle modélisation est généralement représentée par des équations aux dérivées partielles sur un domaine géométrique avec des conditions aux limites sur les frontières du domaine.

Une grande variété de méthodes peut être utilisée en vue de résoudre ces équations traduisant les phénomènes physiques rencontrés par les communautés scientifique et industrielle. Le choix d'une méthode de résolution est intimement lié à la géométrie et aux caractéristiques de la structure considérée [48].

III.2.8.1- Méthodes analytiques

Celles-ci donnent une solution exacte et précise mais qui n'est pas facile à trouver ou elle n'est pas du tout évidente vu la complexité du problème. Les modèles analytiques trouvent leur grand intérêt dans l'étude des phénomènes avec mouvement (dynamiques) et à effet de peau important dans les induits (charges). Ils apportent aussi des avantages importants en terme de coût de calcul, d'espace mémoire, de volume d'informations et de facilité d'exploitation. Les méthodes analytiques trouvent aussi leur grand intérêt lorsqu'elles sont couplées à des méthodes numériques. Parmi les principales méthodes analytiques de résolution des équations aux dérivées partielles on a [48]:

- ✓ La Méthode de Séparation des Variables (MSV),
- ✓ La Méthode Intégrale (MI).

III.2.8.2- Méthodes semi-analytiques

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

A. 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.

La limitation de la discrétisation aux frontières du domaine nous donne l'avantage de réduire l'espace mémoire, surtout pour les systèmes tridimensionnels où l'air occupe une grande partie du domaine. Cependant, elle a l'inconvénient de conduire à des systèmes qui possèdent des matrices pleines.

B. Méthode des circuits couplés (MCC)

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

III.2.8.3- Méthodes numériques

Les méthodes numériques sont développées grâce au développement des outils informatiques. Ces sont des méthodes basées sur la discrétisation du domaine d'étude. Nous distinguons trois méthodes principales pour la résolution des équations électromagnétiques [58]:

- ✓ La méthode des différences finis,
- ✓ La méthode des volumes finis,
- ✓ La méthode des éléments finis.

A. Méthode des différences finies (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.

B. 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.

C. Méthode des éléments finis (MEF)

La MEF était utilisée au début par les spécialistes de la mécanique. Son introduction dans le domaine d'électrotechnique été fait par M.V.K. Charien en 1970.

La méthode des éléments finis est bien adaptée à la résolution des équations aux dérivées partielles sur des domaines de géométrie complexe, linéaire ou non linéaire. Cette méthode 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.

❖ Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à rechercher une solution représentant les phénomènes étudiés sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en parties finies adjacentes appelées éléments finis.

Cette solution globale sera construite sur chacun des éléments du maillage et doit vérifier globalement les équations aux dérivées partielles qui modélisent le phénomène, et les conditions aux limites requises. Sur chaque élément fini, la solution est décrite par une interpolation, en fonction des valeurs nodales de l'inconnu.

La formulation présentée précédemment ne peut être résolue par des méthodes analytiques que dans des configurations géométriques simples. Une méthode numérique doit être appliquée dans le cas général.

La méthode des éléments finis a été choisie pour sa facilité d'application à des géométries de toutes sortes et à différents domaines de la physique : la résistance des matériaux, la mécanique des fluides, la thermique, l'électromagnétisme etc. On l'utilise, dans ce dernier domaine, pour des problèmes magnétostatiques et magnétodynamiques.

❖ Maillage en éléments finis

Ce maillage consiste à discrétiser le domaine d'étude (1D, 2D, 3D) en un ensemble d'éléments finis de forme simple. Ces éléments peuvent être des segments, des triangles, etc.... (figure III.5). Selon le domaine à discrétiser, la taille des éléments du maillage n'est pas forcément la même, ce qui permet la densification de la discrétisation dans les zones où l'inconnue varie fortement.

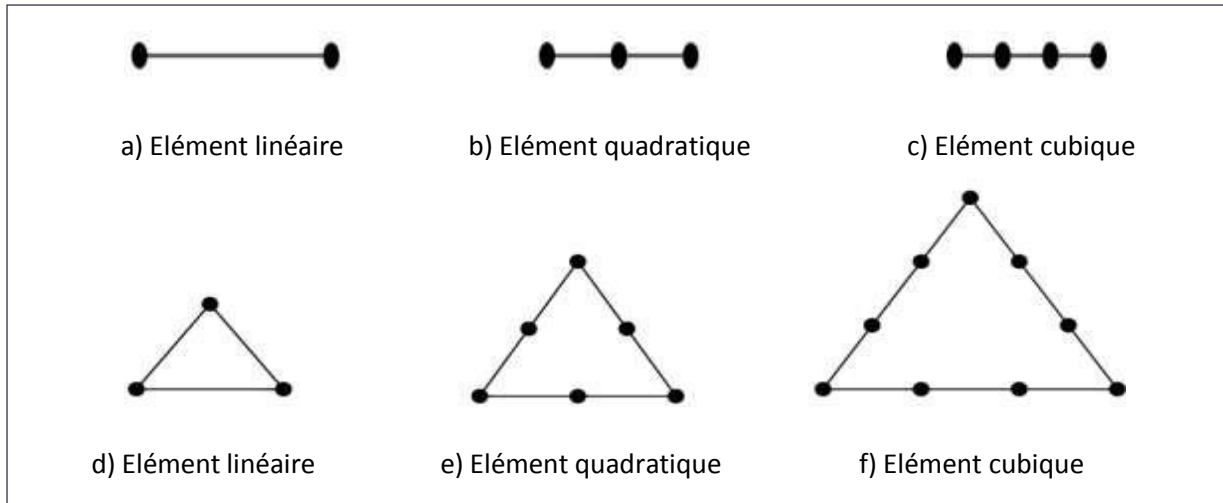


Figure III.5. Éléments classiques en une et deux dimensions

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage.

❖ Fonctions d'approximation

Le potentiel vecteur magnétique dans un élément peut être approché par des fonctions d'approximations (dites fonctions de formes) dont l'expression varie d'un type d'élément à un autre. Ces fonctions d'approximations doivent assurer la continuité du potentiel aux interfaces des éléments. Généralement, on utilise des fonctions polynomiales.

Dans le domaine global contenant n_e éléments, le potentiel $A(x, y)$ est la contribution des potentiels $A_e(x, y)$ de tous les éléments du maillage. Le potentiel A_e , en tout point dans un élément e , ainsi que la densité de courant J_i sont parfaitement définis en fonction des valeurs de ses sommets. Donc, pour un élément triangulaire on peut écrire:

$$A_e = a + bx + cy = \sum_{i=1}^3 \alpha_i A_i \quad (\text{III.32})$$

$$J_i = a + bx + cy = \sum_{i=1}^3 \alpha_i J_i \quad (\text{III.33})$$

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

$$\alpha_i(x_i, y_j) = \begin{cases} 1 & \dots si \dots i = j \\ 0 & \dots si \dots i \neq j \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (\text{III.35})$$

Pour un élément triangulaire de premier ordre on a :

$$\alpha_1 = \frac{1}{2s} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3) x + (x_3 - x_2) y] \quad (\text{III.36})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2s} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1) x + (x_1 - x_3) y] \quad (\text{III.37})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2s} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2) x + (x_2 - x_1) y] \quad (\text{III.38})$$

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

$$s = \frac{1}{2} [(x_2 - x_3)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{III.39})$$

❖ Formulation intégrale

La formulation intégrale des équations différentielles, par la méthode des éléments finis, peut être obtenue par l'utilisation de l'une de ces deux méthodes : variationnelle ou résidus pondérés.

L'utilisation de la méthode variationnelle exige aux préalable la connaissance de la fonctionnel d'énergie du système à étudier, ce qui n'est pas toujours possible à réaliser.

La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système, ce qui a rendu cette méthode plus générale et largement utilisée par rapport à la méthode variationnelle.

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

$$[M]_e . [A]_e = [F]_e \quad (\text{III.40})$$

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

$$[M] . [A] = [F] \quad (\text{III.41})$$

III.3- Calcul des forces magnétiques

Les vibrations qui apparaissent dans une machine électrique, suite à une excitation électrique, ont pour origine principale les forces magnétiques locales réparties en tout point du circuit magnétique de cette machine.

La détermination de ces forces locales est restée pour un long moment, l'un des problèmes les moins résolus dans l'électromagnétisme. La complexité de ce problème est liée à la nature microscopique des phénomènes à l'origine des forces magnétiques.

Il existe des modèles qui calculent correctement la force magnétique globale, mais ils ne sont plus valables à l'échelle locale. Les modèles basés sur le principe de la variation de l'énergie, tel que la méthode des travaux virtuels, ne présentent pas cet inconvénient.

Une nouvelle démarche pour appliquer le principe des travaux virtuels, qui consiste à dériver une nouvelle expression de l'énergie, a été proposée par A. Belahcen. En utilisant cette méthode, on ne doit pas passer par le calcul de la dérivée de la matrice Jacobienne et de son déterminant, ce qui rend facile sa mise en œuvre. Cette méthode a été adoptée dans le code de calcul qu'on va exploiter dans notre étude.

En utilisant cette méthode, l'énergie magnétostatique sera calculée à partir de l'expression suivante [59]:

$$W = \int_0^B H \cdot dB = \int_0^A J dA \quad (\text{III.42})$$

où J est le terme source dans le système matriciel issu de la méthode des éléments finis: $[M][A]=[J]$, avec $[M]$ c'est la matrice de rigidité magnétique et $[A]$ c'est le vecteur du potentiel vecteur magnétique aux nœuds du maillage. Dans ce cas, la force magnétique est donnée par :

$$F = - \left. \frac{\partial W}{\partial s} \right|_{\phi=cste} = - \frac{\partial}{\partial s} \int_0^A J dA \quad (\text{III.43})$$

Cette expression de la force devient:

$$F = - \frac{\partial}{\partial s} \int_0^A [M][A] dA \quad (\text{III.44})$$

$$F = - \int_0^A [A]^T \frac{\partial [M]}{\partial s} dA \quad (\text{III.45})$$

La matrice élémentaire $[M^e]$ s'exprime:

$$[M_{ij}^e] = \frac{v}{4\Delta} [b_i b_j + c_i c_j] \quad (\text{III.46})$$

Où:

$$b_i = y_j - y_k \quad (\text{III.47})$$

$$c_i = x_k - x_j \quad (\text{III.48})$$

x_i, y_i sont les coordonnées du nœud i de l'élément, $i = 1, 2, 3$,

Δ : surface de l'élément considéré,

v : réductivité magnétique,

s : déplacement virtuel.

III.4- Calcul vibratoire

Pour le calcul de la réponse dynamique d'une structure on doit résoudre l'équation de la dynamique donnée, en utilisant la méthode des éléments finis, après l'opération d'assemblage par le système algébrique suivant [59] :

$$[M][\ddot{d}] + [C][\dot{d}] + [K][d] = [F] \quad (\text{III.49})$$

Où :

$[M]$: matrice masse globale de dimensions $(NT \times NT)$,

$[K]$: matrice de rigidité mécanique globale de dimensions $(NT \times NT)$,

$[C]$: matrice d'amortissement de dimensions $(NT \times NT)$,

$[F]$: vecteur de forces appliquées aux nœuds de longueur NT ,

$[d]$: vecteur des déplacements aux nœuds de longueur NT ,

NT : nombre de degrés de liberté de toute la structure.

La résolution de cette équation nécessite la connaissance des lois de comportement de la structure et l'établissement des conditions aux limites adéquates sur la surface englobant le volume d'étude. Ce sont des conditions sur les contraintes (appelées conditions de type équilibre) ou sur les déplacements (appelées conditions cinématiques). Elles ne peuvent pas coexister sur la même partie du solide (figure III.6). Ces deux types de conditions se traduisent par les relations suivantes:

$$d = d_0 \quad \forall M \in s_d \quad (\text{III.50})$$

$$\sigma_{ij} \cdot n = f_0 \quad \forall M \in s_\sigma \quad (\text{III.51})$$

Où:

n : normale sur la surface s_σ ,

i, j : représentent les coordonnées x, y, z .

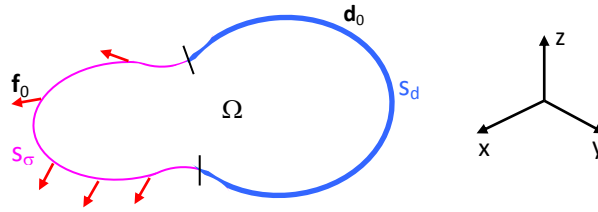


Figure III.6. Représentation des conditions aux limites d'un problème mécanique

Si le domaine Ω (toute la structure) est constitué de Nb nœuds, et si le nombre de degrés de liberté en chaque nœud est égal à 2 (en bidimensionnel et lorsque les rotations n'existent pas), il y'a en tout $(2 \times Nb)$ degrés de liberté ou coordonnées généralisées. Ces dernières sont les inconnues à trouver.

En négligeant l'amortissement, l'équation du mouvement exprimée précédemment deviendra:

$$[M][\ddot{d}] + [K][d] = [F] \quad (\text{III.52})$$

La phase d'assemblage consiste à construire les matrices M , K et F de la structure complète à partir des matrices élémentaires M_e , K_e et F_e . Pour un élément de volume v_e les matrices M_e , K_e s'expriment comme suit [59]:

$$[M]_e = \int_{v_e} \rho [N]^T [N] dV_e \quad (\text{III.53})$$

$$[K]_e = \int_{v_e} [N]^T [D]^T [H] [D] [N] dV_e \quad (\text{III.54})$$

Où:

$[M]_e$: matrice symétrique de dimensions $((2 \times n) \times (2 \times n))$, appelée matrice de masse élémentaire,

$[K]_e$: matrice symétrique de dimensions $((2 \times n) \times (2 \times n))$, appelée matrice de rigidité élémentaire,

n : nombre de nœuds pour chaque élément,

ρ : masse volumique de la structure,

N_i : fonctions d'approximation,

[D]: opérateur différentiel représenté comme suit:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{III.55})$$

[H]: matrice d'élasticité dont ses composantes font intervenir les caractéristiques physiques du matériau. En état de contraintes planes elle est donnée sous la forme:

$$[H] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.56})$$

Et en état de déformations planes elle s'exprime comme suit:

$$[H] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.57})$$

Avec E c'est le module d'Young, encore appelé module d'élasticité et ν c'est le coefficient de Poisson.

On peut définir, pour chaque élément une relation matricielle permettant d'établir une correspondance entre les déplacements aux nœuds de l'élément et les déplacements aux nœuds de la structure, soit :

$$[d]_e = [\beta]_e [d] \quad (\text{III.58})$$

Avec:

$[\beta]_e$: matrice de localisation de l'élément e, appelée aussi matrice de connectivité géométrique, de dimensions $(n_e \times NT)$,

$[d]_e$: vecteur des déplacements aux nœuds de l'élément e de dimensions $(n_e \times 1)$,

$[d]$: vecteur des déplacements nodaux de la structure de dimensions $(NT \times 1)$,

n_e : nombre de degrés de liberté (ddl) de chaque élément,

Chaque relation (III.58) permet de repérer ou de localiser les ddl de chaque élément dans l'ensemble des ddl de la structure. Les éléments de la matrice $[\beta]_e$ sont des zéros et des uns. Les matrices globales $[M]$, $[K]$ et $[F]$ s'expriment alors comme suit:

$$[K] = \sum_e [\beta]_e^T [K]_e [\beta]_e \quad (\text{III.59})$$

$$[M] = \sum_e [\beta]_e^T [M]_e [\beta]_e \quad (\text{III.60})$$

$$[F] = \sum_e [\beta]_e^T [F]_e \quad (\text{III.61})$$

La méthode de superposition modale est souvent utilisée pour résoudre les problèmes de réponse dynamique des structures, que ce soit pour des analyses temporelles (réponses transitoires) ou fréquentielles (réponses harmoniques). Il est donc nécessaire, de disposer de la base modale pour le calcul de la réponse dynamique [59].

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des équations de Maxwell, des formulations mathématiques des modèles électromagnétiques et des différentes méthodes utilisées pour les résoudre. De plus, un aperçu a été donné sur les méthodes de calcul des forces électromagnétiques ainsi que celles utilisées pour le calcul de la réponse dynamique d'une structure tout en se basant sur la méthode des éléments finis.

L'intérêt de la méthode des éléments finis, d'une part, est de déterminer la distribution des forces magnétiques dans chaque point du domaine d'étude, et d'autre part, de discrétiser les équations de la dynamique et d'aboutir à une équation matricielle simple.

Chapitre IV
Application et résultats

Chapitre IV

Application et résultats

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 le diagnostic des défauts d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) par analyse vibratoire. 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 une analyse de son comportement vibratoire. 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 faire une modélisation de la machine numériquement, en se basant sur la méthode des éléments finis (MEF).

Le code de calcul, contenant deux parties: une déjà élaborée et une autre développée, va être appliqué dans les deux cas: machine saine et machine avec défaut. Une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas va être effectuée.

IV.2- Caractéristiques géométriques et physiques de la machine à étudier

IV.2.1- Géométrie

Une photo qui a été prise du moteur synchrone à aimants permanents à étudier est présentée dans la figure ci-dessous.

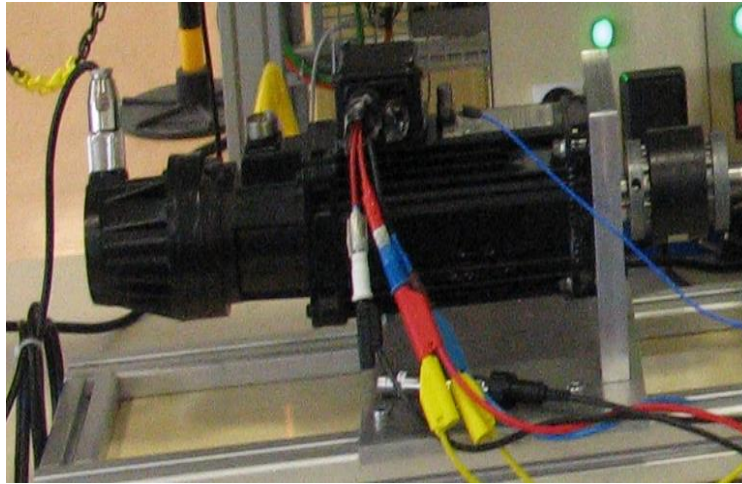


Figure IV.1. Photo de la MSAP à étudier

Ce moteur est décrit à l'aide de points, de segments, de droites et d'arcs. Il comporte dix-huit encoches et six aimants, donc il a six pôles. 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.2.

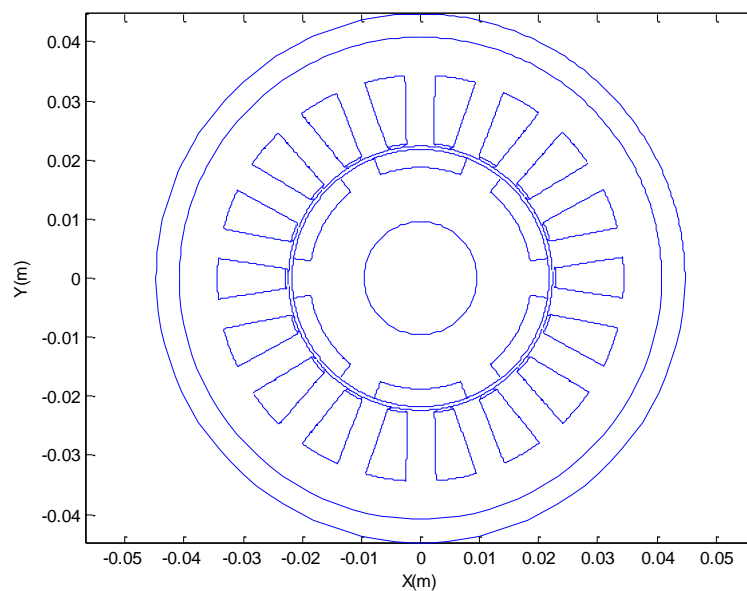


Figure IV.2. Configuration géométrique de la MSAP étudiée

IV.2.2- Caractéristiques

Les caractéristiques principales de la machine étudiée sont données dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine étudiée

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 étape de la description de la machine étudiée concerne la caractérisation des matériaux composant cette machine. Ainsi, le logiciel Matlab regroupe les surfaces élémentaires en régions géométriques ayant les mêmes propriétés physiques. Les différentes régions constituant cette machine sont montrées dans la figure ci-dessous (les aimants sont insérés dans le rotor).

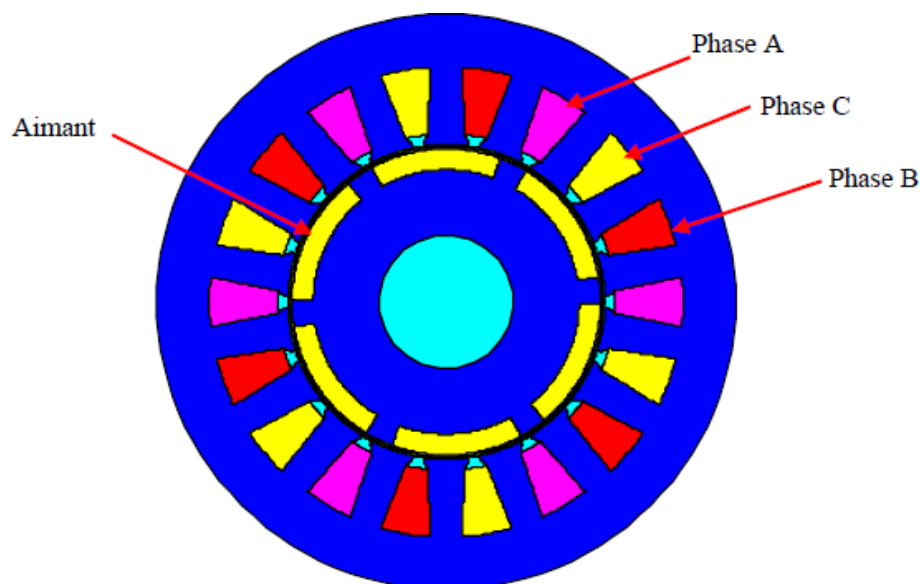


Figure IV.3. Différentes régions constituant la MSAP étudiée

IV.3- Modélisation magnéto-mécanique de la MSAP

IV.3.1- Procédure suivie

Les machines électriques tournantes présentent des antisymétries entre chaque pôle et l'autre adjacent. Donc, l'étude peut être limitée à un seul pôle. Ceci nous permet de gagner en espace mémoire et en temps de calcul.

En supposant que la machine est suffisamment longue, nous pouvant ramener l'étude au plan XOY et le domaine de résolution correspond à la section transversale de cette machine (étude bidimensionnelle (2D)).

Une valeur nulle du potentiel vecteur magnétique a été imposée sur les frontières du domaine de résolution (condition 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:

$$\overrightarrow{rot}(\vartheta \overrightarrow{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_{ext} + \overrightarrow{rot}(\vartheta \overrightarrow{Br}) \quad (IV.1)$$

Où:

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

\vec{j}_{ext} : densité de courant imposé,

σ, ϑ : conductivité électrique et reluctivité magnétique respectivement.

En se basant sur la méthode des éléments finis (MEF), l'implémentation du modèle numérique multi-physique est réalisée sous environnement Matlab. L'intérêt de cet outil est de fournir des grandeurs de sortie comme les forces et les vibrations (déplacements et/ou accélérations) d'origines électromagnétiques en tout point du domaine d'étude. Le processus de calcul s'effectue en trois étapes:

- ✓ **Etape 1:** introduction des paramètres géométriques et physiques de la machine (dimensions de la machine, conductivité, perméabilité, masse volumique des tôles...),
- ✓ **Etape 2:** calcul du potentiel vecteur magnétique, des forces magnétiques, des modes propres et des fréquences propres du stator,
- ✓ **Etape 3:** calcul du déplacement et de l'accélération (à partir de l'équation dynamique du modèle mécanique) dans chaque point de la structure mécanique (stator + carcasse).

Les vibrations qui apparaissent dans une machine électrique, suite à une excitation électrique, ont pour origine principale les forces magnétiques locales réparties en tout point du circuit magnétique de cette machine.

Pour déterminer la réponse dynamique (déplacement et/ou accélération) de l'ensemble stator-carcasse, il faut tout d'abord déterminer les matrices masse et rigidité correspondantes et par la suite les fréquences propres et les modes propres de cette structure. Dans ce but, il faut introduire les paramètres mécaniques du stator ainsi que celles de la carcasse. Donc, il faut introduire le module de Young, le coefficient de poisson ainsi que la masse volumique.

➤ **Module de Young**

Le module de Young, module d'élasticité (longitudinale) ou module de traction est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

➤ **Coefficient de Poisson**

Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

➤ **Masse volumique**

La masse volumique d'une structure représente le rapport entre sa masse et son volume.

Les caractéristiques mécaniques du stator et de la carcasse, définis ci-dessus, sont regroupées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Caractéristiques mécaniques du stator et de la carcasse

	Module de Young (10^9 N/m ²)	Coefficient de poisson	Masse volumique (Kg/m ³)
Carcasse	67.5	0.34	2700
Stator	190	0.3	7650

Le calcul des forces magnétiques et des vibrations a été effectué en se basant sur un code de calcul déjà développé. Notre contribution concerne l'étape de calcul du champ et celle du diagnostic. L'organigramme ci-dessous regroupe les différentes étapes du code de calcul magnéto-mécanique appliqué.

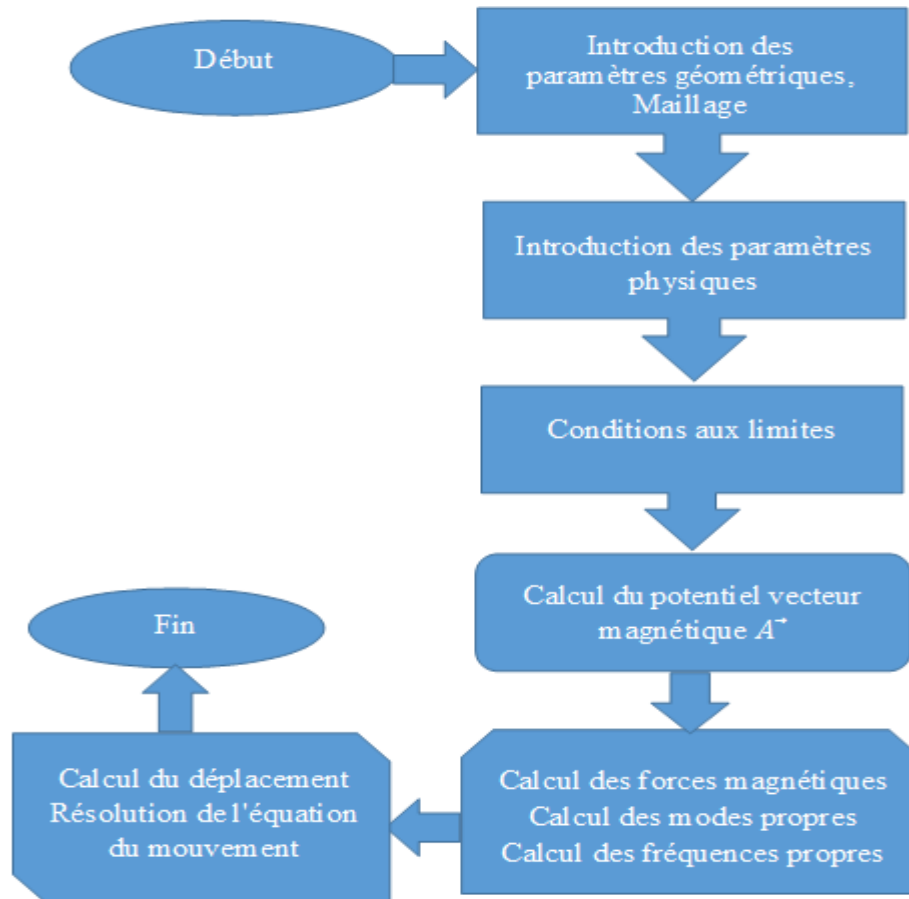


Figure IV.4. Organigramme du code de calcul magnéto-mécanique appliqué

IV.3.2- Résultats obtenus

Les résultats sont obtenus à partir des relations et formulations mathématiques données dans les chapitres précédents.

La figure IV.5 représente le maillage éléments finis adopté pour cette étude. Il est généré par le mailleur automatique du logiciel Matlab. Il faut très bien affiner le maillage au niveau de l'entrefer. Pour que la solution soit exacte, on doit avoir au moins deux mailles à ce niveau. Les éléments constituant ce maillage sont des éléments triangulaires du premier ordre.

Les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique sont présentées dans la figure IV.6. Ces lignes ont une distribution radiale dans l'entrefer de la machine et elles ont tendance de passer par les chemins les plus faciles. Elles sont plus concentrées dans les endroits étroits.

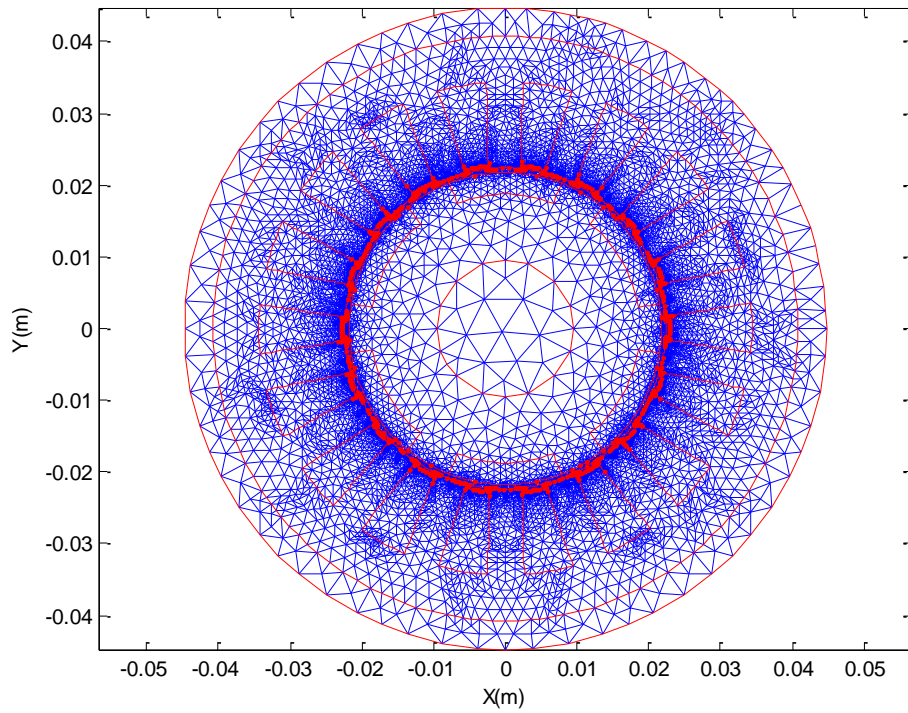


Figure IV.5. Maillage éléments finis adopté à cette étude

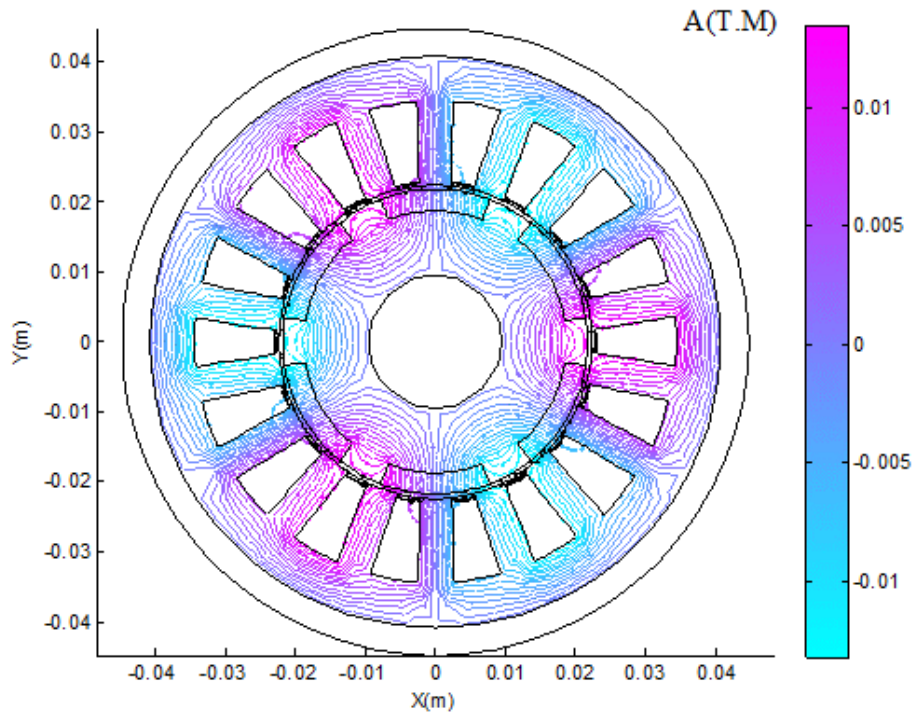


Figure IV.6. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

La distribution des forces magnétiques ainsi que leur évolution suivant un contour passant par les dents statoriques sont données par les figures IV.7 et IV.8 respectivement.

Les forces sont plus importantes, aux endroits où les lignes du champ sont plus concentrées. De plus, elles ont une distribution non uniforme, le long du contour passant par les dents, en raison de la présence des encoches et des aimants.

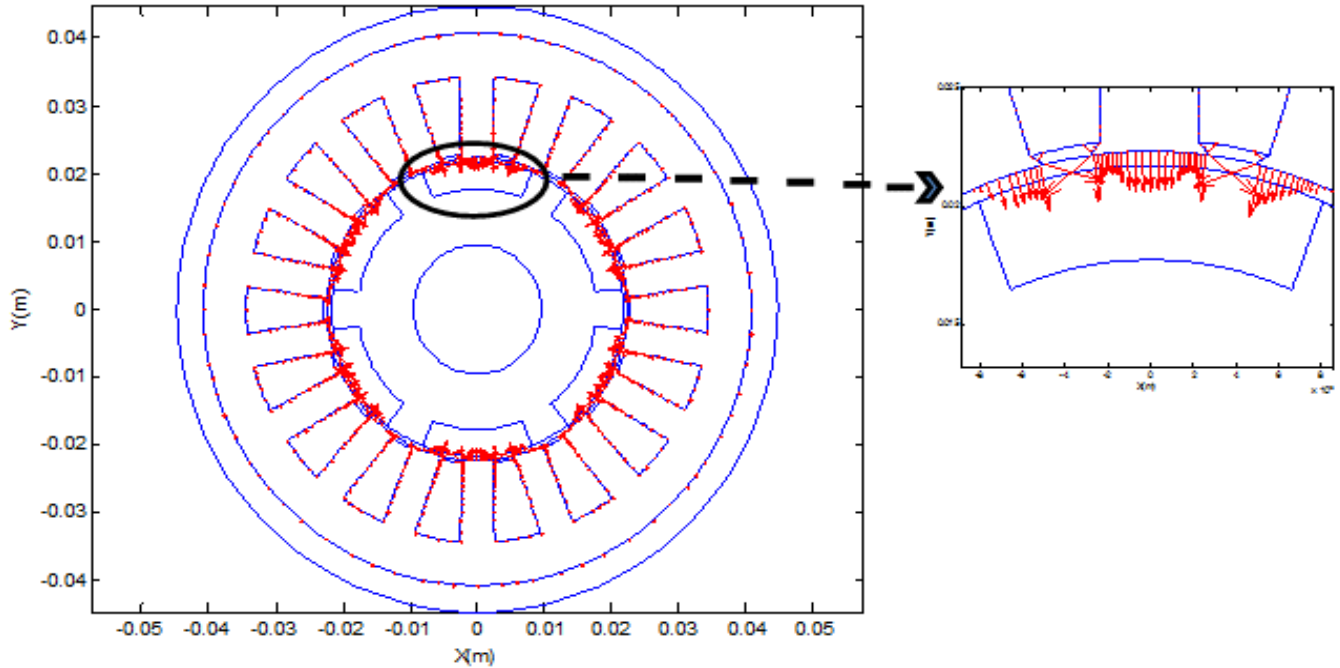


Figure IV.7. Distribution spatiale des forces magnétiques

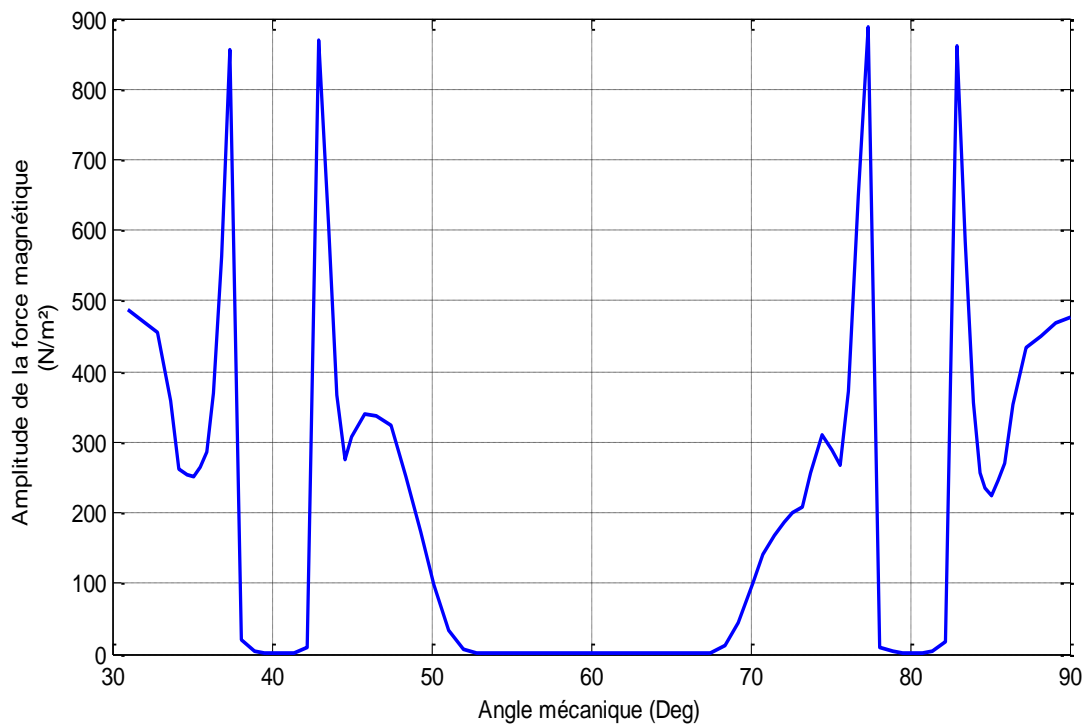


Figure IV.8. Evolution de la force magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques

La figure ci-dessous présente le spectre fréquentiel de la force. Il est bien clair que ce spectre est riche en harmoniques. Ceci s'explique par la distribution non uniforme de la force (du champ) dans l'entrefer. Ces harmoniques sont l'origine principale des vibrations générées par la machine.

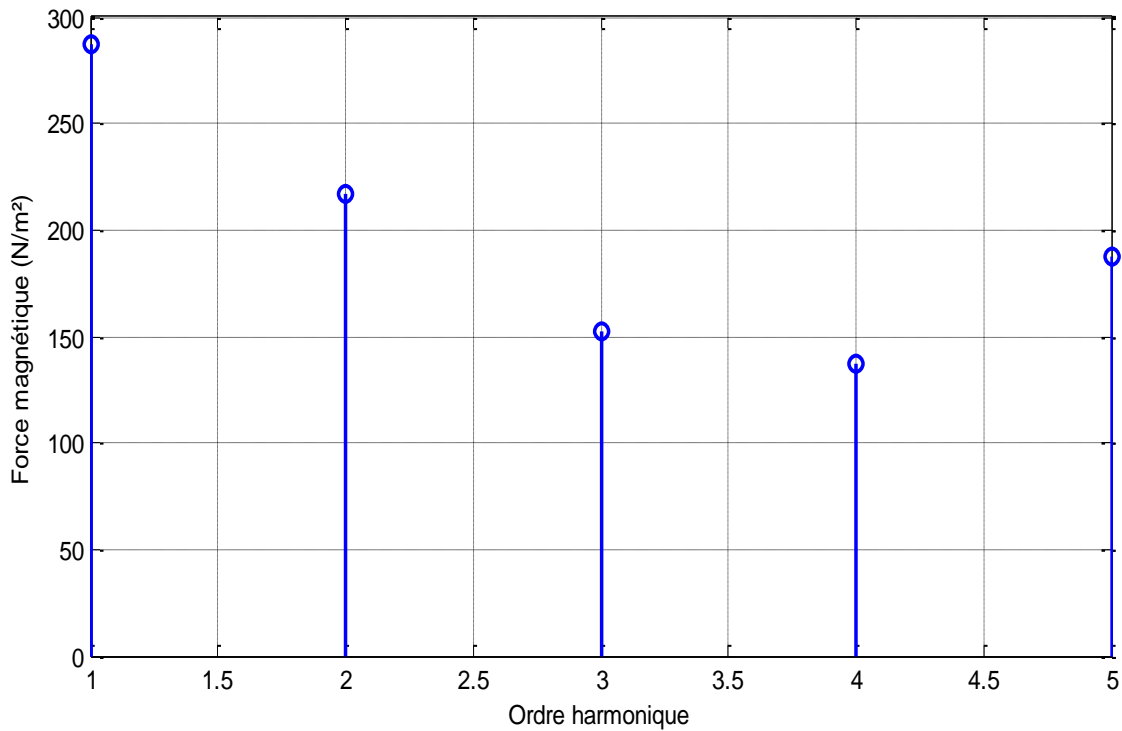


Figure IV.9. Spectre fréquentiel de la force magnétique obtenue suivant un contour passant par les dents statoriques

Le tableau IV.3 regroupe les fréquences propres obtenues de l'ensemble stator-carcasse. Ces fréquences sont celles correspondant aux premiers modes.

Tableau IV.3. Fréquences propres de l'ensemble stator-carcasse

Modes propres	Fréquences propres
1	$1.5580 \cdot 10^4$
2	$1.7030 \cdot 10^4$
3	$2.6019 \cdot 10^4$
4	$4.1901 \cdot 10^4$
5	$5.8028 \cdot 10^4$
6	$7.3937 \cdot 10^4$

Pour résoudre le problème mécanique (calcul des vibrations) avec un temps de calcul réduit, on a considéré un pas polaire seulement (période mécanique). Les figures IV.10 et IV.11 présentent, respectivement, le déplacement ainsi que l'accélération obtenus sur la surface externe de la carcasse.

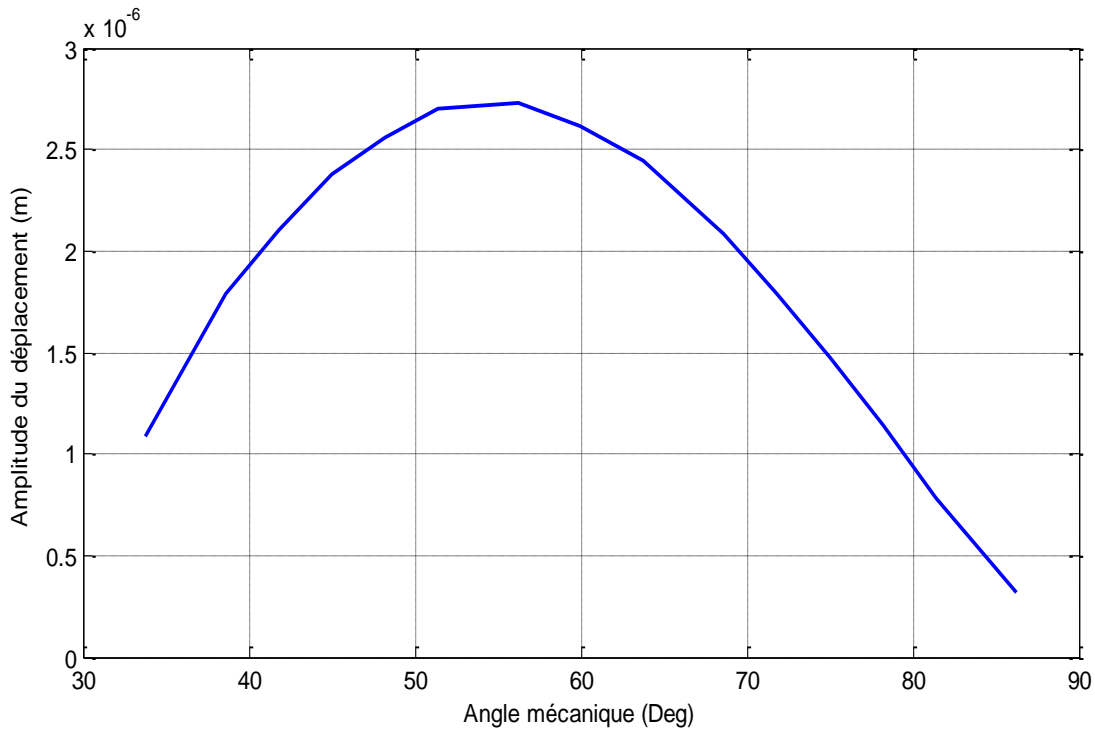


Figure IV.10. Amplitude du déplacement obtenu sur la surface externe de la machine

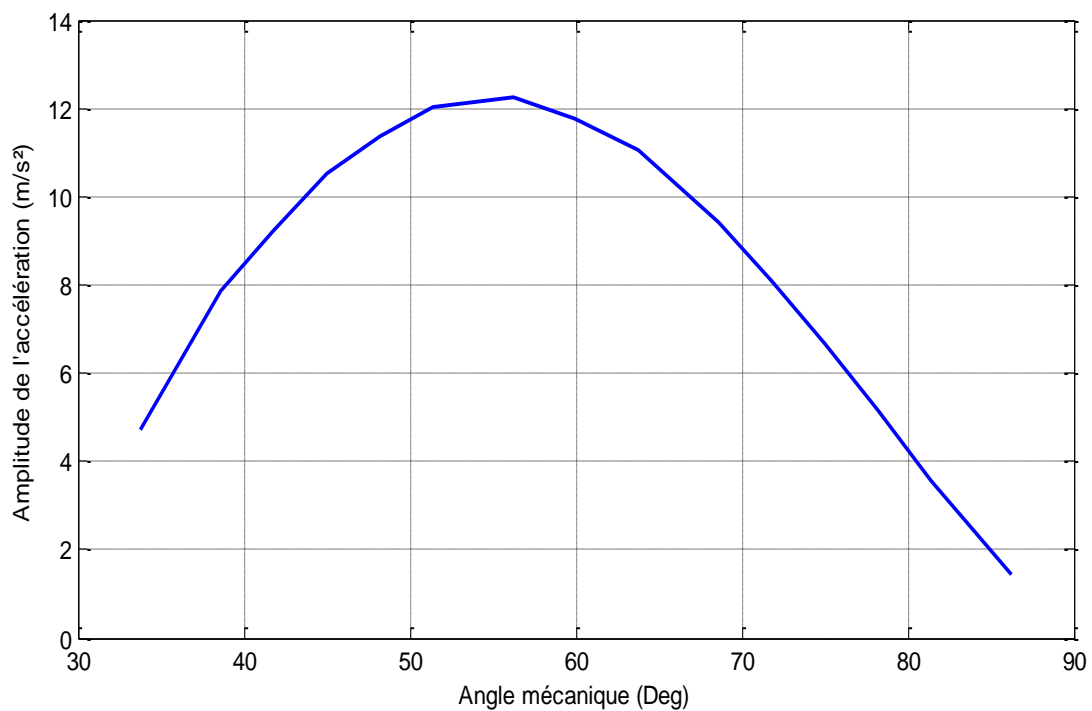


Figure IV.11. Amplitude de l'accélération obtenue sur la surface externe de la machine

IV.4- Diagnostic des défauts de la MSAP étudiée par analyse vibratoire

Dans le but d'effectuer cette étude, on a modélisé et diagnostiqué la machine en absence et en présence de défauts et on a fait ensuite une comparaison entre les spectres fréquentiels des déplacements/accélérations obtenus dans les deux cas: machine saine et machine défectueuse.

Pour créer des défauts de différentes natures, on a cherché à modifier quelques paramètres de la machine. Ceci en intervenant au niveau de l'introduction des paramètres géométriques et physiques de la machine.

Pour obtenir les spectres du déplacement/accélération, une analyse spectrale basée sur l'utilisation de la transformée de Fourier rapide (F.F.T) est effectuée.

IV.4.1- Défaut de circuit magnétique (fissure)

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.12.

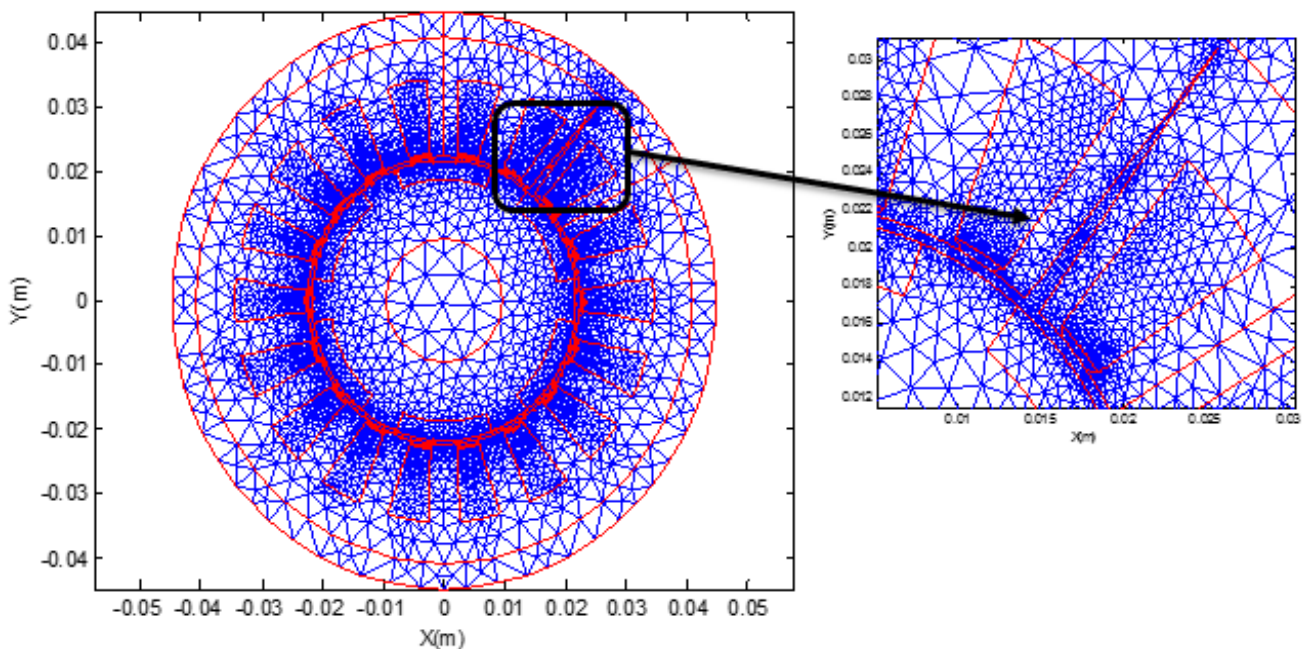


Figure IV.12. Maillage de la MSAP en présence de défaut de fissure

Le spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de fissure est présenté dans la figures IV.13. On constate bien qu'il y a un changement par rapport à celui de la machine saine (figure IV.9).

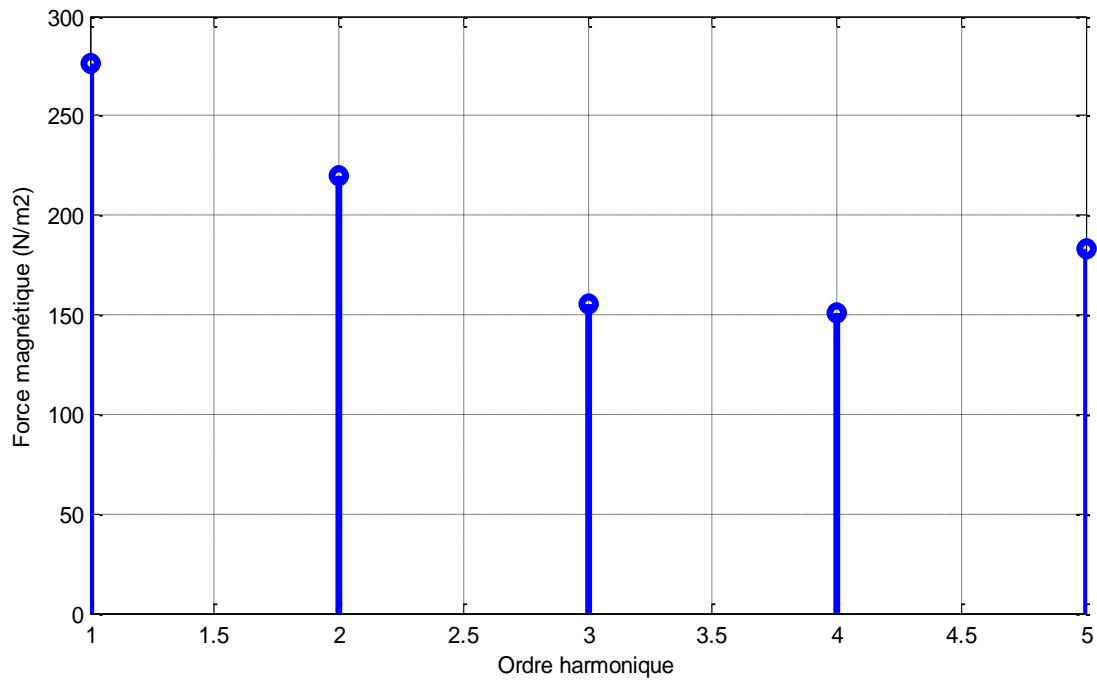
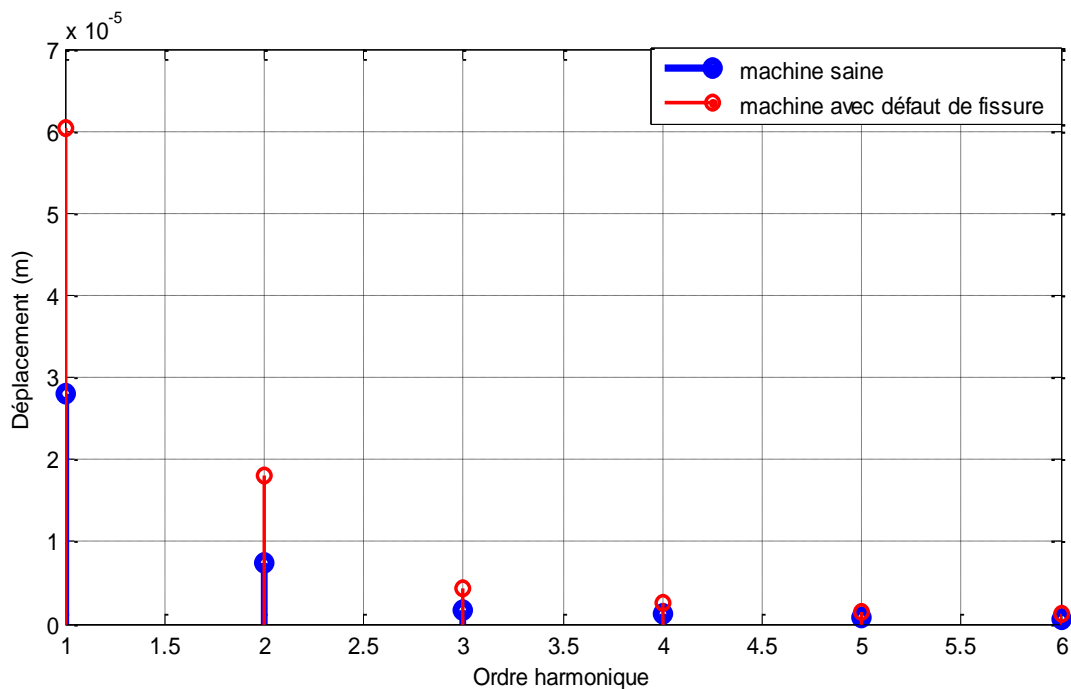
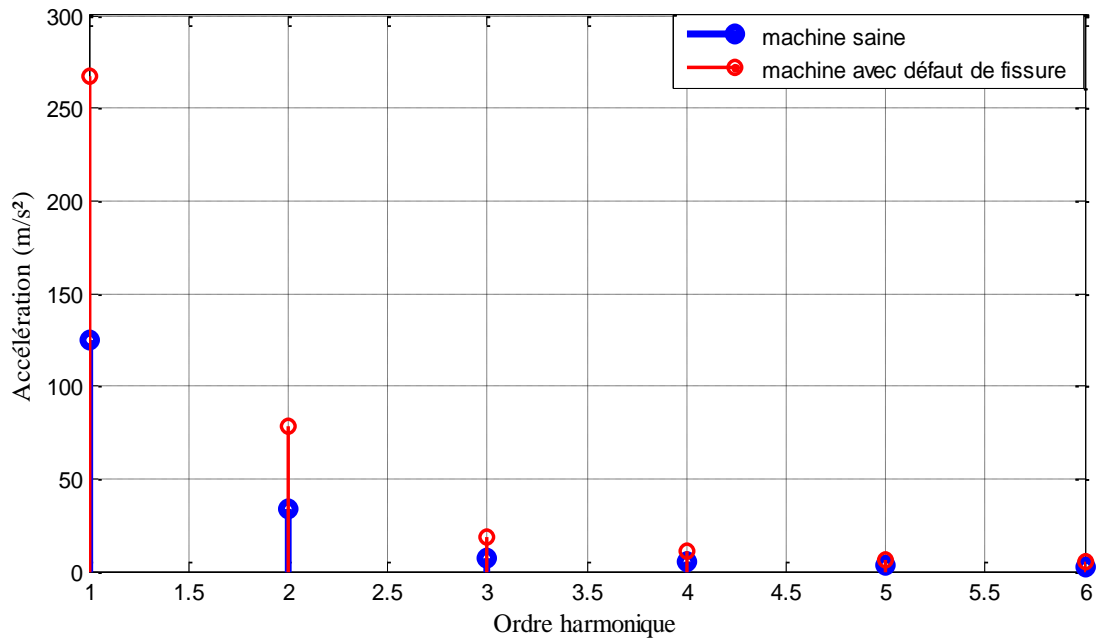


Figure IV.13. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de fissure

Les deux figures IV.14 et IV.15 présentent, respectivement, les spectres fréquentiels du déplacement et de l'accélération. Dans un souci de montrer l'influence de la présence de défaut de fissure, une superposition des deux spectres, en présence et en absence de défaut, a été effectuée. Il est très bien clair, à partir de ces figures, qu'il y a une modification dans les spectres en présence de défaut de fissure. Donc, le signal vibratoire est un bon indicateur de ce type de défauts.



Figures IV.14. Spectre fréquentiel du déplacement en présence et en absence de défaut de fissure



Figures IV.15. Spectre fréquentiel de l'accélération en présence et en absence de défaut de fissure

IV.4.2- Défaut de court-circuit

Le court-circuit, entre spires ou bien entre phases, engendre un déséquilibre des courants de phases avec un risque de fusion des conducteurs. Dans ce travail, on va considérer un défaut de court-circuit dans deux phases (entre spires). Ceci en amplifiant leurs valeurs du courant.

Le spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de ce type de défaut est présenté dans la figure IV.16.

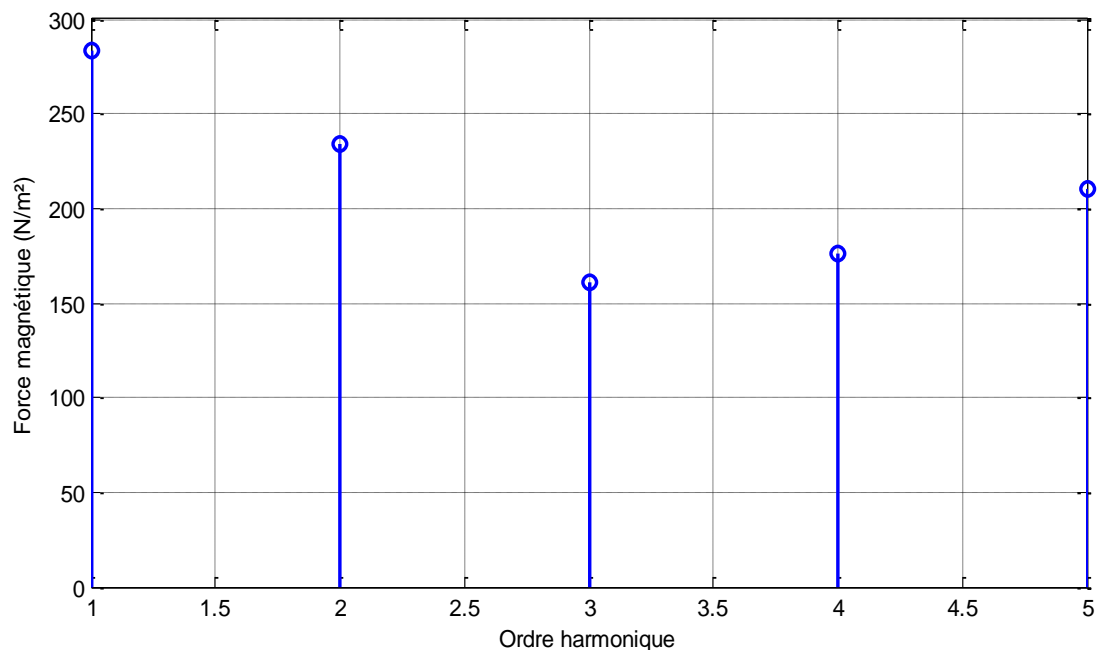
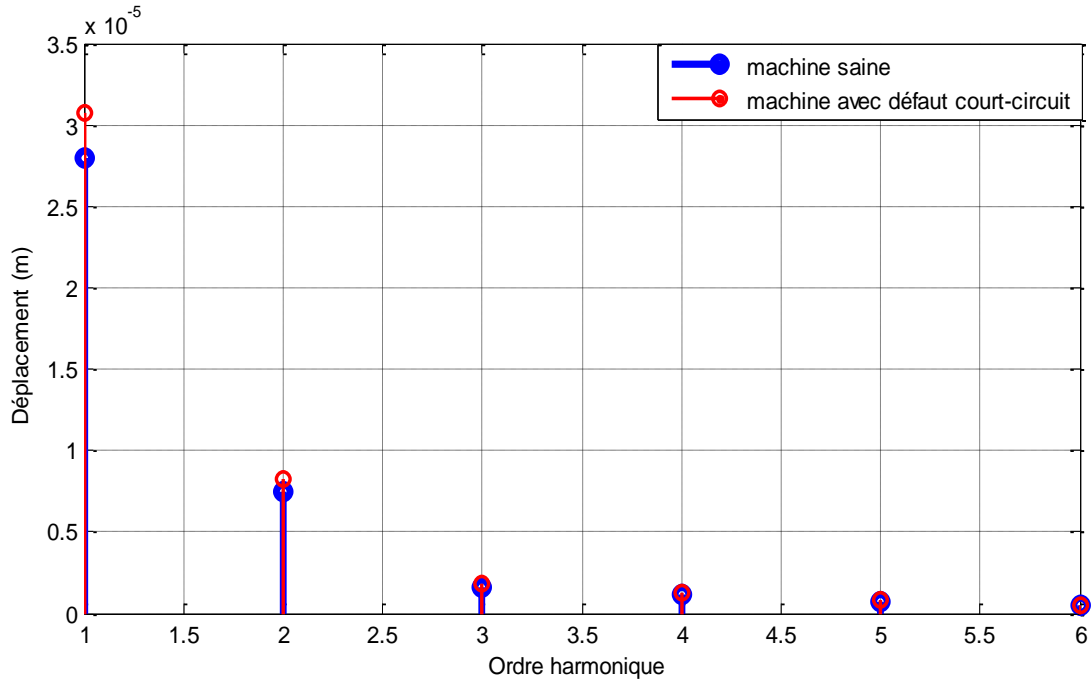
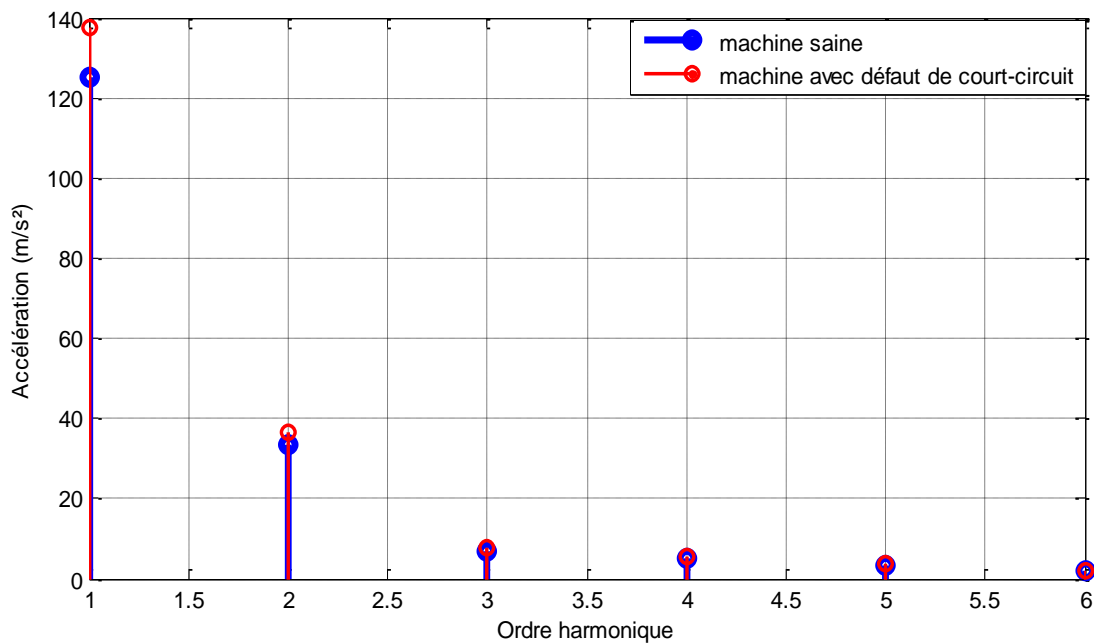


Figure IV.16. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de court-circuit

Les spectres fréquentiels du déplacement et de l'accélération sont présentés dans les figures IV.17 et IV.18, respectivement. Une superposition des deux spectres, en présence et en absence de défaut de court-circuit, a été effectuée. A partir de ces figures, on peut très bien constater qu'il y a une modification dans les spectres en présence de ce défaut. Donc, le signal vibratoire est un bon indicateur de défaut de court-circuit.



Figures IV.17. Spectres fréquentiels de déplacement dans les deux cas: machine saine et machine avec défaut de court-circuit



Figures IV.18. Spectres fréquentiels de l'accélération dans les deux cas: machine saine et machine avec défaut de court-circuit

IV.4.3- Défaut de désaimantation des aimants permanents

Un défaut de désaimantation se traduit par une démagnétisation des aimants permanents, entraînant une réduction ou un déséquilibre du flux magnétique produit. Pour créer ce défaut dans la machine étudiée, on a introduit une aimantation nulle dans trois aimants.

Le spectre fréquentiel de la force magnétique, obtenu dans ce cas, est montré dans la figure ci-dessous. On constate bien un changement du spectre en le comparant avec celui de la machine saine. Cette diminution s'explique par la perte d'une partie de l'excitation de la machine.

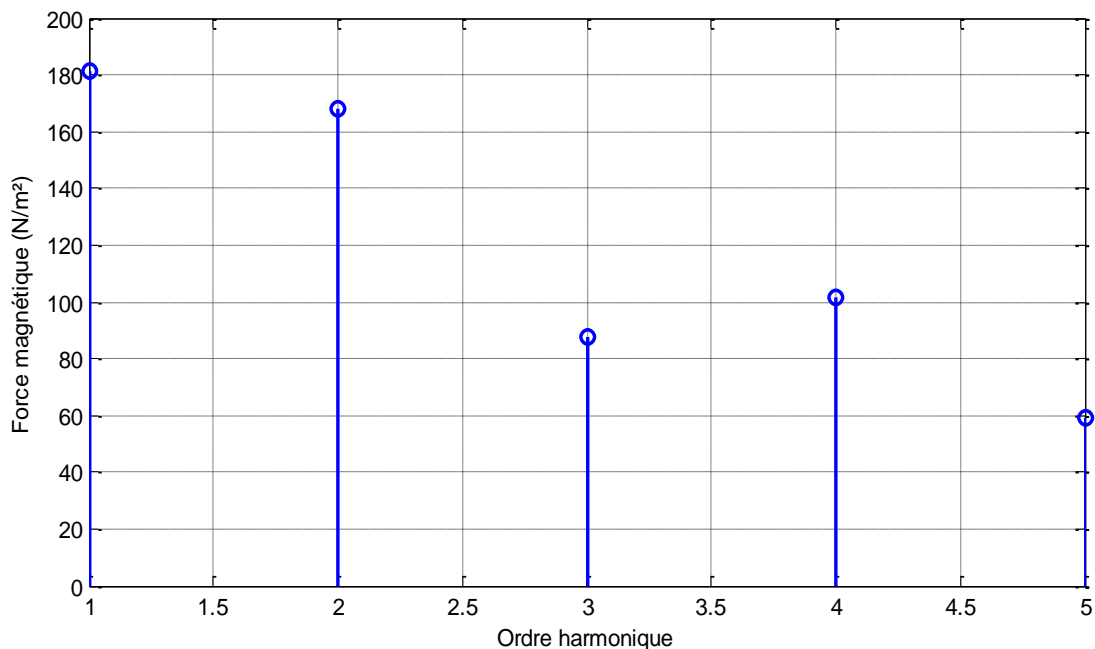


Figure IV.19. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence de défaut de désaimantation

Les deux figures ci-dessous présentent, respectivement, les spectres fréquentiels du déplacement et de l'accélération. Pour montrer l'influence du défaut de désaimantation, une superposition des deux spectres, en présence et en absence de défaut, a été effectuée.

Il est très bien clair, à partir de ces figures, qu'il y a une diminution dans les amplitudes du déplacement et de l'accélération en présence de défaut de désaimantation. Ceci se traduit par la perte d'une partie de l'excitation de la machine. Dans ce cas, on peut dire que la technique d'analyse vibratoire est très adéquate pour détecter le défaut de désaimantation.

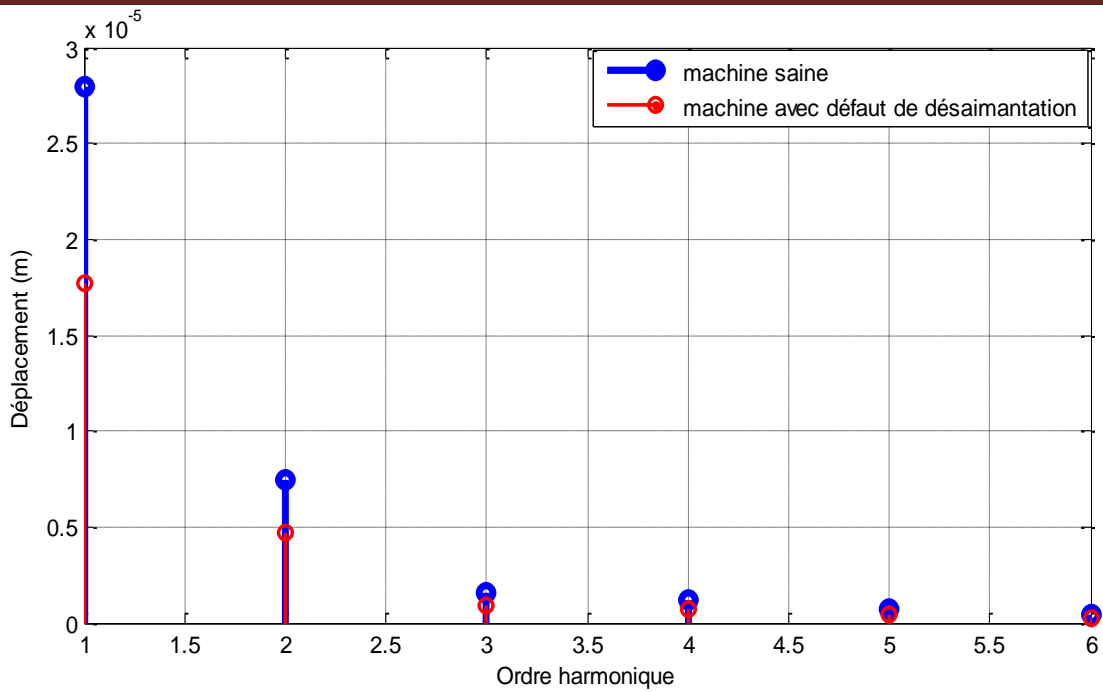


Figure IV.20. Spectres fréquentiels de déplacement en présence et en absence de défaut de désaimantation

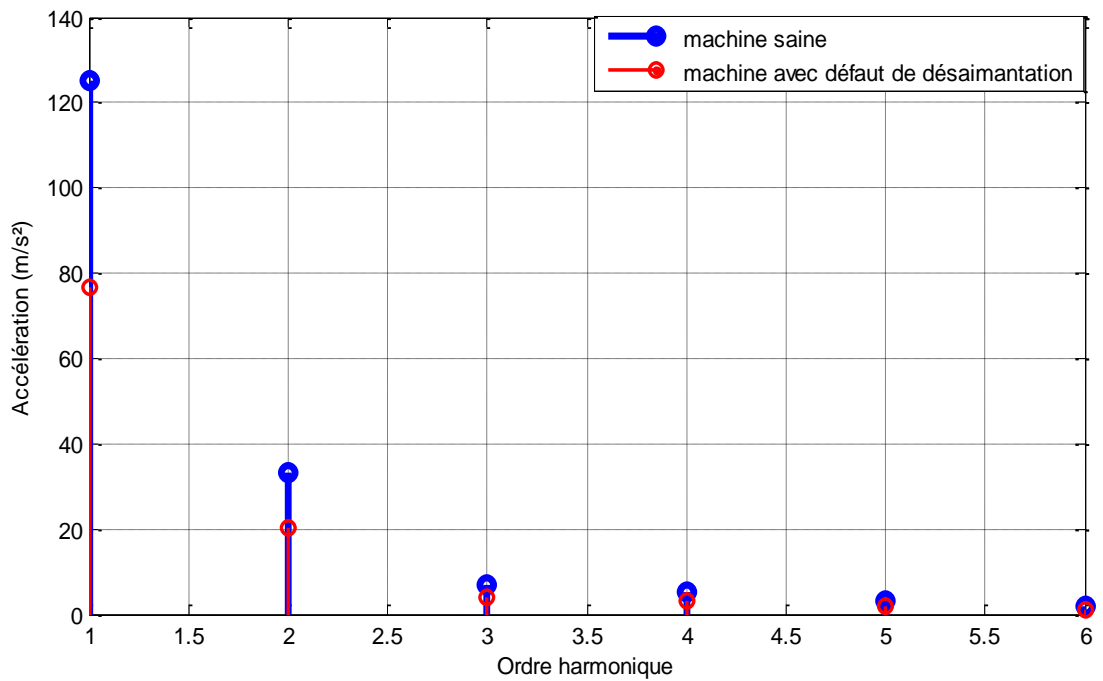


Figure IV.21. Spectres fréquentiels de l'accélération en présence et en absence de défaut de désaimantation

IV.4.4- défaut d'excentricité

Pour créer ce défaut, on a intervenu au niveau du dessin de la machine (paramètres géométriques). On a créé un décalage entre le centre du stator et celui de rotation de l'arbre. Donc, on a décalé le rotor, l'arbre et les aimants vers le haut.

Ce défaut peut modifier les comportements mécaniques et magnétiques de la machine. Le maillage éléments finis de la machine en présence de ce défaut est présenté dans la figure IV.22.

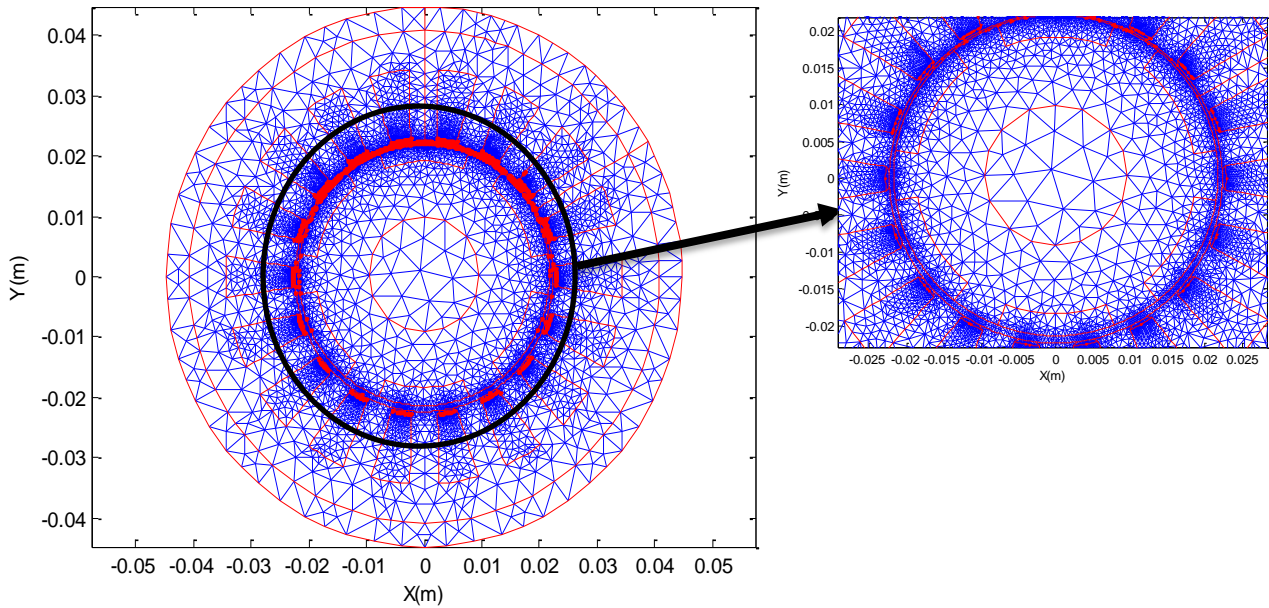
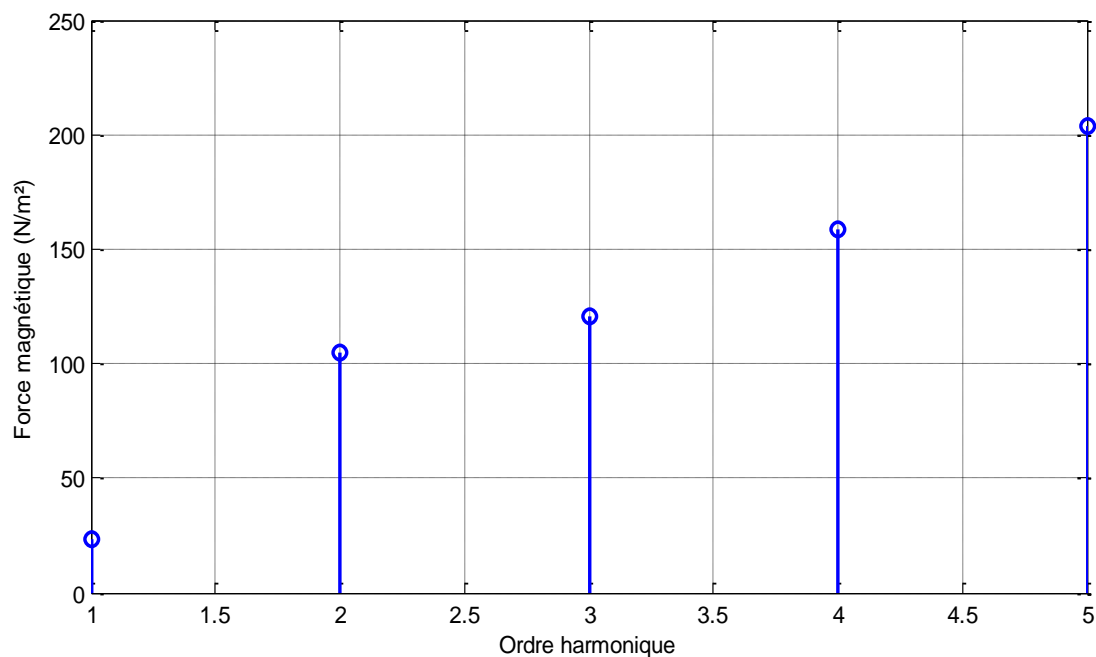


Figure IV.22. Maillage éléments finis de la MSAP en présence de défaut d'excentricité

La figure ci-dessous montre le spectre fréquentiel de la force magnétique en présence du défaut d'excentricité. On constate une augmentation des harmoniques d'ordre supérieur et une atténuation du fondamentale. Ce défaut perturbe la distribution de la force dans l'entrefer.



Figures IV.23. Spectre fréquentiel de la force magnétique en présence d'un défaut d'excentricité

Dans un souci de bien constater l'influence de la présence de défaut d'excentricité, une superposition des spectres du déplacement/accélération, obtenus dans les deux cas: machine saine et machine défectueuse, a été effectuée. A partir des figures IV.24 et IV.25, on peut bien remarquer le changement dans les spectres en présence de défaut d'excentricité. Donc, on peut conclure que ce type de défaut peut être détecté à partir du signal vibratoire.

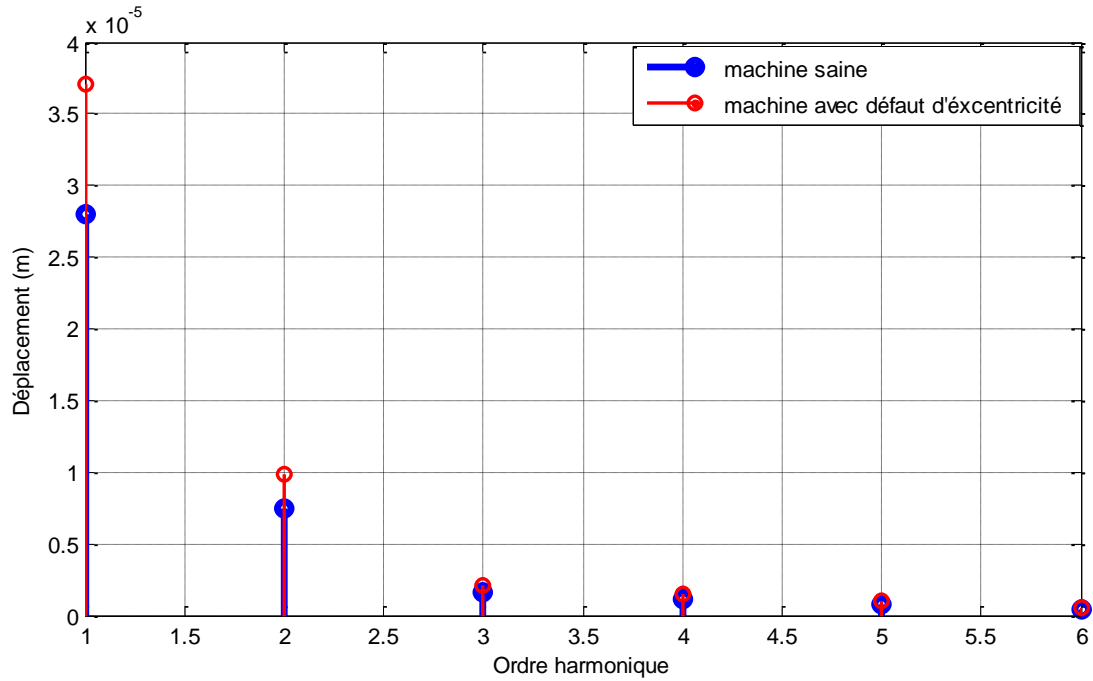


Figure IV.24. Spectre fréquentiel de déplacement en présence et en absence de défaut d'excentricité

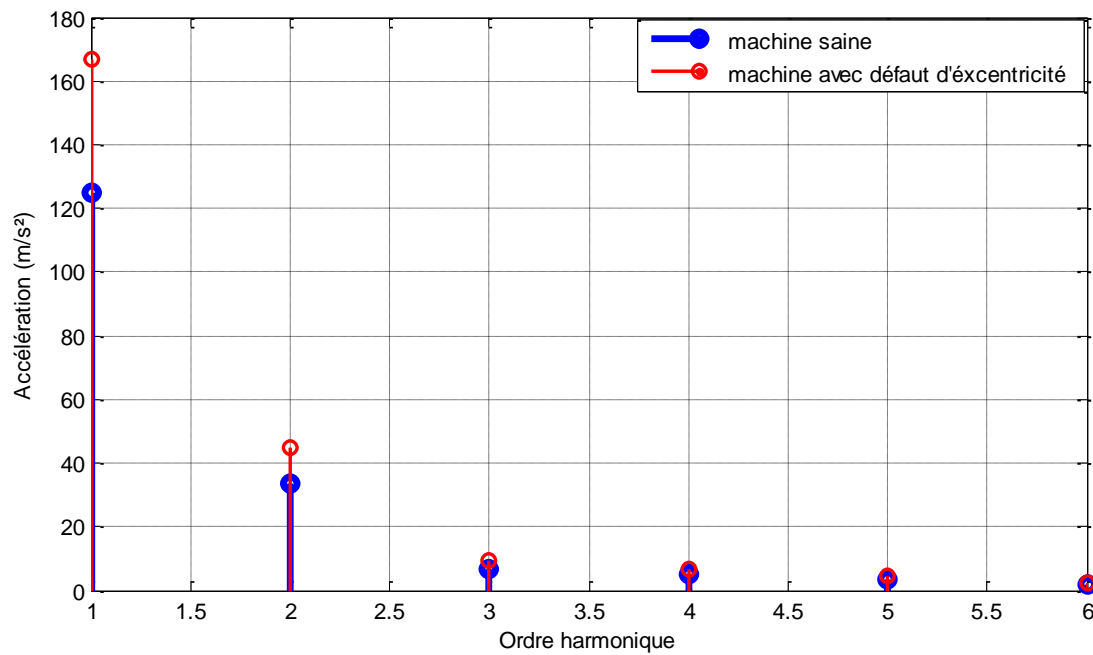


Figure IV.25. Spectre fréquentiel de l'accélération en présence et en absence de défaut d'excentricité

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'exploitation du code de calcul numérique développé pour la modélisation et le diagnostic d'une MSAP. La technique du diagnostic par analyse vibratoire est celle qui a été choisie pour détecter les différents défauts de cette machine.

Nous avons considéré quatre types de défauts: défaut de fissure dans le stator, défaut de court-circuit, défaut de désaimantation et défaut d'excentricité. Les résultats obtenus nous ont permis de bien conclure l'intérêt de la technique du diagnostic par analyse vibratoire pour la détection de ces types de défauts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans les applications industrielles pour leur efficacité énergétique et leur simplicité d'utilisation et exploitation. Les problèmes liés au vieillissement et aux défaillances de ce type d'actionneur prennent une plus large part dans les contraintes d'exploitation.

Ce travail de Master a visé la modélisation et le diagnostic des défaillances d'une machine synchrone à aimants permanents par analyse vibratoire. Le processus complet a été réalisé en bidimensionnel sous environnement MATLAB, en se basant sur la méthode des éléments finis.

Lors de la détermination des vibrations d'origine magnétique, la première étape indispensable est le calcul des forces magnétiques. Ceci bien sûr, après calcul de la distribution du champ magnétique dans la machine. Dans ce but, un code de calcul éléments finis a été exploité.

La deuxième étape qu'il faut effectuer, pour prédire le comportement vibratoire de la MSAP, est le calcul de sa réponse dynamique aux sollicitations des forces magnétiques. C'est dans ce but, que nous avons exploité un code de calcul mécanique, déjà développé, basé sur l'utilisation conjointe de la méthode de superposition modale et de celle des éléments finis. On a pu déterminer la réponse dynamique (déplacement et accélération) de n'importe quel point de l'ensemble stator-carcasse de la MSAP.

Quatre types de défauts ont été considérés: défaut de fissure, défaut de court-circuit, défaut de désaimantation des aimants et défaut d'excentricité. Une analyse spectrale (FFT) du déplacement/accélération, sur un contour passant par les dents statoriques, a été effectuée pour chacun de ces défauts. Dans un souci de montrer l'influence de la présence des défauts, une superposition des deux spectres, en présence et en absence de chacun de ces défauts, a été effectuée.

La technique de diagnostic des défauts par analyse vibratoire a bien montré son efficacité pour la détection des défauts électriques, physiques et mécaniques qui ont été considérés. Cette technique est donc très bien adaptée à ces types de défauts.

Comme perspectives, cette étude peut être élargie en considérant d'autres techniques de diagnostic telles que celles par analyse du flux axiale, par analyse de la température, par analyse des courants... De plus, d'autres types de défauts peuvent être considérés parmi lesquels on peut citer: défaut de roulements, défaut de rupture de barres dans les machines asynchrones et défaut de mouvement des enroulements.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Yahi Sara & Boufligha Souad, « modélisation et diagnostic des défaillances d'une MSAP par analyse de ses grandeurs électromagnétique », mémoire de master, Université de Jijel, 2019.
- [2] A. Belabbas, Ou.Tezkratt, « Etude du comportement d'une machine synchrone à aimants permanents à aimants enterrés avec aimantation en BDCM », Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, UMMTO, 2008.
- [3] A. Ameer, « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à mode glissants », Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2003.
- [4] S. Oubellil, D. Talah, « Control directe du couple d'une machine synchrone à aimants permanents », Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, UMMTO, 2008.
- [5] 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.
- [6] D. Fodorean, A. Miraoui, « Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) », D3554 Techniques de l'ingénieur, Novembre 2009.
- [7] Alameh, K, « Contribution au diagnostic et a l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents », Doctoral dissertation, 2017.
- [8] Senhadji Nawel & Chalabi Ammaria , « Commande du moteur synchrone a aimants permanents par backstepping » Mémoire de Master académique, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2014 -2015.
- [9] Tayabi Mohammed & Debdouche Mohammed , « Modélisation et diagnostic de la machine synchrone à aimants permanents en présence de défaut de court-circuit entre spires » Mémoire de Master académique, Université Akli Mohand OULHADJ, 2016.
- [10] S. Hamache, Dj.Ghemeri «Modélisation par éléments finis d'une machine synchrone à Aimant permanent », mémoire d'ingénieur à l'Université de Bejaia.
- [11] R. Lateb, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones à aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : Application à la propulsion marine par POD », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.

-
- [12] "Rare-Earth permanent magnets acodym– vacomax", brochure commercial, société Vaccuumschmelze, 2012.
- [13] G.Lacroux, «les aimants permanents», technique et documentation-Lavoisier, 1989.
- [14] T .Wildi et G.Sybille, «électrotechnique » ,4eme édition de Boeck, 2005.
- [15] F.Leprince-Ringuet, « aimants permanents, matériaux et applications », Technique de l'ingénieur, traité de génie électrique Doc D2100.
- [16] B.Boukais, «analyse des performances statiques et dynamiques de deux BDCM de faibles puissances ». Mémoire de magister, UMMTO, 2001.
- [17] A.CEBAN, « Méthode globale de diagnostic des machines électriques », thèse de doctorat, Université d'Artois, 2012.
- [18] B. Boussad, « Contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines a aimants permanents (BDCM-PMSM) », thèse de doctorat de l'université de Tizi-Ouzou ,21/02/2012.
- [19] Andrian Ceban « Méthode Globale De Diagnostic Des Machines Electriques », thèse de doctorat, Université Lille de Nord de France – École doctorale SPI ,2012.
- [20] A. H. Bonnett, G. C. Soukup, « Cause and analysis of stator and rotor failures in three phase squirrel cage induction motors», IEEE transactions on industry applications, Vol.28 no.4, pp 921-937, Aug 1992.
- [21] Macamo Bernardo Amizado & Maiga Djibril, «Diagnostic des défauts statoriques d'un moteur synchrone à aimant permanent », mémoire de master, Université Saad Dahlab De Blida, 2017.
- [22] M.B.Aubert, « Détection des courts-circuits inter-spores dans les générateurs synchrones a aimants permanents : méthodes basées modelés et filtre de kalman étendu », thèse de doctorat de l'université de Toulouse (Institut National Polytechnique), le 31 mars 2014.
- [23] Kawthar Alameh, Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents, thèse de doctorat, Normandie Université, 2017.
- [24] Nezar Malika, « diagnostic des associations convertisseurs statiques - machines a synchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse Doctorat de l'Université de Batna, 2006.
- [25] Boulenger A, Pachaud C : « Aide mémoire : Surveillance des machines par analyse des vibrations ». Edition Dunod, Paris 2009.
-

-
- [26] Yassa Nacera, « Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter- spires et des cassures de barres et d’anneaux ». Thèse de Master. Université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 09 mai 2009.
- [27] M. Nezar, « Diagnostic des associations convertisseurs statiques – machine a synchrones en utilisant les techniques de l’intelligence artificielle », thèse doctorat de l’Université de Batna, 2006.
- [28] Bui Viet Phuong, « Diagnostic des machines électriques par l’analyse du champ magnétique de fuite application a l’identification de défauts rotoriques d’un alternateur à vide. » Thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 2007.
- [29] D. Thailly, « Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic », thèse de doctorat, laboratoire systèmes électrotechniques et environnement (LSEE), Université d’Artois, Béthune, France, 2007.
- [30] R. Bousseksou, « Modélisation analytique des machines asynchrones application au diagnostic », thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [31] F. Babaa , « Modélisation et diagnostic des machines asynchrones : Application à la détection de défaut », Université Mentourie Constantine.
- [32] R. Casimir, « Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes », thèse de doctorat, Ecole Central de Lyon, 2003.
- [33] Y. Saker, « Commande vectorielle d’une machine asynchrone avec défaut », thèse magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2012.
- [34] M. Sahraoui, « Contribution au diagnostic d'une machine asynchrone triphasée à cage », thèse magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2003.
- [35] W. T. Thomson, « A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrelcage induction motors–past », present and future in 2nd IEEE international Symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives - Sdemped 99, Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.
- [36] F. Zidat, J.-P. Lecoite, F. Morganti, J.-F. Brudny, T. Jacq, and F. Streiff, « Non invasive sensors for monitoring the efficiency of AC electrical rotating machines », Sensors, vol. 10, pp. 7874-7895, 2010.
- [37] M. Sahraoui, « Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones », thèse de doctorat, Université de Biskra, Déc. 2010.

-
- [38] Leroy sommer guide d'utilisation, « Moteurs asynchrones triphasés ouverts installation et maintenance », http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/2197_fr.pdf.
- [39] M. Eftekhari, M. Moallem, S. Sadri, Min-Fu Hsieh, « A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging », *infrared physics & technology*, 61 (2013) 330–336.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] M. Bazi Smail, « Contribution à la détection et au diagnostic des défaut dans un système machine à induction-convertisseur », thèse de doctorat, Université de Batna, 2016.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] S. Rao, «Engineering optimisation, Theory and practice» John Wiley &sons, New York, 1996.
- [47] A. Fedsi, A. Tioune, «optimisation de forme d'une machine à reluctance variable», mémoire d'ingénieur, Université de Jijel, 2008.
- [48] Dounia Chikhi & Saida Menghour, « Conception Optimale d'une MSAP à Aimantation Radiale en vue de Réduire son Comportement Vibratoire », mémoire de master, Université de Jijel, 2020.
- [49] C. Labiod, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de magister, Université de Biskra, 12/05/2014.
- [50] C. Sabonnadiere, L. COULOMB, «Calcul des champs électromagnétiques», technique de l'ingénieur D 3020.

- [51] A. Chentouf « Contribution à la modélisation électrique, magnétique et thermique d'un applicateur de plasma inductif haute fréquence », thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1994.
- [52] P. Mas, « Modélisation en électromagnétisme », étude technique, Janvier 1992.
- [53] S. Bourouaih . M. Hala, «Etude de l'influence de l'emplacement des aimants dans le rotor sur le comportement vibratoire d'une MSAP à flux radial», mémoire de fin d'étude, Université de Jijel, 2016.
- [54] C. Golovanov, «Développement de formulation éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement», thèse du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 1997.
- [55] A. Ameer, «Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants », thèse Magister, Université de Batna, 2005.
- [56] M. Zaouia, «modélisation Numérique du Couplage Electromagnétique Mécanique dans les Structures Linéaires Tubulaires » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammerri de Tizi Ouzou, 2013.
- [57] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, «Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters», IEEE transactions on industrial electronics, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.
- [58] Safia Ferkha & Zineb Belkhelfa, « Modélisation et diagnostic des défaillances d'une MAS par analyse des grandeurs électromagnétiques », mémoire de master, Université de Jijel, 2018.
- [59] N. Hacib née Ferkha, « modélisation dynamique et conception optimale d'une machine électrique en vue de la réduction des phénomènes vibratoires », Thèse de docteur, Université de Jijel, 2012.

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. اخترنا تقنية التشخيص عن طريق تحليل الاهتزاز بناء على طريقة العناصر المنتهية في بيئة ماتلاب, اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية التقنية المختارة لكشف الأعطال المختلفة (ميكانيكية وكهربائية)

كلمات مفتاحية: الآلة المتزامنة ذات المغناطيس الدائم , تشخيص , اعطاب , تحليل اهتزاز , نمذجة

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 choisi la technique du diagnostic par analyse vibratoire en se basant sur la méthode des éléments finis dans l'environnement MATLAB. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la technique choisit pour la détection de divers défauts (mécaniques et électriques).

Mots clés : machine synchrone à aimants permanents, diagnostic, défauts, analyse vibratoire, modélisation.

Summary

This memoir deals the diagnostic of defaults as well as the different methods and techniques used for their detection in electrical machines, in particular synchronous machines with permanent magnets. We have chosen the technique of diagnostic by vibrations analysis based on 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).

Keywords : permanent magnets synchronous machine, diagnostic, defaults, vibrations analysis, modeling.