

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° :...../2024

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Scienceset Technologies

FILIERE: ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE: ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

Contrôle non destructif d'une machine électrique par analyse vibratoire

Présenté Par :Encadré Par :

✎ FennekNessrineNassira- Hacib- Ferkha

✎ BelmedrekChaima

Date de soutenance: 1/07/2024

Jury de Soutenance

Président :M^{me}Z.Belli-BoulasselGrade : Professeur UnivMSB Jijel

Encadreur :M^{me}N.Hacib-FerkhaGrade : MCBUniv MSB Jijel

Examineur :M^{me}I. Boutana-Hafsaoui Grade :MCAUniv MSB Jijel

Promotion :2023 /2024



Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans

l'aide et l'encadrement de

M^{me} Ferkha Hacib Nassira. on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

On adresse également nous sincères remerciements à l'ensemble du département d'électrotechnique.





Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère

Mes frères et ma sœur

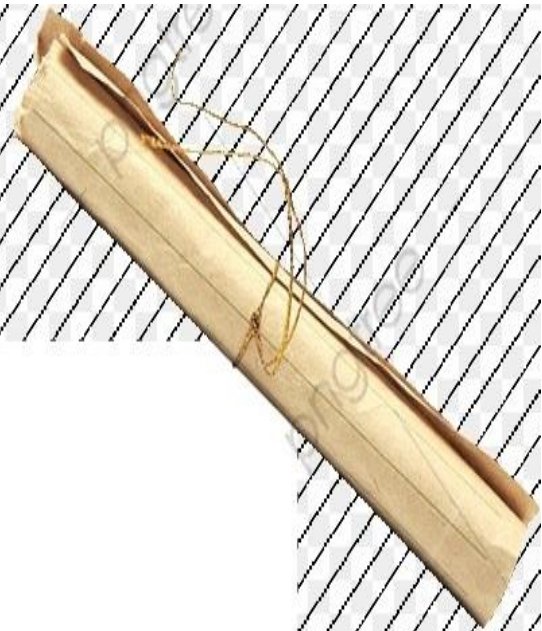
Tous mes proches

Tous mes amis

Toute la promotion 2024 d'électrotechnique.



Nessrine



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon père et ma mère.

A mon fiancé "Raouf" qui m'a aidé

et supporté dans les moments difficiles.

Toutes ma famille.

Tous mes amis.

Chaima



Liste des matières

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif

I.1. Introduction	4
I.2. Principe du Contrôle Non Destructif.....	4
I.2.1. Rapidité d'exécution	5
I.2.2. Coût	5
I.2.3. Reproductibilité.....	5
I.2.4. Fiabilité	5
I.2.5. Sensibilité	5
I.2.6. Résolution	5
I.3. Domaines d'applications.....	5
I.4. Principe de détection d'un défaut	6
I.5. Différents défauts détectés en CND	6
I.5.1. Défauts surfaciques	7
I.5.2. Défauts internes	7
I.6. Méthodes de contrôle non destructif	7
I.6.1. Examen visuel.....	8
I.6.2. Contrôle par ressuage.....	9
I.6.3. Radiographie.....	11
I.6.4. Magnétoscopie	12
I.6.5. Contrôle par courants de Foucault.....	14
I.6.6. Ultrasons	16
I.6.7. Contrôle par laser	17
I.6.8. Contrôle par analyse vibratoire	18
I.7. Conclusion	19

Chapitre II

Etat de l'art sur les défauts dans les machines à courant alternatif

II.1. Introduction	21
II.2. Etudes statistiques sur les défauts dans les machines électriques.....	21
II.3. Causes des défauts dans les machines électriques.....	23
II.4. Présentation de quelques défauts des machines électriques	23

II.4.1. Machine synchrone à aimants permanents	24
II.4.2. Défauts de la MSAP	26
II.4.2.1. Défauts du rotor	26
II.4.2.2. Défauts du stator	30
II.5. Conclusion.....	32

Chapitre III

Calcul vibratoire pour le CND d'une machine électrique

III.1. Introduction.....	34
III.2. Procédure du CND par analyse vibratoire	34
III.3. Calcul du champ électromagnétique.....	35
III.3.1. Equations de Maxwell	35
III.3.3. Formulation magnétodynamique	37
III.3.3.1. Formulation en potentiel vecteur magnétique A	39
III.3.3.2. Conditions de passage entre deux milieux différents	40
III.3.4. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles	41
III.3.4.1. Méthodes analytiques	41
III.3.4.2. Méthodes semi-analytiques	41
III.3.4.3. Méthodes numériques.....	42
III.4. Calcul des forces magnétiques	44
III.5. Calcul des vibrations: déplacements/accélérations	45
III.6. Conclusion	48

Chapitre IV

Exploitation des modèles développés en vue du CND d'une MSAP

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Présentation de la machine à étudier	50
IV.3. Quel est le but de cette étude?.....	51
IV.4. Calcul des vibrations du moteur à étudier	52
IV.5. Caractérisation des défauts de la MSAP	57
IV.5.1. Caractérisation de défauts de fissure dans les aimants.....	58
IV.5.1.1. Cas d'une seule fissure dans un aimant	58
IV.5.1.2. Cas de deux fissures dans deux aimants	60
IV.5.2. Caractérisation de défauts de désaimantation des aimants et de déséquilibre de phases...	63
IV.6. Conclusion	65
Conclusion générale	67
Références.....	70

List des Figures

N°	Thème	Page
Figure I.1	Synoptique schématisé du contrôle non destructif	4
Figure I.2	Exemple de contrôle visuel	8
Figure I.3	Exemple de contrôle par ressuage	9
Figure I.4	Principe de CND par ressuage	10
Figure I.5	Exemple de contrôle par radiographie	11
Figure I.6	Principe de contrôle par radiographie	12
Figure I.7	Exemple de la magnétoscopie	13
Figure I.8	Principe de la magnétoscopie	13
Figure I.9	Principe du CND par courants de Foucault	14
Figure I.10	Principe des Ultrasons	16
Figure I.11	Principe du contrôle par laser	17
Figure I.12	Principe de l'analyse vibratoire	19
Figure II.1	Répartition des défauts dans une machine électrique	22
Figure II.2	Répartition des causes de défaillances des machines électriques	22
Figure II.3	Schéma d'un bobinage statorique régulier	25
Figure II.4	Différentes structures rotoriques pour une MSAP	25
Figure II.5	Types d'excentricité: a) statique, b) dynamique, c) mixte	27
Figure II.6	Roulement à billes éclaté	28
Figure II.7	Point limité de désaimantation réversible	29
Figure II.8	Evolution de l'aimantation rémanente avec la température	29
Figure I.9	Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques	31
Figure III.1	Procédure du CND par analyse vibratoire	34
Figure III.2	Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique	37
Figure III.3	Diagramme de Toni	38
Figure III.4	Domaine d'étude avec deux milieux différents M_1 et M_2	40
Figure III.5	Éléments classiques en une et deux dimensions	43
Figure III.6	Représentation des conditions aux limites d'un problème mécanique	46
Figure III.7	Cycle génétique	48
Figure IV.1	Configuration géométrique de la MSAP à étudier	51
Figure IV.2	Différentes étapes du code de calcul magnéto-mécanique appliqué	54
Figure IV.3	Maillage élément finis adapté à cette étude	55
Figure IV.4	Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique	55
Figure IV.5	Evolution de la force magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques	56
Figure IV.6	Spectre fréquentiel de la force magnétique	56
Figure IV.7	Déplacement obtenu sur la surface externe de la machine	57
Figure. IV.8	Accélération obtenue sur la surface externe de la machine	57
Figure. IV.9	Maillage de la MSAP en présence de défaut d'une seule fissure	58
Figure. IV.10	Fonction objectif dans le cas d'une seule fissure	59

Figure. IV.11	Présentation des déplacements calculé et mesuré	60
Figure. IV.12	Géométrie de la machine avec le défaut caractérisé	60
Figure. IV.13	Maillage de la MSAP en présence de défaut de deux fissures	61
Figure. IV.14	Fonction objectif dans le cas de deux fissures	61
Figure IV.15	Déplacements calculer et mesurer en présence de défaut de fissure dans deux aimants	62
Figure IV.16	Géométrie de lamachine en présence de défaut de fissure dans deux aimants	62
Figure IV.17	Fonction objectif pour la caractérisation de défauts de déséquilibre de phases et de désaimantation	64
Figure IV.18	Déplacements calculer et mesurer en présence de défauts de déséquilibre de phases et de désaimantation	64

Liste des tableaux

N°	Thème	Page
Tableau II.1	Défauts des machines électriques selon leurs origines	23
Tableau IV.1	Caractéristiques de la MSAP à étudier	53
Tableau IV.2	Caractéristiques mécaniques du stator et de la carcasse	53
Tableau IV.3	Paramètres obtenus du défaut	60
Tableau IV.4	Paramètres obtenus des deux fissures	63
Tableau IV.5	Paramètres obtenus des défauts	65

Introduction générale

Introduction générale

Le diagnostic ainsi que le Contrôle Non Destructif (CND) des défauts dans les machines électriques ont pris une place importante, au cours des dernières années, 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 des machines dans de nombreuses applications critiques telles que: l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, la robotique et le médical.

Le CND joue un rôle crucial dans le contrôle de qualité des machines électriques que ce soit en cours de fabrication ou d'utilisation, lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection de défauts. Il englobe un ensemble de techniques visant à inspecter les défauts de ces machines. Ces techniques sont largement employées dans divers secteurs tels que l'aéronautique, l'automobile, l'industrie pétrolière et le nucléaire [1].

Il existe plusieurs méthodes de CND tel que la méthode de ressuage, la magnétoscopie, la radiographie, les ultrasons, les courants de Foucault, l'analyse vibratoire et l'examen visuel. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à la méthode d'analyse vibratoire dont l'application dans le domaine du CND est récente.

En ces dernières années les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont utilisées de plus en plus dans les applications industrielles comme: l'automobile, l'aéronautique, la robotique ou encore le transport ferroviaire. Ceci oriente de plus en plus les chercheurs et les industriels à chercher des techniques de CND fiables, précises et rapides pour assurer la continuité de service de ces machines. Dans ce travail, nous nous intéressons au CND par analyse vibratoire d'une MSAP dans un souci de caractériser les défauts de fissure et de désaimantation des aimants permanents. Dans ce but, on va diviser cet mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre va être consacré à la présentation du principe et des méthodes du CND. De plus, on va présenter ses domaines d'application ainsi que les différents défauts détectés en CND.

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

Le troisième chapitre vise la présentation de la procédure du CND par analyse vibratoire. Tout d'abord, une présentation des différentes formulations permettant de traduire le comportement de tous les systèmes électromagnétiques va être effectuée. Ensuite, on va présenter les différentes méthodes de résolution de ces formulations. Enfin, on va donner un aperçu sur la méthode choisie pour le calcul des forces électromagnétiques et celles utilisées pour le calcul de la réponse dynamique d'une structure en visant la méthode suivie pour la caractérisation des défauts.

Dans le dernier chapitre, on va exploiter les modèles numériques développés sous environnement MATLAB pour la caractérisation des défauts d'une MSAP.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I
***Généralités sur le contrôle
non destructif***

Chapitre I

Généralités sur le contrôle non destructif

I.1. Introduction

L'histoire des essais non destructifs commence avec celle de la physique moderne à la fin du XIXe siècle. Le contrôle non destructif CND est très répandu en milieu industriel en particulier, l'industrie pétrolière, nucléaire, et automobile. Ceci vu la gravité des conséquences par exemple d'une rupture d'une tige en cours de forage, ou d'un tube de cuvelage ou de production.

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu sur le principe ainsi que les méthodes du CND. De plus, on va présenter ses domaines d'application ainsi que les différents défauts détectés en CND.

I.2. Principe du Contrôle Non Destructif

Le principe général d'un contrôle non destructif est présenté dans la figure ci-dessous. La cible à analyser se caractérise par un ensemble de paramètres que l'on va chercher à estimer afin de former un diagnostic d'intégrité. La mise en œuvre d'un système CND adéquat va permettre de produire un certain nombre de signaux qui sont fonction des paramètres recherchés. Une étape d'inversion, plus ou moins compliquée, est bien souvent nécessaire afin de retrouver les paramètres initiaux de la pièce [2].

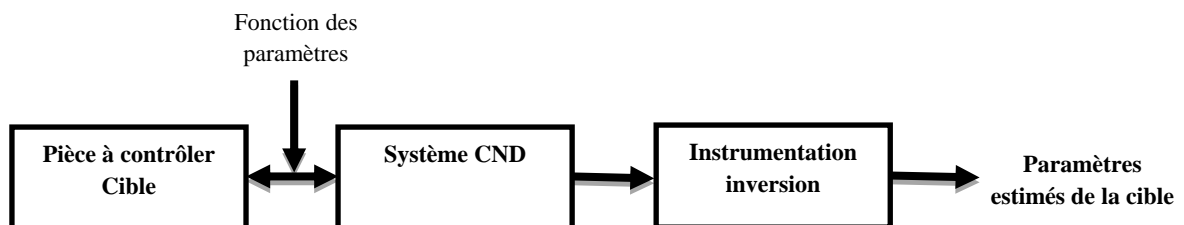


Figure I.1. Synoptique schématisé du contrôle non destructif

Le CND a pour objectif comme son nom l'indique de contrôler l'état des pièces industrielles les sens pour que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future.

Ceci peut correspondre à deux types de contrôles: l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce et le deuxième cas s'agit en général de défauts. Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères cités ci-dessous [3].

I.2.1. Rapidité d'exécution

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

I.2.2. Coût

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

I.2.3. Reproductibilité

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures: une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

I.2.4. Fiabilité

Le contrôle doit remplir son cahier de charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

I.2.5. Sensibilité

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurant. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurant sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

I.2.6. Résolution

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut.

Parmi ces six critères, il est naturel de penser que la rapidité, la reproductibilité et la sensibilité sont respectivement fortement liées au coût, à la fiabilité et à la résolution. Il est très souvent nécessaire de consentir à des compromis entre les trois groupes ainsi définis.

I.3. Domaines d'applications

Le contrôle non destructif est utilisé dans différents secteurs industriels produisant des pièces à coût de production élevés en quantité et en qualité faible, et des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique. On citera ci-dessous quelques domaines [4].

- L'industrie de l'automobile,

- L'industrie pétrolière,
- L'aérospatiale,
- Le génie civil et le bâtiment,
- La chaudronnière,
- L'inspection alimentaire,
- La ferroviaire,
- L'industrie de l'énergie,
- L'archéologie,
- L'aéronautique (ailes d'avion, pièce moteurs...).

I.4. Principe de détection d'un défaut

Les méthodes de contrôles non destructifs sont fondées sur la déformation du champ d'une grandeur physique par une discontinuité. On exploite donc un phénomène physique pour détecter la présence d'une hétérogénéité dans un matériau (à l'exception des procédés visuels directs qui échappent à cette règle). Les principes physiques comme l'atténuation, réflexion ou diffraction des ultrasons, atténuation ou diffraction des rayons X ou γ , perturbation des courants de Foucault...sont à la base des essais non destructifs, ils peuvent servir à caractériser les matériaux (gros grain, anisotropie, dureté, état de contraintes, fissures surfacique ou en profondeur...) [5].

Cependant, par essais non destructifs END, on sous-entend presque toujours qu'il s'agit non pas d'une simple mesure d'une grandeur physique, mais d'un contrôle d'homogénéité.

Les techniques de CND diffèrent par l'énergie employée, énergie mécanique (ultrasons, ressuage), électromagnétique (radioscopie, flux magnétique...)..., mais ils sont caractérisés par les étapes suivantes:

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique,
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts,
- Détection de ces modifications par un capteur approprié,
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée.

I.5. Différents défauts détectés en CND

Un défaut (défectuosité) détecté dans une pièce, c'est physiquement, mettre en évidence une hétérogénéité de matière, une variation locale de propriétés physiques ou chimiques préjudiciable au bon emploi de celle-ci. Généralement, les défauts sont classés en deux grandes catégories liées à leur emplacement: les défauts de surface et les défauts internes [6].

I.5.1. Défauts surfaciques

Ces défauts sont accessibles à l'observateur directement mais pas toujours visibles à l'œil nu, à cet effet on peut les classés en deux types distincts:

➤ **Les défauts ponctuels**

Correspondent aux défauts les plus nocifs sur le plan technologique, puisqu'il s'agit des criques, piqûres, fissures, craquelures, généralement aptes à provoquer à terme la rupture de la pièce, en initiant par exemple des fissures de fatigue. Dans les pièces métalliques, l'épaisseur de ces fissures est souvent infime (de l'ordre de quelques μm) et elles peuvent être nocives dès que leur profondeur dépasse quelques dixièmes de millimètre, ce qui implique l'emploi pour leur détection des méthodes sensibles et non destructives, telles que le ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault et les ultrasons.

➤ **Les défauts d'aspects**

C'est à dire à des plages dans lesquelles une variation des paramètres géométriques ou physiques (rugosité, surépaisseur, taches diverses) attire le regard et rend le produit inutilisable. Ici, le contrôle visuel est possible, mais on cherche souvent à le remplacer par des contrôles optiques automatiques.

I.5.2. Défauts internes

Ils sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler. Leur nomenclature est très étoffée et spécifique à chaque branche d'activité technologique et industrielle. Dans les industries des métaux, il s'agira de criques internes, de porosités, de soufflures, d'inclusions diverses susceptibles d'affecter la santé des pièces moulées, forgées, laminées, soudées. Dans d'autres cas, il s'agira simplement de la présence d'un corps étranger au sein d'une enceinte ou d'un produit emballé. Ici le contrôle visuel est généralement exclu et l'on utilisera donc l'un ou l'autre des grands procédés du CND que sont la radiographie, le sondage ultrasonore ou encore des techniques mieux adaptées à certains cas comme l'émission acoustique, holographie, l'imagerie infrarouge et la neutronographie.

I.6. Méthodes de contrôle non destructif

Plusieurs techniques de contrôle non destructif sont utilisées selon le niveau technologique utilisé et les moyens appropriés pour une bonne inspection [7].

Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. On ne vise pas ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le

domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

Certains de ces techniques sont liées spécifiquement aux contrôles et à la recherche de défaut comme la méthode de ressuage et la magnétoscopie ou même la radiographie. D'autres méthodes ont plus de qualité et un large champ d'application comme les ultrasons ou les courants de Foucault, utilisées pour la détection et l'identification des défauts [7] [8].

I.6.1. Examen visuel

Il s'agit de rechercher visuellement les défauts. Il peut être effectué directement par un agent qualifié ou à l'aide d'un outil comme une loupe, une caméra...etc. On peut citer le ressuage qui permet de révéler les défauts de surface d'une pièce (figure I.2).



Figure I.2. Exemple de contrôle visuel

Cette méthode comporte trois étapes essentielles: premièrement l'application d'un fluide pénétrant, puis on élimine l'excès du pénétrant sur la surface, et enfin on applique une couche d'un fluide révélateur sur la surface de la pièce. La réaction du révélateur sur le pénétrant conduit à une variation de couleur/luminance, ce qui facilite le repérage des défauts. Ce contrôle est applicable pour tous les matériaux [9].

I.6.1.1. Avantages et inconvénients de l'examen visuel

L'examen visuel a quelques avantages et inconvénients qui sont cités ci-dessous [10].

a) Avantages

- Examen simple, rapide et peu coûteux,
- Souplesse d'inspection.

b) Inconvénients

- Détection limitée aux défauts visibles,
- La surface doit être propre,

- Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée,
- Résolution et sensibilité limitées.

I.6.2. Contrôle par ressuage

C'est une technique optico-chimique simple encore largement utilisée de nos jours, car très performante pour la détection de fissures de surface. Il consiste à enduire les surfaces à contrôler avec un liquide réactif qui s'introduit dans les fissures de surface et à relever ensuite leur présence grâce à un produit révélateur approprié (figure I.3). Il est applicable à toutes sortes de matériaux non-poreux et non-rugueux, il est relativement simple à mettre en œuvre et permet d'apprécier la longueur des fissures, quelle que soit leur orientation [11].



Figure I.3. Exemple de contrôle par ressuage

Le principe de CND par ressuage est présenté dans la figure I.4. Les différentes étapes à suivre sont:

- Nettoyage, à l'aide d'un chiffon,
- Application d'un produit coloré qui pénètre dans le défaut par capillarité,
- Elimination de l'excès: c'est une étape extrêmement délicate qui consiste à se débarrasser de l'excès de pénétrant. Il faudra prendre des précautions lors du rinçage,
- Application d'un révélateur (constitué d'une poudre blanche très fine qu'on pulvérise sur la surface de l'échantillon) à travers lequel le pénétrant diffuse et on observe les différentes taches résultantes sous un éclairage adapté.

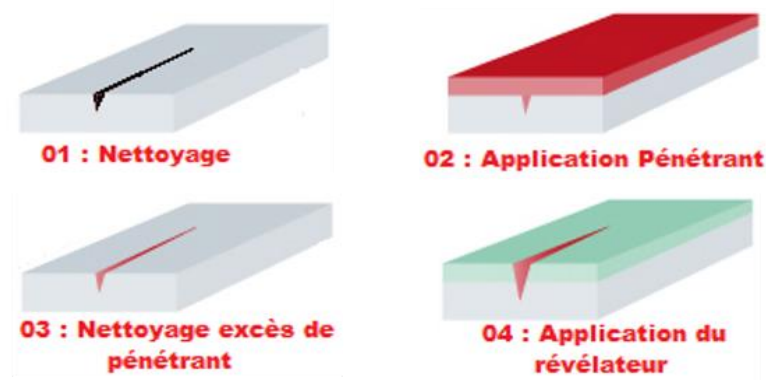


Figure I.4. Principe de CND par ressuage

Le domaine d'application du ressuage est très vaste, car le procédé est simple d'emploi et permet de détecter la plupart des défauts débouchant en surface sur les matériaux métalliques non poreux, ainsi que sur les autres matériaux, à condition toutefois qu'ils ne réagissent pas chimiquement ou physiquement avec le pénétrant. Le ressuage est une méthode que l'on peut utiliser à la fois pour le contrôle de pièces de sécurité en petite ou moyenne série et en contrôle de pièces à l'unité, au cours de leur fabrication ou au cours des opérations de maintenance [12].

I.6.2.1. Avantages et inconvénients du contrôle par ressuage

Les avantages ainsi que les inconvénients du contrôle par ressuage sont [13]:

a) Avantages

- Mise en œuvre relativement simple,
- Prix modique dans une application manuelle,
- Procédé de contrôle économique,
- Procédé de contrôle relativement rapide,
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant avec appréciation de leur longueur,
- Détection possible de petit défaut,
- Procédé insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface,
- Utilisable sur les matériaux amagnétiques à l'inverse de la magnétoscopie,
- Possibilité d'automatisation du procédé.

b) Inconvénients

- Interprétation délicate,
- Pas d'appréciation des défauts en profondeur,
- Pas de détection de défauts internes,

- Non utilisable dans les matériaux poreux,
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout,
- Problèmes d'hygiène et de sécurité à cause des produits polluants utilisés d'autant que dans certains cas (centrales nucléaires).

I.6.3. Radiographie

Le contrôle par radiographie consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement ionisant (rayons X ou γ) et à recueillir le signal atténué sur un récepteur (film photographique ou capteur électronique) qui convertit ce rayonnement en une image visible. Les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé (figure I.5).



Figure I.5. Exemple de contrôle par radiographie

Ce contrôle peut s'appliquer à de très nombreux types de matériaux pour mettre en évidence et dimensionner des hétérogénéités telles que des porosités, des soufflures, des amas d'inclusions, des criques, des fissures, des manques de pénétration en soudure..., au stade de la production ou en maintenance. Les défauts se présentant perpendiculairement à la direction du faisceau sont plus difficilement détectables [14].

Le principe de ce contrôle est présenté dans la figure ci-dessous. La radiographie peut être décrite comme étant un examen qui utilise un faisceau de radiations électromagnétiques pénétrantes dirigé vers la pièce à inspecter. Suivant la nature et la géométrie de la pièce, une portion du faisceau est absorbée et/ou déviée. En créant une image à partir de l'intensité de la radiation derrière la pièce, des variations d'intensité sont donc observées. Ces variations correspondent à l'ombrage produit par les différentes structures (internes et externes) de la pièce inspectée [15].

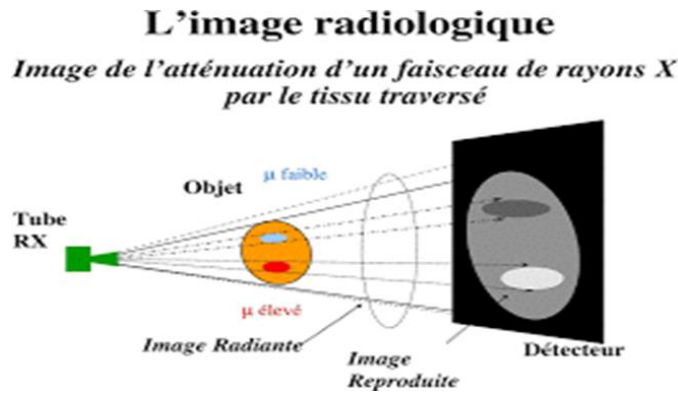


Figure I.6. Principe de contrôle par radiographie

I.6.3.1. Avantages et inconvénients du contrôle par radiographie

Les avantages ainsi que les inconvénients de la radiographie sont comme suit [4]:

a) Avantages

- Fournir une image constituant directement un document archivable du contrôle montrant l'absence présumée ou la présence d'un défaut dont on peut éventuellement apprécier,
- Les sources radioactives ne nécessitent aucun courant électrique, aucun système de refroidissement, ce qui facilite l'emploi sur chantiers,
- Garantir, dans une certaine mesure, la fiabilité de l'examen et le respect des procédures.

b) Inconvénients

- L'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurités pour l'opérateur et l'environnement,
- La nécessité de mettre en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel,
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau,
- La faible productivité alliée à un coût élevé lorsqu'il s'agit de faire de multiples examens systématiques avec films.

I.6.4. Magnétoscopie

La présence d'un entrefer dans un circuit magnétique entraîne un fort accroissement local de la reluctance du circuit et donc de la différence de potentiel magnétique, constituant ainsi un obstacle au flux magnétique. Ce phénomène est à la base d'un procédé de détection des défauts dans les aciers dit magnétoscopie. Dans la phase du contrôle, on observe visuellement

une accumulation de poudre de fer. En magnétoscopie, on recueille la trace magnétique du flux sur un film, une bande ou une pâte d'empreinte magnétisable. La figure ci-dessous montre un exemple de la magnétoscopie.

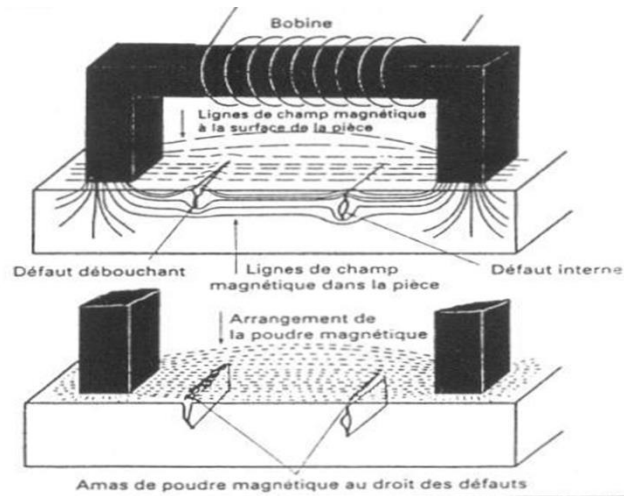


Figure I.7. Exemple de la magnétoscopie

Le contrôle magnétoscopique permet de détecter des défauts débouchant et sous-jacents sous la surface des matériaux métalliques ferromagnétiques (les aciers inoxydables, les alliages de cuivre et les alliages d'aluminium sont exclus de cette application). Un champ magnétique important (>2400 A/m) traverse la pièce à contrôler jusqu'à saturation magnétique avec l'application simultanée en surface d'une liqueur magnétique colorée ou fluorescente constituée de traceurs comme produit indicateur (voir figure I.8) [16].

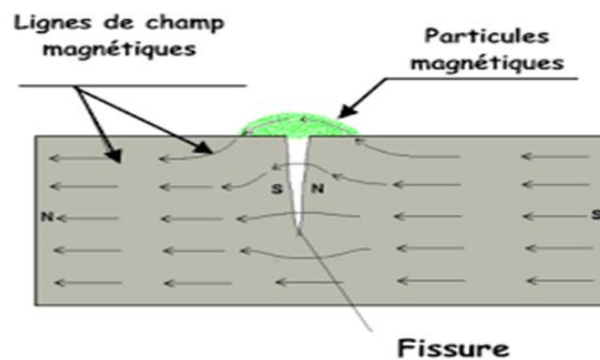


Figure I.8. Principe de la magnétoscopie

Cette technique est très efficace pour les petits défauts superficiels et possède une très bonne sensibilité de détection des défauts plans. Néanmoins, elle ne permet pas de détecter les défauts profonds et sa mise en œuvre nécessite souvent la démagnétisation des matériaux [17].

I.6.4.1. Avantages et inconvénients du contrôle par magnétoscopie

Parmi les avantages et les inconvénients du contrôle par magnétoscopie, on peut citer [17]:

a) Avantages

- Méthode de mise en œuvre plus rapide que le contrôle par ressuage,
- Facilité de détection des défauts débouchant et sous-jacents (à 2 mm max),
- Les défauts peuvent être matés ou obstrués,
- Rapidité relative d'obtention des résultats,
- Bonne sensibilité de détection des défauts perpendiculaires au champ.

b) Inconvénients

- Méthode de contrôle exclusivement réservée aux matériaux ferromagnétiques,
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur (- 2 mm de profondeur),
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés,
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses.

I.6.5. Contrôle par courants de Foucault

Le contrôle par courants de Foucault est une méthode du CND qui utilise les phénomènes de propagation d'ondes électromagnétiques. Ce principe est présenté dans la figure ci-dessous.

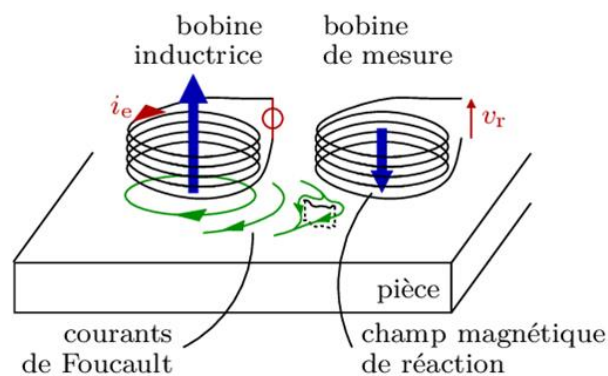


Figure I.9. Principe du CND par courants de Foucault

Le passage d'un courant variable à travers une bobine génère un champ magnétique, la propagation de ce dernier dans une pièce conductrice électromagnétique induit des courants de Foucault, qui à leurs tours créent un champ magnétique opposé au champ d'excitation entraînant une variation d'impédance de la bobine. La mesure de celle-ci est à la base du contrôle par courants de Foucault. Cette variation dépend des caractéristiques du matériau (dimension, conductivité électrique et perméabilité magnétique) [18],[19].

I.6.5.1. Domaines d'application

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes [6]:

- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe de composants aéronautiques,
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau,
- Mesure d'épaisseur de revêtements (conducteurs non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur...),
- Recherche de défauts sur produits en sortie de fabrication (tubes, rails, barres...). Suivi d'installations et de matériels en service,
- Mesure d'épaisseur.

I.6.5.2. Avantages et inconvénients du contrôle par courants de Foucault

Les avantages ainsi que les inconvénients du contrôle par courants de Foucault sont [20]:

a) Avantages

- Simple, peu coûteux et rapide,
- Grande sensibilité de détection des défauts (dimensionnelles, structurales...),
- Evaluer le dimensionnement et la profondeur d'un défaut,
- Pas des conditions de sécurité ni pour l'opérateur ni pour l'environnement,
- Inspection sans contact,
- Efficacité de la technique malgré la complexité des phénomènes électromagnétiques mis en œuvre,
- Automatisation possible pour des pièces de géométrie constante (tubes, barres, rubans et câbles).

b) Inconvénients

- La profondeur d'inspection dépend de la fréquence d'excitation,
- La détection du défaut se fait d'une manière locale,
- Inspection limitée aux matériaux électriquement conducteurs,
- La position du capteur par rapport au spécimen peut influencer l'efficacité de détection des défauts.

I.6.6. Ultrasons

Contrairement aux techniques précédentes, le contrôle par ultrasons est bien adapté pour le contrôle des pièces très épaisses. Une onde ultrasonore (appelée onde émettrice) est émise par un palpeur (appelé émetteur) placé sur la pièce contrôlée tel qu'il est montré dans la figure I.10. Cette onde se propage dans le matériau et se réfléchit lorsqu'elle rencontre un obstacle (défaut, face de la pièce...). L'onde réfléchie revient à la surface et est captée par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur). Les fréquences couramment utilisées, pour ce type de contrôle, vont de 20 kHz à plus de 10 MHz. Cette méthode nécessite une focalisation fine du faisceau d'ondes ultrasonores afin de concentrer l'énergie générée en une zone précise.

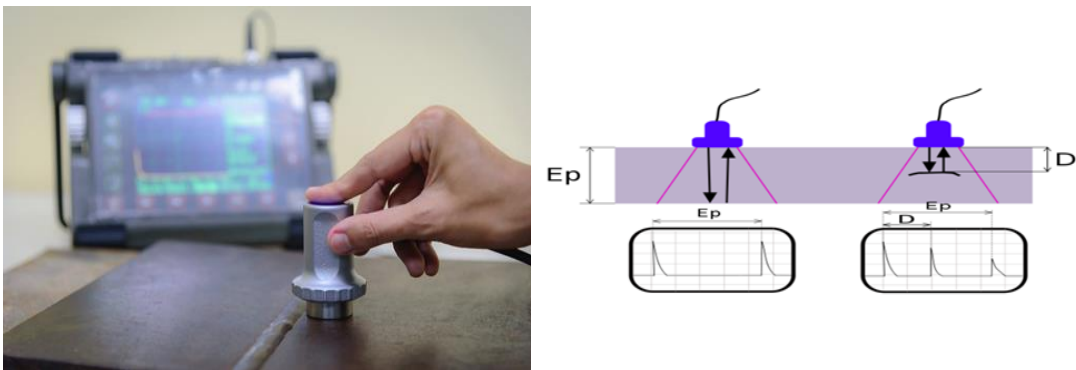


Figure I.10. Principe des Ultrasons

Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau et le temps aller-retour de l'onde envoyée, on en déduit la distance parcourue par cette dernière et par suite la localisation d'un éventuel défaut. Une des principales complexités pour réaliser ce type de contrôle est de transmettre l'onde ultrasonore dans le matériau. En effet, l'air constitue un très mauvais milieu de propagation de l'onde émettrice. Ce problème peut être contourné en utilisant de l'eau entre l'émetteur et la pièce inspectée. Il s'agit alors d'un contrôle en immersion. Pour des pièces qu'on ne peut pas immerger, il est nécessaire de déposer un produit, appelé couplant, entre le palpeur et la pièce testée [21].

Les ultrasons sont aussi très employés pour les mesures d'épaisseur et, plus récemment, dans l'évaluation de certains paramètres métallurgiques comme les grosseurs de grains, les textures, les profondeurs de traitements thermo-chimiques superficiels sur les aciers, et enfin l'estimation des contraintes mécaniques [22].

I.6.6.1. Avantages et inconvénients du contrôle par les ultrasons

Parmi les avantages et les inconvénients du contrôle par les ultrasons, on peut citer [2]:

a) Avantages

- Equipements portatifs,

- Appareil très sensible aux fissures,
- Résultats immédiats,
- Absence totale d'inconvénients liés à l'hygiène et à la sécurité.

b) Inconvénients

- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts,
- Huile de couplage est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'opération.

I.6.7. Contrôle par laser

Dans le domaine de CND, la technique du laser à ultrasonore est une méthode efficace pour générer et recevoir les ondes ultrasonores à l'intérieur du matériau inspecté sans le besoin d'un couplant (figure I.11). Selon l'intensité du laser, le principe physique de génération d'ondes ultrasonores peut être classé en deux grandes catégories: le régime thermo-élastique et le régime d'ablation.

Pour le régime thermo-élastique, le matériau est exposé à une impulsion laser à haute énergie. La surface exposée à l'impulsion laser subit une dilatation thermique pendant l'impulsion et une relaxation entre les impulsions, ce qui entraîne des vibrations et générer des ondes ultrasonores. Lorsque l'énergie de l'impulsion laser est suffisamment élevée pour endommager la surface de l'échantillon, le matériau peut être endommagé, on peut observer une fusion, une déformation plastique et même des fissures, ce qui rend indésirable [23].

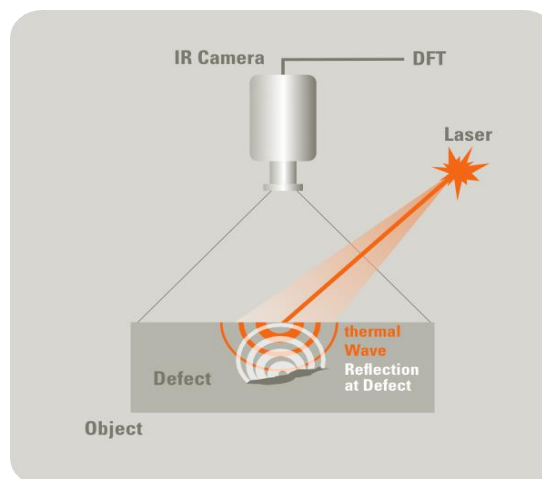


Figure I.11. Principe du contrôle par laser

Plusieurs caractéristiques doivent être prises en compte lors de l'utilisation d'un laser pulsé pour la génération d'ultrasonores, notamment la longueur d'onde, l'énergie de l'impulsion, le profil du faisceau, la durée de l'impulsion et le taux de régénération de l'impulsion.

La méthode de contrôle par laser est parmi les méthodes optiques les plus répandues en CND. Comme elle est aussi sans contact, les objets irréguliers et les surfaces non planes peuvent être inspectés sans problèmes d'usure. Ce type de méthodes de contrôle non destructif est populaire dans les industries aéronautiques et automobiles [2].

I.6.7.1. Avantages et inconvénients du contrôle par laser

Ci-dessous quelques avantages et inconvénients du contrôle par laser sont présentés [6].

a) Avantages

- Inspection sans contact, ne nécessite pas la préparation de surface de la pièce à contrôler,
- Pas de constables: liquide de pénétration, martiaux de marquage...etc,
- Avec les capteurs électro-optiques comme les cameras CCD, des mesures temps réel sont possibles.

b) Inconvénients

- Considération de sécurité particulières doivent être prises en compte,
- Les résultats dépendent de la composante de cisaillement,
- L'interprétation des résultats est subjective.

I.6.8. Contrôle par analyse vibratoire

Cette méthode est élaborée par une coordination d'ingénieurs en mécanique et en électricité, puisque la plupart des défauts électriques ou électromagnétiques ont des réactions mécaniques (couple, vitesse,...).

L'analyse des vibrations est une méthode très utilisée pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Récemment, les chercheurs se sont orientés vers l'utilisation de cette technique dans le domaine du CND. Elle permet une analyse détaillée et elle donne une vue sur la quasi-totalité des défauts mécaniques et/ou électriques.

Cette technique consiste à l'utilisation de capteurs spécifiques (accéléromètre, vélocimètre, proximètre) dans des lieux judicieux sur la machine à analyser (figure I.12). Ces capteurs transforment les vibrations émises par la machine en signal électrique. L'étude de ce signal permet de définir les défauts régissant la machine. L'analyse temporelle et/ou fréquentielle permet une bonne étude du signal récupéré et nous informe sur le défaut d'une manière très précise [24].



Figure I.12. Principe de l'analyse vibratoire

I.6.8.1. Avantages et inconvénients du contrôle par analyse vibratoire

Les avantages ainsi que les inconvénients du contrôle par analyse vibratoire sont [25]:

a) Avantages

- Détection de défauts à un stade précoce,
- Autorise une surveillance continue,
- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi,
- Permet de surveiller l'équipement à distance (télémaintenance).

b) Inconvénients

- Difficulté d'interprétation du spectre,
- Dans le cas de la surveillance continue, installation relativement couteuse.

La technique du CND par analyse vibratoire est celle qu'on va adopter dans ce travail de fin d'études. Plus de détails vont être présentés dans les chapitres qui suivent.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur le principe du contrôle non destructif ainsi que ses différents domaines d'application. De plus, nous avons présenté les différentes techniques du CND utilisées dans l'industrie ainsi que les avantages et les inconvénients correspondant. Parmi ces techniques, celle d'analyse vibratoire va faire l'objet de ce mémoire.

Chapitre II

***Etat de l'art sur les défauts dans les
machines à courant alternatif***

Chapitre II

Etat de l'art sur les défauts dans les machines

à courant alternatif

II.1. Introduction

Les machines électriques (ME) sont des éléments vitaux dans les applications industrielles d'aujourd'hui, où une conversion d'énergie est nécessaire et en particulier dans les systèmes électriques.

Ces machines peuvent présenter quelques défaillances qui peuvent provoquer des dysfonctionnements et par conséquent l'arrêt préjudiciable au bon fonctionnement du système. Ces défauts peuvent être de différentes natures, c'est pour cela et dans le but d'assurer l'efficacité, le fonctionnement, et la rentabilité des installations, il faut faire l'étude des défauts dans les machines électriques.

Ce chapitre a pour objectif de donner un aperçu sur les machines à courant alternatif ainsi que les différents défauts pouvant survenir dans ce type de machines électriques.

II.2. Etudes statistiques sur les défauts dans les machines électriques

Différentes études statistiques ont été menées à la fin du XXe siècle, pour déterminer la répartition des pannes dans les machines électriques industrielles de moyenne puissance (De 50kW à 200kW) ou de forte puissance (de 100kW à 8MW).

Les résultats montrent que les défauts de roulements et les défauts au niveau du stator (les court-circuits) semblent être les plus fréquents (figure II.1). Par contre, les autres défauts et les défauts au niveau du rotor semblent être les moins fréquents, comme les défauts d'excentricité, de ruptures de barres rotoriques et d'anneaux de court-circuits pour les machines asynchrones et les défauts de désaimantation partielle ou totale pour les machines synchrones à aimants permanents. Cependant, ces chiffres varient nettement en fonction des applications (gamme de puissance et secteur d'activité)[26].

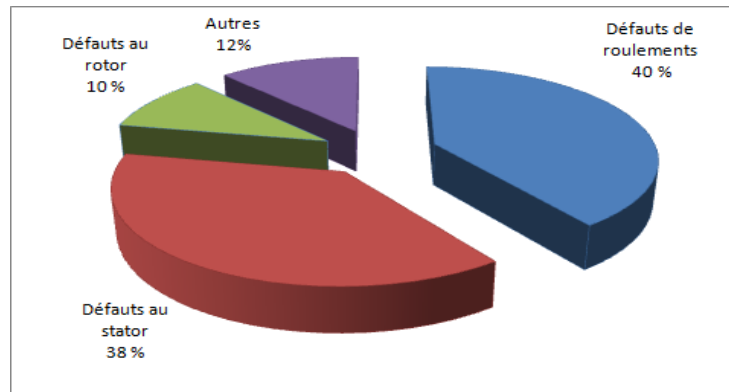


Figure II.1. Répartition des défauts dans une machine électrique

Des études statistiques récentes ont montré que les pannes imputables aux défauts des bobinages statoriques sont parmi les défauts les plus fréquents après les défauts de roulements, quelle que soit la gamme de puissance des machines considérées [27].

Selon les différentes sources citées, les pannes dues aux défaillances du bobinage statorique représentent entre 25 et 35 % des pannes totales (figure II.2).

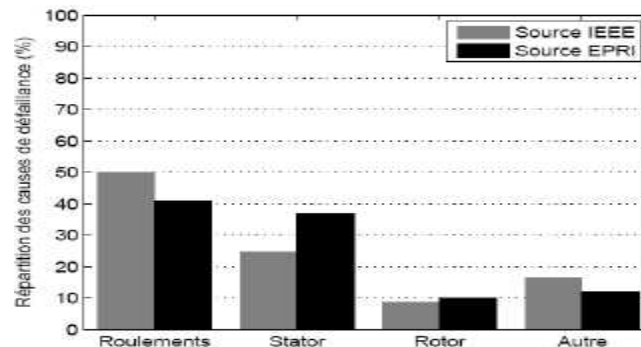


Figure II.2. Répartition des causes de défaillances des machines électriques

Les moteurs fonctionnent très souvent dans des conditions extrêmes. Ils sont souvent démarrés directement en ligne, ce qui conduit à de grands courants de démarrage et fortes pulsations du couple. Ces conditions sont néfastes pour le moteur, et conduisent à affaiblir ces différents composants avec le temps. La survenance d'un défaut dépend considérablement de l'application spécifique de la machine et de son environnement.

Comme les machines électriques sont soumises à des conditions environnementales différentes (tels que l'humidité dans la plupart des activités offshore), il est important d'avoir une idée sur la dépendance des taux de défaillance due à l'environnement. À cet égard, des recherches ont

montré que le taux de défaillance pour les moteurs situés en plein air dans des conditions extrêmement difficiles (pour des installations situées en terre et en mer) est environ de 2,5 fois plus élevé que le taux de défaillance pour les moteurs situés à l'intérieur [28].

II.3. Causes des défauts dans les machines électriques

On désigne par défaillance tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. La majorité des défaillances de stator et de rotor s'avèrent provoquées par une combinaison de contraintes qui agissent sur les deux composants.

Les causes des défauts dans les machines électriques sont multiples. Le tableau II.1 présente une classification des défauts qui peuvent exister dans une machine électrique selon leurs origines [29].

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

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

II.4. Présentation de quelques défauts des machines électriques

Tout d'abord, pour pouvoir comprendre les mécanismes de génération des défauts ainsi que les symptômes traduisant leur existence, on doit avoir de bonnes connaissances sur les machines électriques.

La machine électrique tournante est un dispositif électromagnétique destiné à transformer de l'énergie mécanique en énergie électrique (fonctionnement en générateur) ou, inversement, à transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique (fonctionnement en moteur). Elle comprend principalement deux parties mobiles l'une par rapport à l'autre: l'inducteur qui crée un champ magnétique et l'induit dans lequel ce champ induit crée une force électromotrice. Ces deux parties sont séparées par un entrefer. Il existe de nombreux types de machines électriques, notamment les machines asynchrones et les machines synchrones.

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction, comprend un stator et un rotor. Le stator est fixe, on y trouve les enroulements reliés à la source. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor: bobiné ou à cage d'écureuil. Sa vitesse de rotation est inférieure à celle du champ magnétique du stator d'où vient le nom « asynchrone »[30].

Dans ce travail, on va s'intéresser à la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Plus de détails sur cette machine ainsi que sur les défauts qui peuvent survenir son fonctionnement vont être donné ci-dessous.

II.4.1. Machine synchrone à aimants permanents: Généralités La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation [31].

- **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

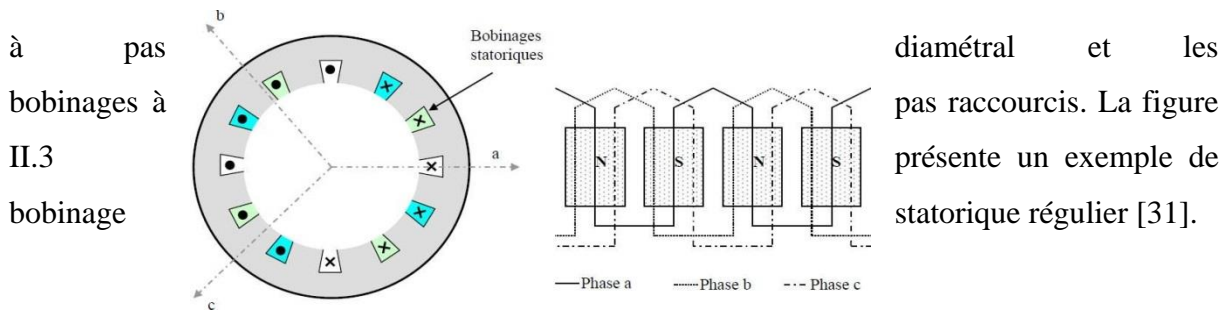


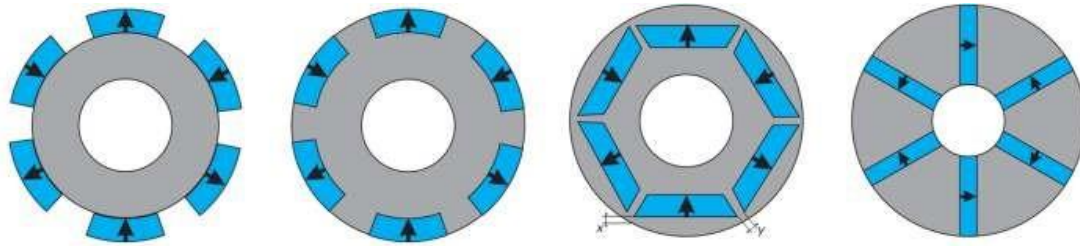
Figure II.3. Schéma d'un bobinage statorique régulier

- **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. Ces aimants 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 [31].

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

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

Une MSAI a une plus forte résistance mécanique qu'une MSAS, car les aimants de cette dernière ont besoin d'être fixés sur la surface du rotor. Par rapport au comportement magnétique, le rotor du MSAS est symétrique tandis que le rotor du MSAI est asymétrique. Ainsi, les inductances statoriques du MSAI ne varient pas avec la position du rotor. Par contre, les inductances du MSAS varient en fonction de la position du rotor ce qui crée une saillance géométrique du rotor. Cette saillance est très utile pour le contrôle du moteur à basse vitesse [32]. La figure ci-dessous présente les différentes structures rotoriques d'une MSAP.



a) Aimants montés en surface b) Aimants insérés c) Aimants enterrés d) A concentration de flux

Figure II.4. Différentes structures rotoriques pour une MSAP

II.4.2. Défauts de la MSAP

II.4.2.1. Défauts du rotor

Les défauts dans le rotor peuvent être considérés comme plus complexes et dépendent du type de la machine. Nous nous concentrerons sur les défauts d'excentricité, de roulements et des aimants. Ils sont décrits ci-dessous [33].

A. Défaut d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques dans les machines électriques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité qui évoluent dans le temps et qui existent dès la phase de leur fabrication (usinage et montage). Lors du fonctionnement d'une machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité.

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

Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est le décentrement qui génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et à augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [34].

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées (figure II.5):

- **L'excentricité statique**: généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale est un défaut de centrage des flasques.

- **L'excentricité dynamique:** elle correspond à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- **L'excentricité mixte:** la somme des deux cas présentés ci-avant.

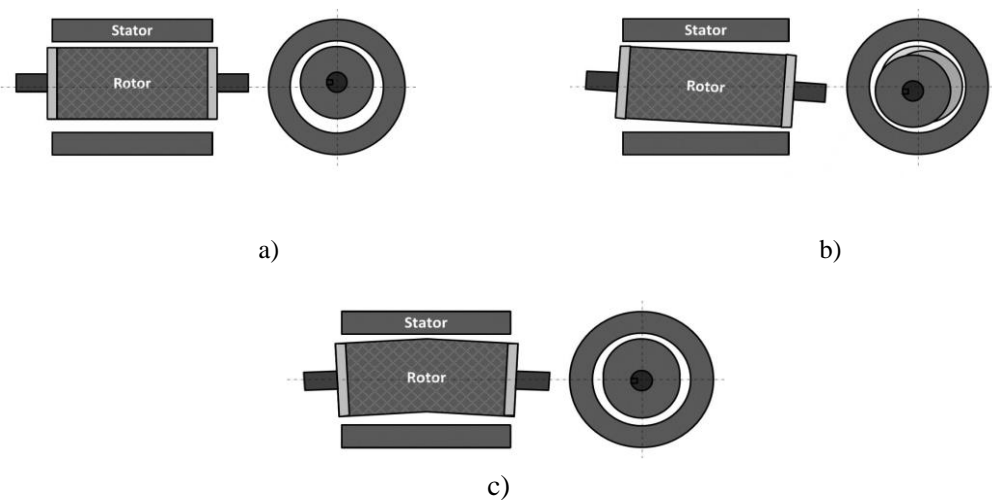


Figure II.5. Types d'excentricité: a) statique, b) dynamique, c) mixte

B. 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 [34].

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 [35]:

- 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 [36].

La figure II.6 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 II.6. Roulement à billes éclaté

C. Défauts des aimants

La présence des aimants dans le rotor produit un flux rotorique constant. Toutefois, ce flux peut varier sous l'influence de nombreux facteurs tels que la réaction d'induit et la température. Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés avec une tension, le champ créé s'oppose au champ produit par les aimants.

Dans des conditions normales le point de fonctionnement peut évoluer et traverser le point limite de désaimantation réversible (figure II.7) [32].

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

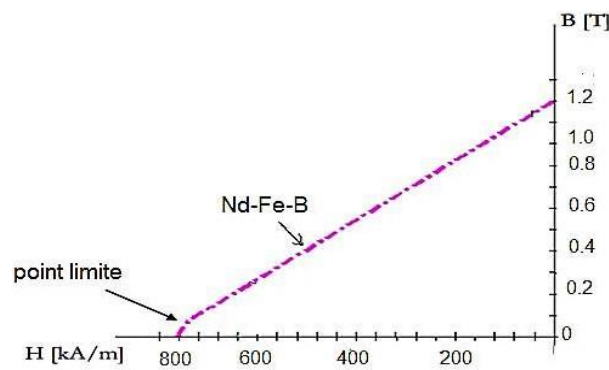


Figure II.7. Point limite de désaimantation réversible

Les températures élevées de fonctionnement réduisent aussi l'induction rémanente. La figure II.8 montre la variation de B_r avec la température [32].

En plus de la diminution de la force magnétique de l'aimant en raison de la réaction d'induit ou de la température, il est également connu que certains aimants (comme NdFeB) peuvent se détériorer par désintégration. Les fissures qui se forment lors de la fabrication peuvent conduire à la désintégration à grande vitesse. La désintégration entraîne la perturbation du flux dans l'entrefer causant ainsi le déséquilibre de l'attraction magnétique entre le rotor et le stator. Ceci engendre des vibrations et des contraintes sur les roulements [32].

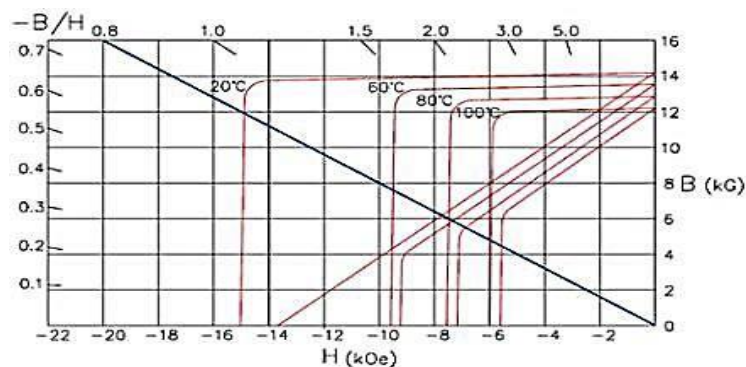


Figure II.8. Evolution de l'aimantation rémanente avec la température**II.4.2.2. Défauts du stator**

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à des défauts d'isolement des bobinages, à la perte d'une phase d'alimentation et à la dilatation de l'assemblage des tôles magnétiques. Mais généralement, les défauts statoriques sont liés à l'isolation. Ils sont généralement connus comme défauts entre terre et phase ou entre phases. Ces défauts peuvent ne pas être détectés au début, mais au cours du temps leurs effets augmentent et ils deviennent des défauts majeurs [37].

A. 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 de la machine.

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-spices).

Les différentes causes pour ce type de défauts sont [38]:

- 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.

B. 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 [35].

C. 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 [35].

La figure II.9 présente un exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques.

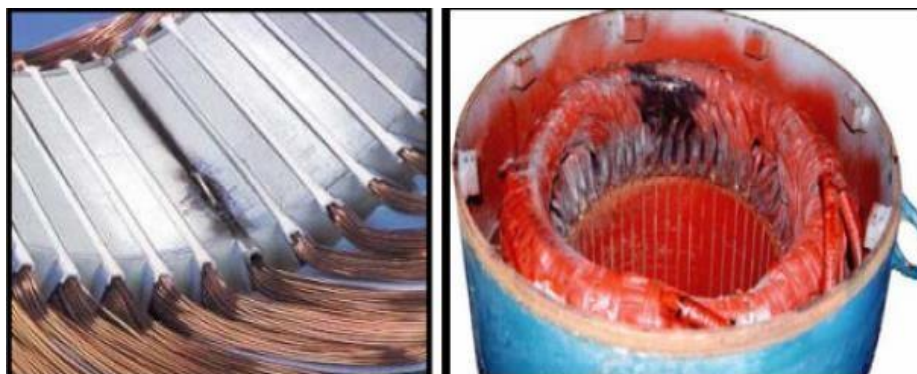


Figure I.9. Exemple de dégâts provoqués par les défauts de courts-circuits statoriques

D. Défauts de circuit magnétique

Tels que les fissures et les non homogénéités des propriétés physiques et géométriques (perméabilité magnétique, dimensions des encoches...). Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc [33].

II.5. Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à la présentation de quelques généralités sur les MSAP ainsi que quelques statistiques sur les défauts dans ce type de machines. De plus, un aperçu a été donné sur les différentes causes de défauts dans les machines électriques. Enfin, nous avons présenté quelques types de défauts statoriques et rotoriques dans les machines synchrones à aimants permanents.

Le chapitre qui suit sera consacré à la présentation des formulations mathématiques nécessaires pour le calcul des vibrations.

Chapitre III

***Calcul vibratoire pour le CND
d'une machine électrique***

Chapitre III

Calcul vibratoire pour le CND d'une machine électrique

III.1. Introduction

Récemment, les chercheurs et les industriels se sont orientés à l'exploitation de la technique d'analyse vibratoire pour le contrôle non destructif (CND) des machines électriques tournantes.

Dans ce chapitre, on va présenter les différentes étapes suivies pour le calcul des vibrations dans une machine électrique. De plus, on va donner un aperçu sur la procédure suivie pour le CND par analyse vibratoire.

III.2. Procédure du CND par analyse vibratoire

La procédure du CND par analyse vibratoire est résumée dans la figure ci-dessous.

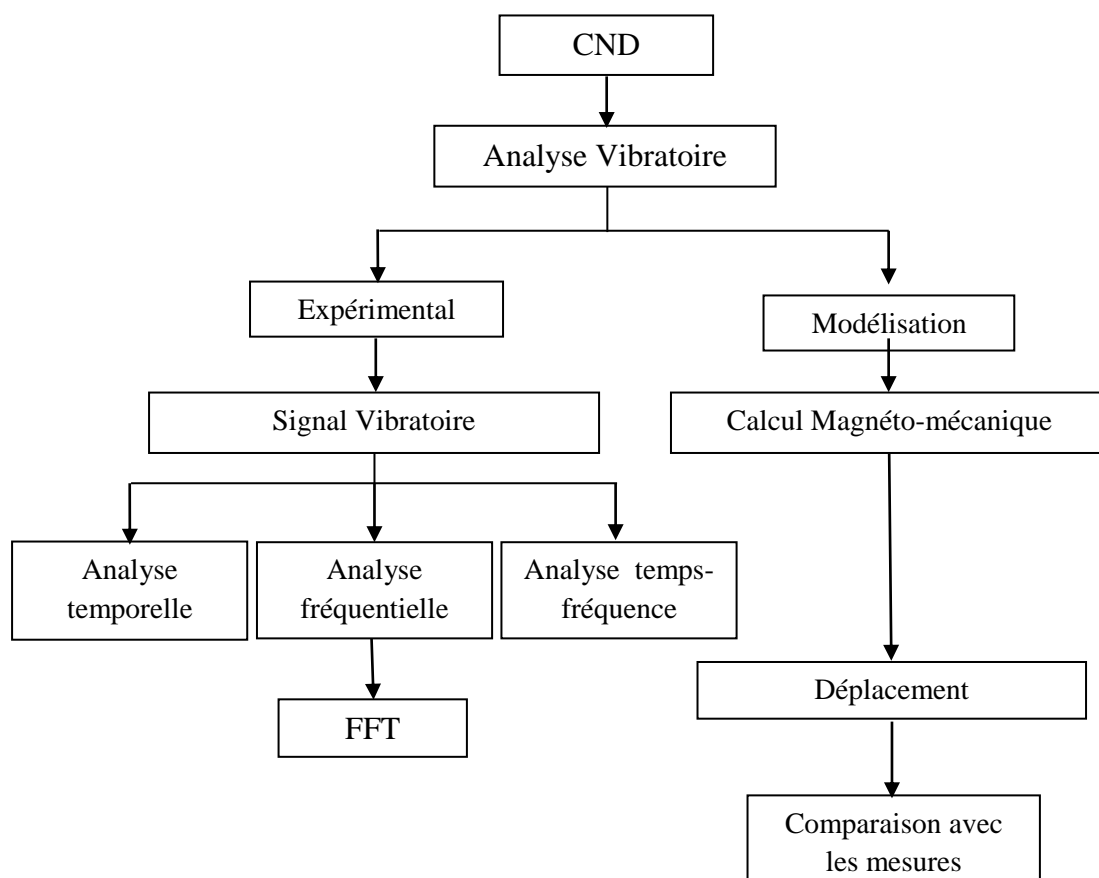


Figure III.1. Procédure du CND par analyse vibratoire

La technique d'analyse vibratoire consiste à collecter des signaux vibratoires mesurés sur les parties externes de la machine, et donnant des informations sur les processus de dégradations internes. A partir de mesures de niveaux de vibrations, nous pouvons détecter, localiser et caractériser la majorité des défauts qui peuvent surgir dans une machine électrique.

Une comparaison entre les résultats de mesure et de modélisation montre bien l'intérêt de cette technique dans le domaine du CND des machines électriques. Pour calculer les vibrations de la machine on doit passer par le calcul du champ et des forces magnétiques.

III.3. Calcul du champ électromagnétique

Le fonctionnement des machines électriques est basé essentiellement sur les phénomènes électromagnétiques, gouvernés par les fameuses équations de Maxwell. Il y a deux types de sources du champ magnétique: courants circulant dans les enroulements statorique/rotorique et aimants permanents [39].

III.3.1. Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell représentent la formalisation la plus complète des principes de l'électromagnétisme classique. Elles servent de cadre général pour décrire le comportement et les interactions des champs électriques et magnétiques ainsi que de leurs sources : charges et densités de courant. Ces équations reflètent l'interrelation fondamentale entre ces quatre paramètres [40] [41].

- **Equation de Maxwell-Ampère**

Les champs magnétiques peuvent être engendrés de deux façons: par la variation d'un champ électrique ou par le flux de courants électriques. Dans ce dernier cas, l'équation suivante peut être formulée:

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

- **Equation de Maxwell-Faraday**

Un champ électrique peut engendrer un champ magnétique. Ce champ induit est exploité dans de nombreux générateurs électriques. Par exemple, lorsqu'un aimant permanent en rotation crée un champ magnétique en mouvement, cela induit un champ électrique dans un fil à proximité, exprimé par:

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

- **Equation de conservation de flux magnétique**

L'induction B est toujours à flux conservatif donc on a:

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

- **Equation de Maxwell-Gauss**

Un champ électrique se forme en présence de charges électriques, se déplaçant des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette relation relie le flux électrique à travers toute surface gaussienne fermée aux charges électriques présentes, comme suit:

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

Avec:

\vec{E} : Champ électrique [V/m],

\vec{B} : Induction magnétique [T],

\vec{H} : Champ magnétique [A/m],

\vec{J} : Densité de courant [A/m²],

\vec{D} : Induction électrique [C/m²],

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m³],

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement [A/m²].

III.3.2. Problème électromagnétique

Un problème électromagnétique, représenté schématiquement comme indiqué dans la figure III.1, est constitué de divers domaines physiques qui peuvent être présents dans un dispositif électromagnétique [42].

Ce problème typique englobe les éléments suivants:

- 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.

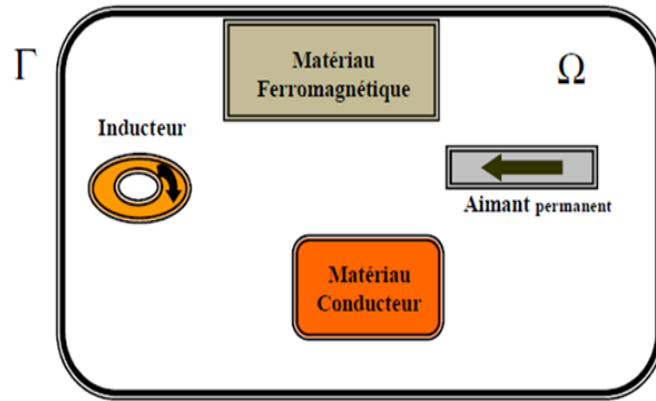


Figure III.2. Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique

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'inconnue 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 et dans le cas de l'étude de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), les modèles magnétostatique et magnétodynamique sont tout à fait adéquat [43]. Dans notre étude, on va s'intéresser au model magnétodynamique.

III.3.3. Formulation magnétodynamique

En électrotechnique, les fréquences usuelles sont généralement plus basses que les fréquences radio ($f < 10^{12}$ Hz). D'où la négligence dans un milieu conducteur des courants de déplacement devant les courants de conduction. Une autre simplification consiste à négliger la charge d'espace dans les matériaux conducteurs ($\rho = 0$) [44].

Dans le cadre des systèmes alimentés par des sources à variation temporelle, et en présence de courants induits dus à la variation temporelle du champ, les équations de Maxwell peuvent être exprimées comme suit:

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (III.5)$$

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (III.6)$$

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

Avec:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \sigma \vec{V} \wedge \vec{B} + \vec{j}_{ext} \quad (III.8)$$

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 tel que:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \quad (\text{III.9})$$

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M} \quad (\text{III.10})$$

Avec:

\vec{B}_r : Vecteur induction rémanente [T],

\vec{M} : Vecteur aimantation magnétique [At/cm],

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

$[\mu_0]$: Perméabilité magnétique du vide [H/m],

$[\mu_r]$: Perméabilité magnétique relative au milieu.

La figure III.3 illustre le diagramme de Toni, particulièrement utilisé en magnétodynamique. Dans ce cadre, les lois de comportement sont des opérateurs qui établissent une relation entre le champ électrique et le champ magnétique, en prenant en compte la dérivée par rapport au temps [43].

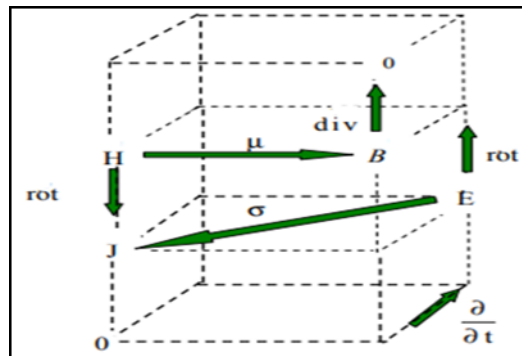


Figure III.3. Diagramme de Toni

Il existe diverses formulations élaborées pour modéliser la magnétodynamique. Les principales formulations rencontrées sont les suivantes: 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.

III.3.3.1. Formulation en potentiel vecteur magnétique A

Le potentiel vecteur magnétique, souvent désigné simplement comme le potentiel vecteur, est une grandeur physique essentielle en électromagnétisme, jouant un rôle crucial dans les équations de Maxwell. Bien qu'il ne soit pas mesurable directement, sa présence est intimement liée à celle des champs électrique et/ou magnétique. En utilisant l'équation III.7 qui exprime la divergence de l'induction magnétique \vec{B} comme nulle, et sachant que la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut établir, en tout point de l'espace, une relation entre l'induction magnétique et le rotationnel d'une grandeur vectorielle \vec{A} [T.m]. Cette relation est exprimée par l'équation suivante [45]:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{III.11})$$

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.5, III.6, III.8, III.9 et III.11 et en considérant un système sans mouvement, nous aboutissons à l'équation, à résoudre, qui s'exprime comme suit:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} (\vec{A}) \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_{ext} + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \vec{B}_r \right) \quad (\text{III.12})$$

Dans notre analyse, nous adopterons cette formulation en tenant compte de la présence d'aimants permanents. Selon la géométrie spécifique du dispositif étudié, la résolution peut être effectuée soit en coordonnées cartésiennes, soit en coordonnées cylindriques. Dans cette étude, nous nous concentrerons sur une analyse en deux dimensions en utilisant les coordonnées cartésiennes.

La résolution du problème en deux dimensions (2D) et la formulation de l'équation électromagnétique basée sur le potentiel vecteur A en coordonnées cartésiennes offrent plusieurs avantages. Dans cette configuration, le potentiel vecteur A ne possède qu'une seule composante non nulle, dans la direction O_z . De plus, cette composante dépend uniquement des coordonnées x et y, ce qui simplifie l'analyse et réduit le temps de calcul. Donc, on peut écrire [43]:

$$\vec{j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ j_z(x, y) \end{pmatrix} ; \quad \vec{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{pmatrix} ; \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} B_x(x, y) \\ B_y(x, y) \\ 0 \end{pmatrix} \quad \left(\begin{pmatrix} \quad \\ \quad \\ \quad \end{pmatrix} \right) \quad (\text{III.13})$$

À fréquence industrielle, l'unicité du potentiel vecteur magnétique est garantie par la Jauge de Coulomb, formulée comme montrer dans l'équation ci-dessous. Cette condition est intrinsèquement vérifiée en deux dimensions (2D).

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{III.14})$$

III.3.3.2. Conditions de passage entre deux milieux différents

À l'interface entre deux milieux distincts, désignés M1 et M2 (figure III.4), les conditions de continuité suivantes peuvent être rencontrées [42]:

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

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{III.15})$$

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

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (\text{III.16})$$

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

$$\vec{j}_1 \cdot \vec{n} = \vec{j}_2 \cdot \vec{n} \quad (\text{III.17})$$

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

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = J_s \quad (\text{III.18})$$

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

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \rho_s \quad (\text{III.19})$$

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 charges libres à l'interface.

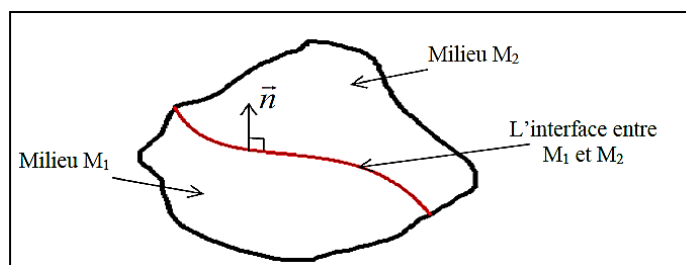


Figure III.4. Domaine d'étude avec deux milieux différents M1 et M2

III.3.4. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

Il existe deux grandes catégories de méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles qui sont:

- Les méthodes analytiques et les méthodes semi-analytiques,
- Les méthodes numériques.

Les méthodes analytiques, s'avèrent d'application très difficile dès que la complexité de la géométrie s'accroît et que certains matériaux, dans des conditions de fonctionnement optimales, présentent des non-linéarités physiques, donc mathématiques. L'apparition des ordinateurs, de grandes puissances, a mis en valeur l'intérêt des méthodes dites numériques. Celles-ci font appel à des techniques de discrétisation. Ces méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles (EDP) à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation [46].

III.3.4.1. Méthodes analytiques

Ces méthodes fournissent une solution exacte et précise, mais elles ne sont pas faciles à trouver, voire elles peuvent être complètement non évidentes en raison de la complexité du problème. Les modèles analytiques sont particulièrement utiles dans l'étude des phénomènes dynamiques et des effets de peau importants dans les conducteurs. Ils offrent également des avantages significatifs en termes de coût de calcul, d'espace mémoire, de volume d'informations et de facilité d'utilisation. Les méthodes analytiques sont souvent combinées avec des méthodes numériques pour maximiser leurs avantages. Parmi les principales méthodes analytiques de résolution des équations aux dérivées partielles, on trouve la Méthode de Séparation des Variables (MSV) et la Méthode Intégrale (MI) [43].

III.3.4.2. Méthodes semi-analytiques

Parmi les méthodes semi-analytiques, on peut citer la méthode des intégrales de frontières ainsi que la méthode des circuits couplés (MCC) [47].

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. Par contre, la méthode des intégrales de frontières repose sur la discrétisation des frontières du domaine en utilisant le théorème de GREEN. Cependant, elle est limitée à la résolution des systèmes linéaires.

III.3.4.3. Méthodes numériques

Les méthodes numériques sont développées grâce au développement des outils informatiques. Ce sont des méthodes basées sur la discrétisation du domaine d'étude. Nous distinguons trois méthodes principales pour la résolution des équations électromagnétiques [48] [49] [50].

- La Méthode des Différences Finis (MDF),
- La Méthode des Volumes Finis (MVF),
- La Méthode des Eléments Finis (MEF).

La MDF 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.

La MVF est dérivée de la méthode des différences finies. Le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage utilisé dans la méthode des différences finies.

La MEF a d'abord été utilisée par les spécialistes de la mécanique, et son introduction dans le domaine de l'électrotechnique a été réalisée par M.V.K. Charien en 1970. Cette méthode est particulièrement adaptée à la résolution des EDP sur des domaines de géométries complexes, qu'ils soient linéaires ou non linéaires. Ceci rend cette méthode très bien adaptée pour résoudre notre problème (CND d'une MSAP).

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en éléments finis et à approximer l'inconnu dans chaque élément à l'aide de fonctions d'interpolation. Ces fonctions sont généralement des polynômes de Lagrange de degré un ou deux. L'interpolation dans un élément est effectuée en fonction des valeurs nodales, ce qui garantit la continuité de l'inconnu aux interfaces des éléments.

❖ Principe de la méthode des éléments finis

La MEF consiste à rechercher une solution qui représente les phénomènes étudiés sur un domaine de résolution préalablement subdivisé en éléments finis adjacents. Cette solution globale est construite sur chaque élément du maillage et doit satisfaire globalement aux équations aux dérivées partielles qui modélisent le phénomène, ainsi qu'aux conditions aux limites requises. Sur chaque élément fini, la solution est décrite par une interpolation basée sur les valeurs nodales de l'inconnue [51].

Le maillage en éléments finis consiste à discrétiser le domaine d'étude en un ensemble d'éléments finis de forme simple. Ces éléments peuvent être des segments, des triangles, etc.... tel qu'il est montré dans la 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.

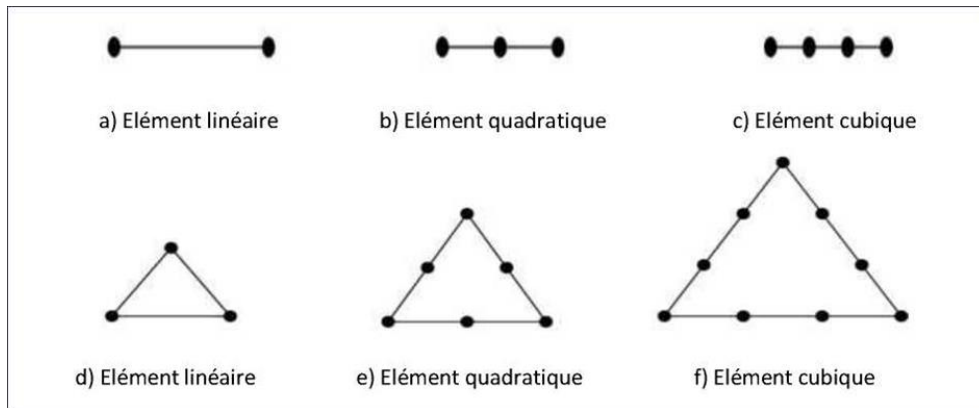


Figure III.5. Éléments classiques en une et deux dimensions

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.

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_e sont parfaitement définis en fonction des valeurs de ses sommets.

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 [52].

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:

$$[M]_e \cdot [A]_e = [F]_e \quad (\text{III.20})$$

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

$$[M] \cdot [A] = [F] \quad (\text{III.21})$$

III.4. 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 démarche pour appliquer le principe des travaux virtuels a été proposée par A. Belahcen. En utilisant cette méthode, on ne doit pas passer par le calcul de la dérivée de la matrice Jacobéenne 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 [53].

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

$$w = \int_0^B H \cdot dB = \int_0^A J \cdot dA \quad (\text{III.22})$$

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:

$$F = - \left. \frac{\partial w}{\partial s} \right|_{\phi=cste} = - \frac{\partial}{\partial s} \int_0^A J \cdot dA \quad (\text{III.23})$$

Cette expression de la force devient:

$$F = -\frac{\partial}{\partial s} \int_0^A [M][A] dA \quad (\text{III.24})$$

$$F = -\int_0^A [A]^T \frac{\partial [M]}{\partial s} dA \quad (\text{III.25})$$

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

$$[M_{ij}^e] = \frac{v}{4\Delta} [b_i b_j + c_i c_j] \quad (\text{III.26})$$

Où:

$$b_i = y_j - y_k \quad (\text{III.27})$$

$$c_i = X_k - X_j \quad (\text{III.28})$$

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.5. Calcul des vibrations: déplacements/accélérations

Pour calculer les vibrations 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 [45]:

$$[M][\ddot{d}] + [C][\dot{d}] + [K][d] = [F] \quad (\text{III.29})$$

Où:

$[M]$: matrice masse globale de dimensions (NTxNT),

$[K]$: matrice de rigidité mécanique globale de dimensions (NTxNT),

$[C]$: matrice d'amortissement de dimensions (NTxNT),

$[F]$: 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:

$$d = d_0 \quad \forall M \in s_d \quad (\text{III.30})$$

$$\sigma_{ij} \cdot n = f_0 \quad \forall M \in s_\sigma \quad (\text{III.31})$$

Où:

n : normale sur la surface s_σ ,

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

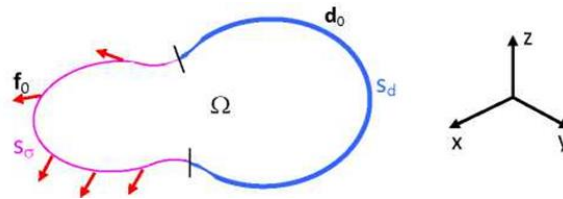


Figure III.6. Représentation des conditions aux limites d'un problème mécanique

L'équation du mouvement s'exprime, en négligeant l'amortissement, comme suit:

$$[M][\ddot{d}] + [K][d] = [F] \quad (\text{III.32})$$

Les matrices M et K et le vecteur F sont obtenues à partir des matrices élémentaires M_e et K_e et du vecteur F_e . Pour un élément de volume v_e ces matrices s'expriment comme suit:

$$[M]_e = \int_{v_e} \rho [N]^T [N] dV_e \quad (\text{III.33})$$

$$[K]_e = \int_{v_e} [N]^T [D]^T [H] [D] [N] dV_e \quad (\text{III.34})$$

Où:

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

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

n : nombre de nœuds pour chaque élément,

$[\rho]$: masse volumique de la structure,

N_i : fonctions d'approximation,

$[D]$: opérateur différentiel qui s'exprime comme suit:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

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

$$[H] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

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

$$[H] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

Avec E c'est le module d'Young (module d'élasticité) et ν c'est le coefficient de Poisson.

Pour chaque élément, on peut définir 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:

$$[d]_e = [\beta]_e [d] \quad (\text{III.38})$$

Où:

$[\beta]_e$: 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,

La relation ci-dessus 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 s'expriment alors comme suit:

$$[K] = \sum_e [\beta]_e^T [K]_e [\beta]_e \quad (\text{III.39})$$

$$[M] = \sum_e [\beta]_e^T [M]_e [\beta]_e \quad (\text{III.40})$$

$$[F] = \sum_e [\beta]_e^T [F]_e \quad (\text{III.41})$$

La méthode de superposition modale est souvent utilisée pour résoudre les problèmes de réponse dynamique des structures, que ce soit pour des analyses temporelles ou fréquentielles. Il est donc nécessaire, de disposer de la base modale pour le calcul de la réponse dynamique. Le vecteur des déplacements est obtenu par une combinaison linéaire des vecteurs propres. Il s'exprime comme suit [54]:

$$[d(t)] = \sum_{i=1}^{NT} \eta_i(t) X_i \quad (\text{III.42})$$

Où les $\eta_i(t)$ sont les intensités des modes propres X_i , dépendant du temps, appelées intensités modales ou coordonnées modales.

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

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

Un algorithme génétique fonctionne typiquement à travers un cycle simple de quatre espèces tel qu'il est montré dans la figure ci-dessous [54].

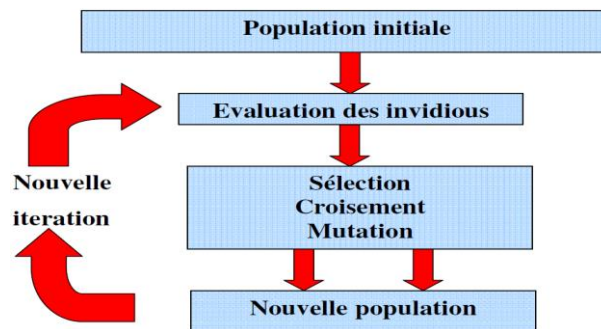


Figure III.7. Cycle génétique

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects importants. Tout d'abord, nous avons donné un aperçu général sur la procédure suivie pour le CND des machines électriques par analyse vibratoire. Ensuite, nous avons présenté les équations de Maxwell, les formulations mathématiques des modèles électromagnétiques ainsi que les différentes méthodes utilisées pour les résoudre.

Nous avons, également, donné un aperçu sur la méthode utilisée pour le calcul des forces électromagnétiques et la procédure suivie pour déterminer les vibrations d'une structure ainsi qu'un bref rappel sur la méthode des AG. Cette dernière va être explorée pour le CND (caractérisation des défauts) de la machine à étudier.

Chapitre IV

*Exploitation des modèles développés
en vue du CND d'une MSAP*

Chapitre IV

Exploitation des modèles développés en vue du CND d'une MSAP

IV.1. Introduction

Les industriels cherchent toujours à assurer le fonctionnement continu de leurs installations. Donc, ils doivent avoir une bonne maîtrise des techniques du diagnostic et de caractérisation des défauts qui peuvent surgir dans les machines électriques qui sont des dispositifs indispensables dans la majorité des processus industriels.

Ce chapitre se concentre sur l'identification/caractérisation des anomalies dans une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à travers l'analyse vibratoire. Dans ce but, des modèles éléments finis ont été développés et mis en œuvre, sous environnement MATLAB, en considérant trois types de défauts.

IV.2. Présentation de la machine à étudier

La machine à étudier est constituée de dix-huit encoches et de six aimants, ce qui lui confère six pôles. On va considérer le fonctionnement en moteur. La configuration géométrique de ce moteur a été représentée à l'aide de points, de droites, d'arcs et de segments. Ces derniers ont été connectés entre eux pour pouvoir créer les régions correspondantes à chaque partie de la machine. Après la réalisation de toutes ces étapes, nous avons obtenu la configuration de la figure ci-dessous.

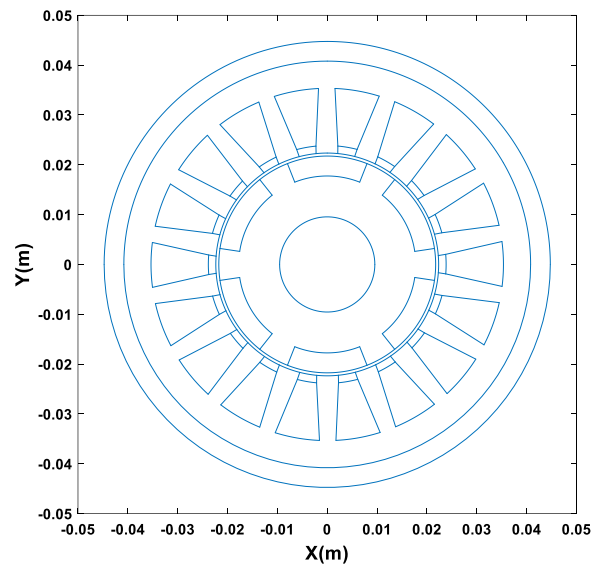


Figure IV.1. Configuration géométrique de la MSAP à étudier

Les principales caractéristiques de la machine à étudier sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.1. Caractéristiques de la MSAP à étudier

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

IV.3. Quel est le but de cette étude?

Le but de ce travail de fin d'études est la caractérisation des défauts d'une MSAP en utilisant la technique du CND par analyse vibratoire. Cette technique vise à caractériser les défauts de la machine sans provoquer de détérioration ni altérer son intégrité fonctionnelle, et permettant ainsi de maintenir sa fiabilité et sa sécurité.

Tout d'abord, on va modéliser la machine en régime harmonique numériquement, en se basant sur la méthode des éléments finis (MEF). Dans ce but, un code de calcul déjà développé sous environnement Matlab va être utilisé. Ce code a été utilisé comme problème direct dans le processus du CND par analyse vibratoire qu'on a élaboré.

L'étude revient à un problème inverse à partir de quel on cherche les paramètres du défaut donnant des vibrations proches de celles mesurées. Les résultats ainsi que leurs interprétations vont être présentés dans le reste de chapitre.

IV.4. Calcul des vibrations du moteur à étudier

L'étude peut être ramenée au plan XOY en considérant que la machine est suffisamment longue. Donc, on a considéré un domaine de résolution qui correspond à la section transversal de la machine (étude bidimensionnelle (2D)).

Comme les machines électriques tournantes présentent une antisymétrie entre les pôles adjacents, l'étude peut se limiter à un seul pôle. Cela permet d'économiser en espace mémoire et en temps de calcul. Cette approximation est nécessaire dans ce type de problèmes qui nécessitent un temps de calcul important.

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 culasse statorique).

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

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

Avec:

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

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

σ, ϑ : conductivité électrique et reluctivité magnétique respectivement.

L'avantage du modèle numérique multiphysique (problème magnéto-mécanique) utilisé est qu'il peut fournir des grandeurs de sortie telles que les forces et les vibrations (déplacements et accélérations) d'origine électromagnétique en tout point du domaine d'étude.

Les vibrations qui se produisent dans une machine électrique après une excitation électrique sont principalement provoquées par les forces magnétiques locales réparties en chaque point du circuit magnétique de la machine.

Pour déterminer le comportement vibratoire (déplacements et/ou accélérations) de la machine (ensemble stator-carcasse), il faut déterminer d'abord les matrices de masse et de rigidité puis les fréquences propres et les modes propres de cette structure. Pour cela, on doit introduire les paramètres mécaniques du stator ainsi que ceux de la carcasse. Donc, nous devons introduire le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la masse volumique (tableau IV.2).

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

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

Le champ magnétique (potentiel vecteur magnétique), les forces magnétiques ainsi que les vibrations sont calculés à partir du code de calcul déjà développé. Les différentes étapes de ce dernier sont regroupées dans l'organigramme ci-dessous.

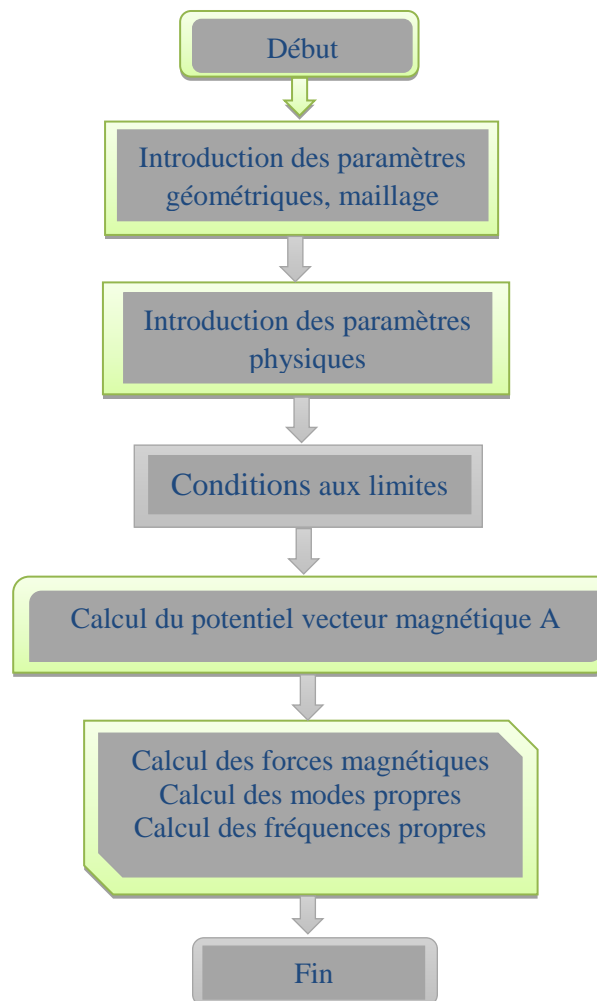


Figure IV.2. Différente étapes du code de calcul magnéto-mécanique appliqué

Le maillage éléments finis adopté pour cette étude est généré par le mailleur automatique du logiciel Matlab. Il doit être bien affiné au niveau de l'entrefer. On doit avoir au moins deux mailles à ce niveau pour que la solution soit exacte. Les éléments constituant ce maillage sont des éléments triangulaires du premier ordre (figure IV.3).

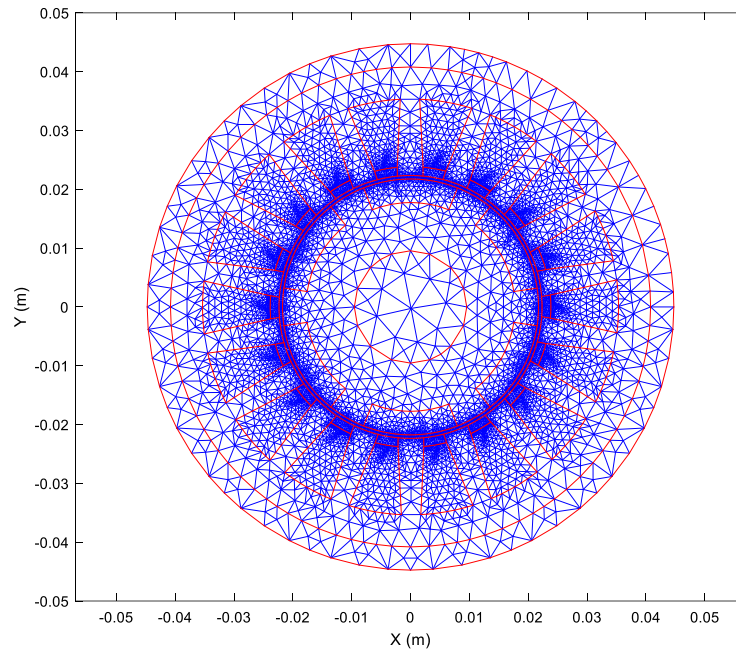


Figure IV.3. Maillage élément finis adapté à cette étude

La figure ci-dessous présente les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique. 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

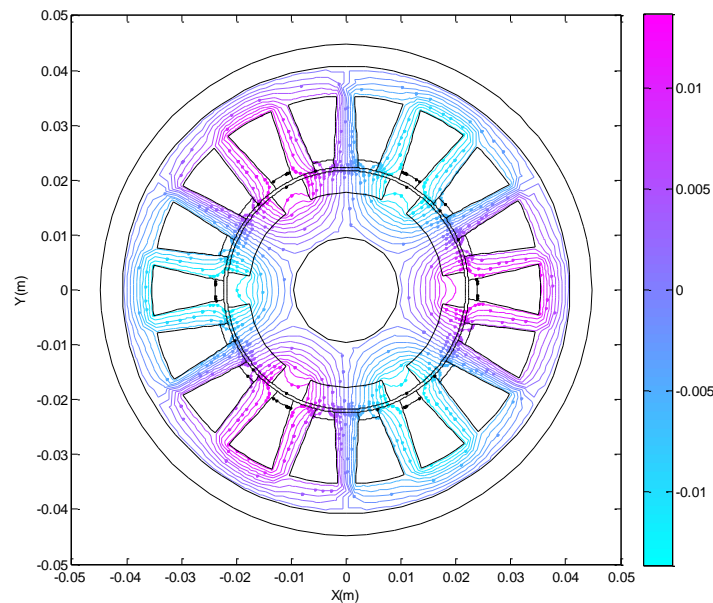


Figure IV.4. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique

L'évolution de la force magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques est présentée dans la figure ci-dessous. On remarque clairement une distribution non uniforme de cette force (présence d'aimants et d'encoches).

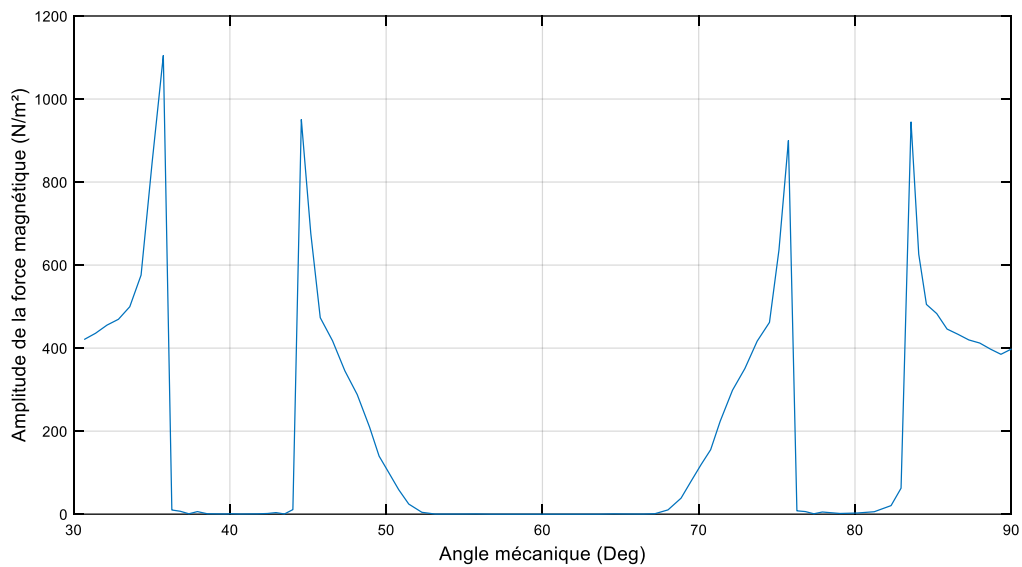


Figure IV.5. Evolution de la force magnétique suivant un contour passant par les dents statoriques

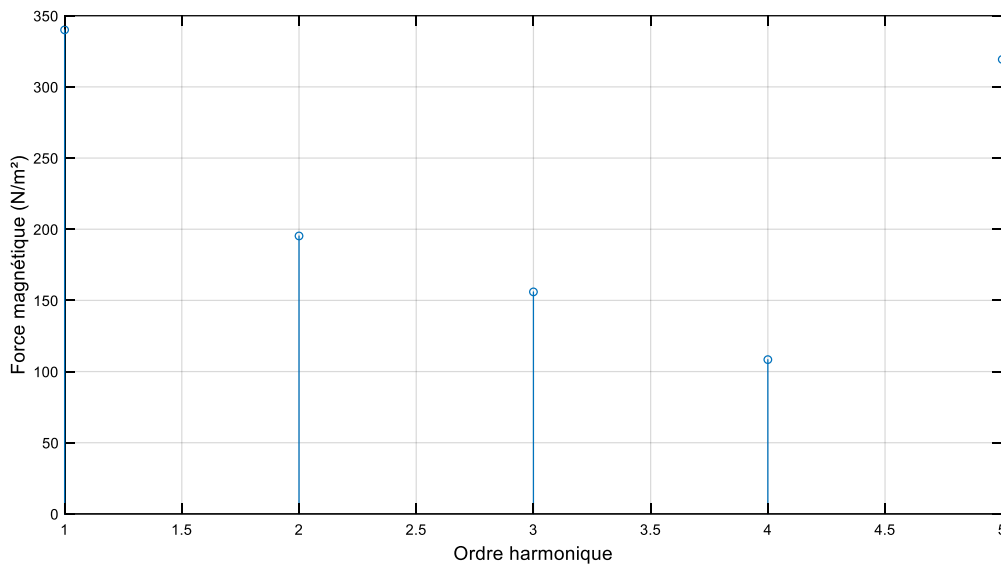


Figure IV.6. Spectre fréquentiel de la force magnétique

La figure IV.6 montre le spectre fréquentiel de la force magnétique. Ce spectre est riche en harmoniques. Ceci revient à la distribution non uniforme de la force dans l'entrefer. Ces harmoniques sont l'origine principale des vibrations générées par la machine.

Pour calculer les vibrations de la machine on a considéré les déplacements/accélérations des nœuds situés sur la surface externe de la carcasse. Les figures ci-dessous présentent, respectivement, les déplacements ainsi que les accélérations obtenus sur la carcasse. On a

considéré une période mécanique (un pas polaire).

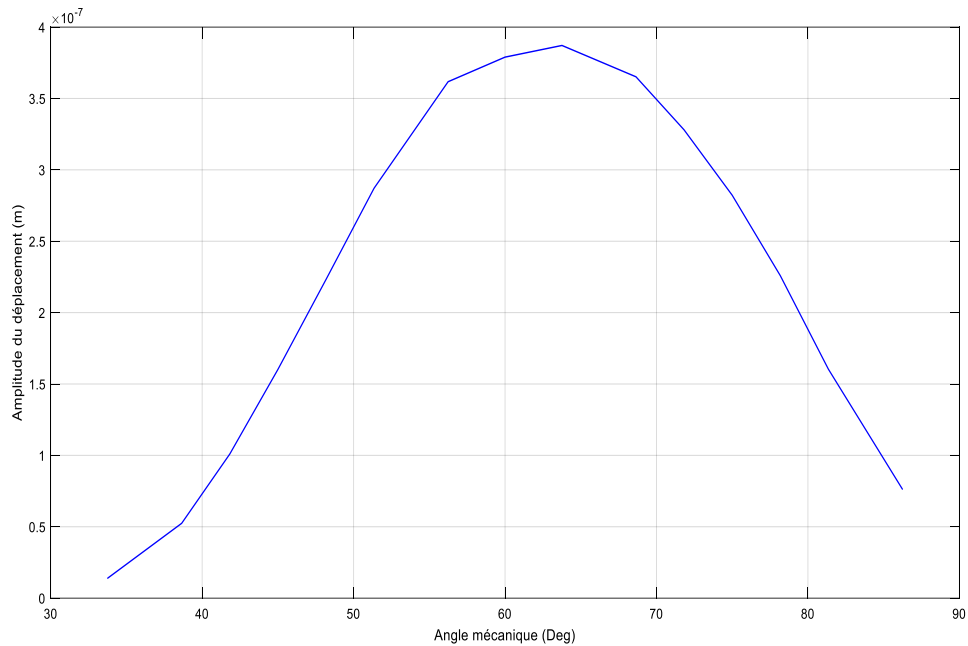


Figure IV.7. Déplacement obtenu sur la surface externe de la machine

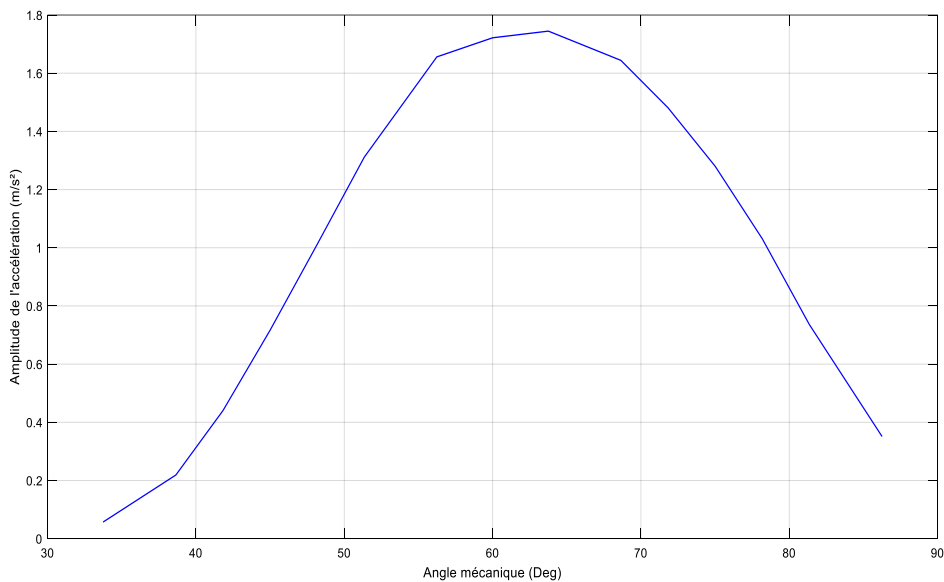


Figure IV.8. Accélération obtenue sur la surface externe de la machine

IV.5. Caractérisation des défauts de la MSAP

Le but de ce travail est la caractérisation des défauts qui peuvent survenir dans une machine électrique, plus précisément dans une MSAP. Dans ce souci, deux codes de calcul ont été élaborés, un pour la caractérisation de défauts de fissures d'aimants et l'autre pour la caractérisation de défauts de désaimantation des aimants et de déséquilibre des phases.

Pour créer ces défauts, on a intervenu au niveau de l'introduction des paramètres géométriques et physiques de la machine.

Le processus élaboré est constitué d'un programme principal utilisant la méthode des algorithmes génétiques (AG) pour réaliser le problème inverse qui cherche à déterminer les paramètres du défaut donnant un déplacement proche de celui mesuré. De plus, ce processus contient deux fonctions, une correspond à la fonction objectif qui détermine l'écart entre les valeurs mesurées et celles calculées du déplacement et l'autre correspond au problème direct (problème magnéto-mécanique) qui cherche les déplacements/accélérations correspondant à chaque jeu de paramètres donné par le programme principal. Les organigrammes correspondants sont présentés dans le troisième chapitre.

IV.5.1. Caractérisation de défauts de fissure dans les aimants

IV.5.1.1. Cas d'une seule fissure dans un aimant

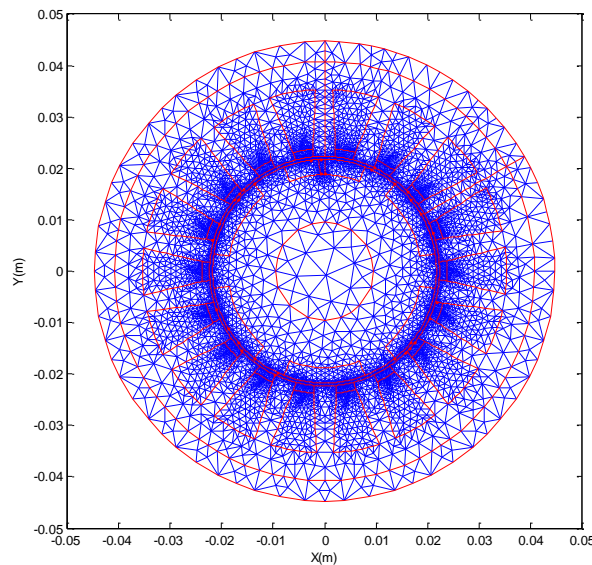


Figure IV.9. Maillage de la MSAP en présence de défaut d'une seule fissure

Dans ce cas, pour créer ce type de défauts, on a intervenu au niveau du dessin de la machine en ajoutant deux segments tel qu'il est montré dans la figure IV.9. Donc, on a créé une région supplémentaire à l'intérieur de l'aimant. Les propriétés électriques et magnétiques correspondantes sont celles de l'air.

On a utilisé la fonction `ga` de Matlab qui correspond au programme de l'AG. La représentation normalisée est utilisée pour représenter les paramètres, le croisement uniforme et la mutation gaussienne sont utilisés, et une population initiale de taille 10 est

construite de façon aléatoire. A chaque génération nous choisissons les paramètres ayant les six meilleures fonctions objectives comme des nouveaux parents pour la prochaine itération (génération).

La figure ci-dessous montre l'évolution de la fonction objectif en fonction des itérations. On remarque qu'elle converge après 16 itérations. Elle diminue en fonction des itérations jusqu'à atteindre un écart minimal entre les déplacements (vibrations) calculés et mesurés. Les paramètres obtenus correspondent aux paramètres caractérisant le défaut (tableau IV.3).

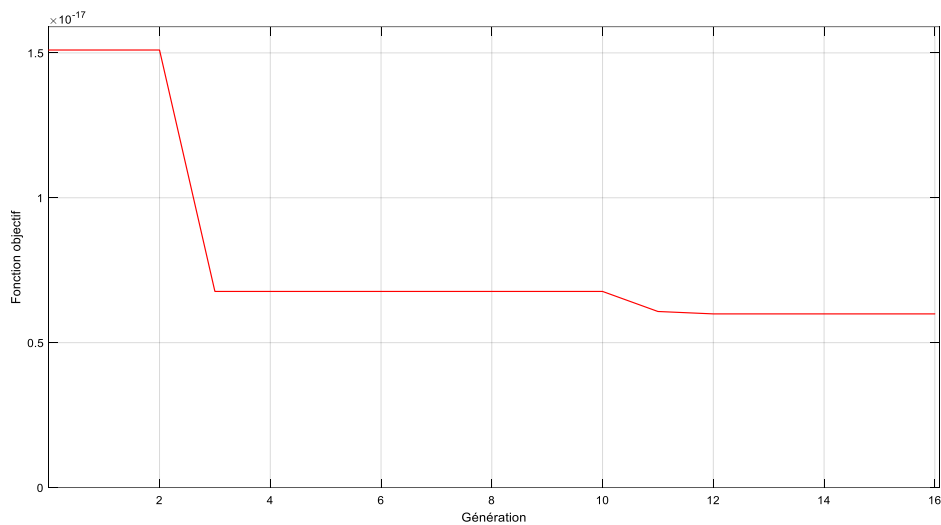


Figure. IV.10. Fonction objectif dans le cas d'une seule fissure

Les déplacements, calculé et mesuré, sont présentés dans la figure ci-dessous. On remarque bien que les deux courbes sont presque identiques. Donc, on a pu définir des paramètres de défaut très proches de ceux réels. En introduisant ces paramètres dans le code de calcul on a pu obtenir la géométrie de la machine avec défaut présentée dans la figure IV.12.

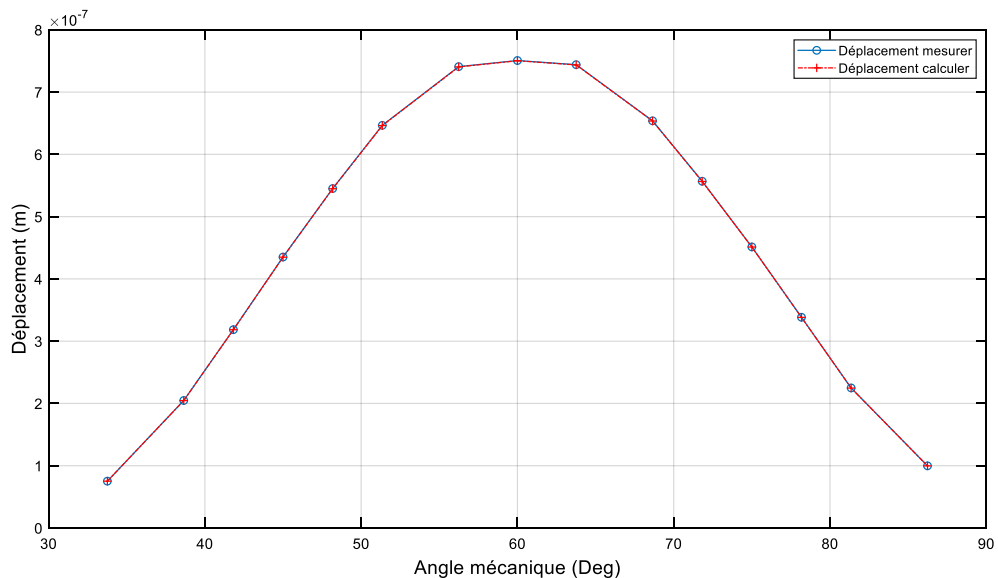


Figure. IV.11. Présentation des déplacements calculé et mesuré

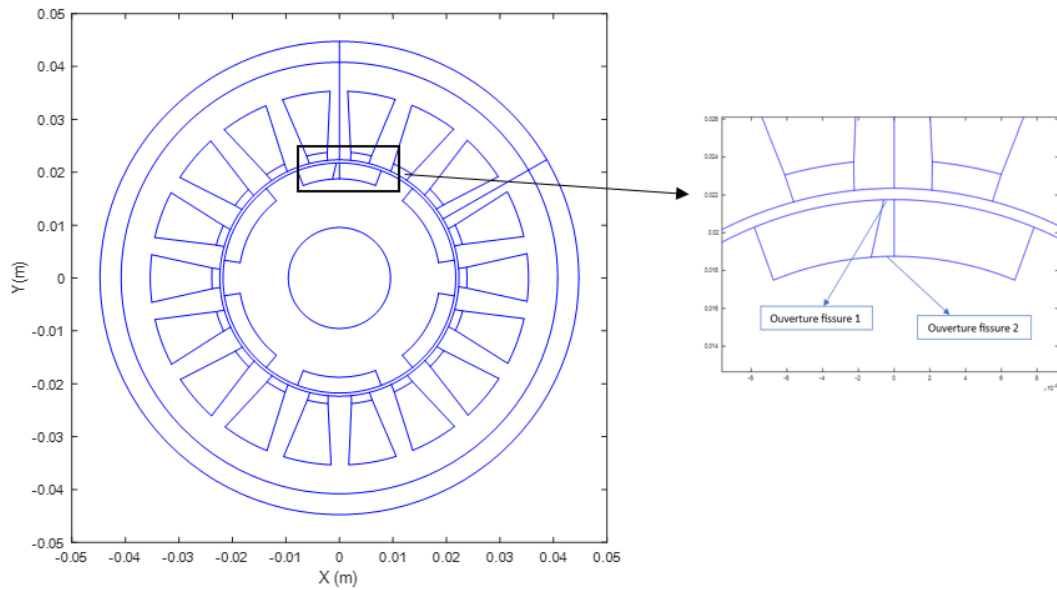


Figure IV.12. Géométrie de la machine avec le défaut caractérisé

Tableau IV.3. Paramètres obtenus du défaut

Paramètres du défaut	Valeurs	Temps de calcul (s)
Ouverture 1 (Deg)	3.27	2539.8
Ouverture 2 (Deg)	2.21	

IV.5.1.2. Cas de deux fissures dans deux aimants

Même procédure que pour le cas précédent. Pour créer ce défaut, on a intervenu au niveau du dessin de la machine en ajoutant quatre segments tel qu'il est montré dans la figure IV.13. Donc, on a créé deux régions supplémentaires à l'intérieur de deux aimants. Les propriétés électriques et magnétiques de ces régions sont celles de l'air.

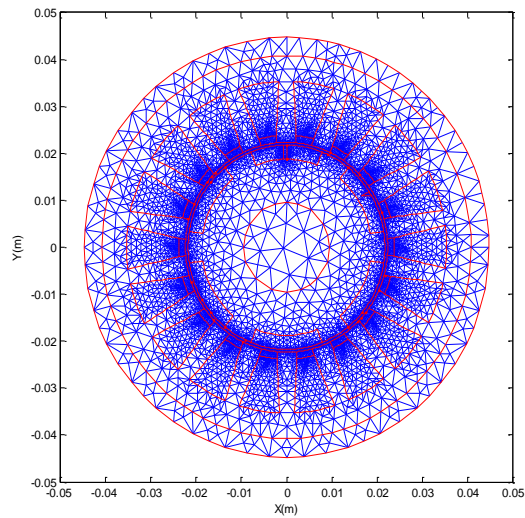


Figure IV.13. Maillage de la MSAP en présence de défaut de deux fissures

La figure IV.14 montre l'évolution de la fonction objectif en fonction des itérations. On remarque qu'elle diminue en fonction des itérations jusqu'à atteindre un écart minimal entre les déplacements calculés et mesurés après 16 itérations. Les paramètres obtenus correspondent aux paramètres caractérisant le défaut (tableau IV.4).

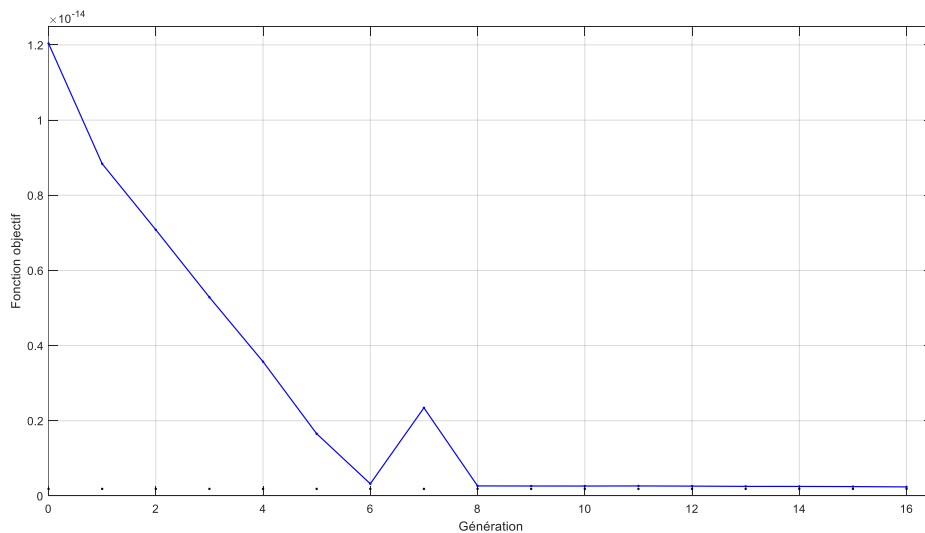


Figure. IV.14. Fonction objectif dans le cas de deux fissures

La figure ci-dessous présente le déplacement calculé ainsi que celui mesuré. On remarque bien qu'ils sont très proches. Donc, on a pu définir des paramètres de défaut très proches de ceux réels. La géométrie de la machine avec le défaut caractérisé (figure IV.16) est obtenue en introduisant ces paramètres dans le code de calcul magnéto-mécanique.

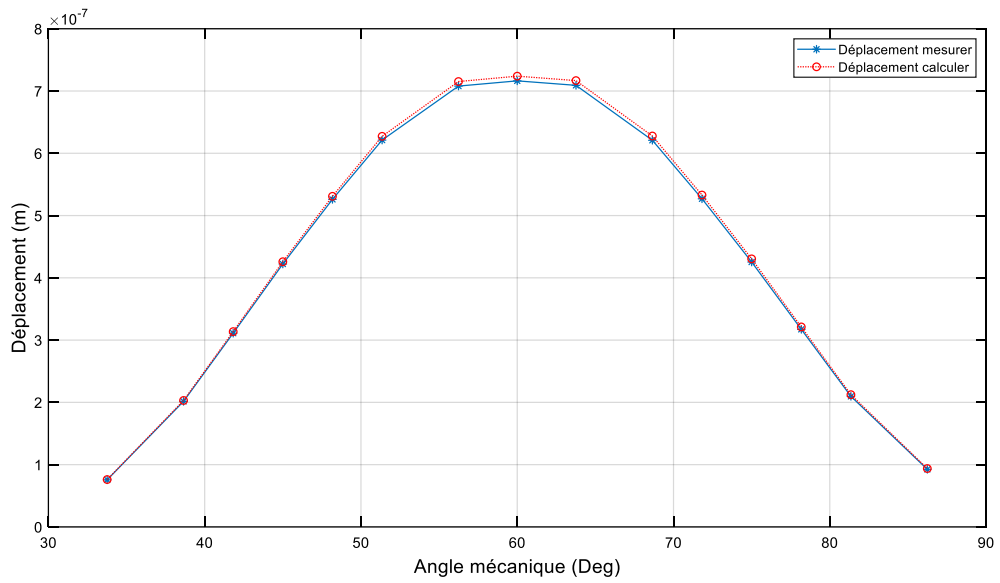


Figure IV.15. Déplacements calculer et mesurer en présence de défaut de fissure dans deux aimants

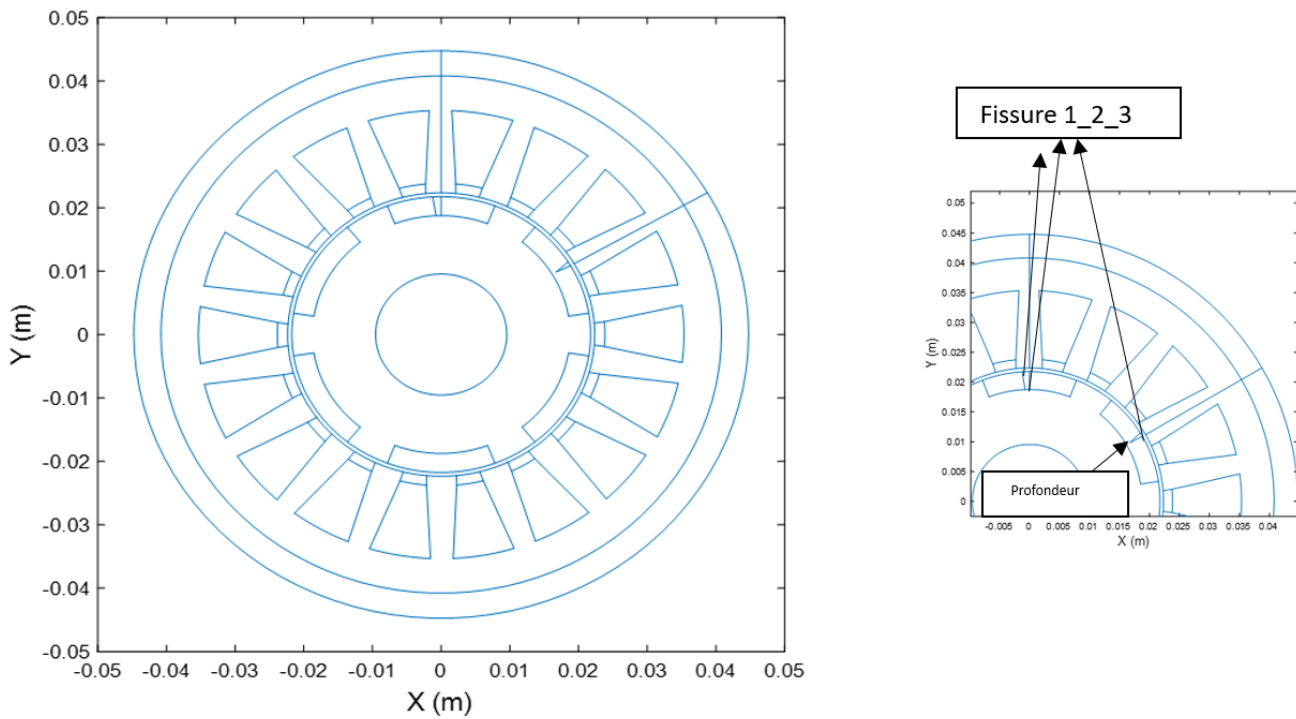


Figure IV.16. Géométrie de lamachine en présence de défaut de fissure dans deux aimants

Les paramètres qui caractérisent les deux fissures ainsi que le temps de calcul sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4. Paramètres obtenus des deux fissures

Paramètres du défaut	Valeurs	Temps de calcul (s)
Ouverture 1 (Deg)	3.24	820.7
Ouverture 2 (Deg)	2.25	
Ouverture 3 (Deg)	1.82	
Profondeur (m)	0.0023	

IV.5.2. Caractérisation de défauts de désaimantation des aimants et de déséquilibre de phases

Dans ce cas, pour créer ce type de défauts, on a intervenu au niveau des paramètres physiques de la machine (alimentation + aimants). On a considéré un déséquilibre dans les phases 1 et 2 et une désaimantation de deux aimants. Donc, on a quatre paramètres de défaut à déterminer.

Comme dans le cas précédent, la fonction *ga* de Matlab a été utilisée. La représentation normalisée est utilisée pour représenter les paramètres, le croisement uniforme et la mutation gaussienne sont utilisés, et une population initiale de taille 10 est construite de façon aléatoire. A chaque génération nous choisissons les paramètres ayant les six meilleures fonctions objectives comme des nouveaux parents pour la prochaine itération (génération).

Donc, le problème à traiter revient à résoudre, en utilisant la technique des AGs, le problème inverse suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \left(g = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (d_{i \text{ calc}} - d_{i \text{ mesu}})^2 \right) \\ 3 \leq I_1 \leq 10; \quad 1 \leq I_2 \leq 8; \quad 0 \leq B_{aim1} \leq 0.4; \quad 0 \leq B_{aim2} \leq 0.7 \end{array} \right. \quad (\text{IV.2})$$

Avec N c'est le nombre de nœuds sur la surface externe de la machine, g c'est la fonction objective à minimiser, I_1 , I_2 , B_{aim1} et B_{aim2} sont les paramètres de défauts à rechercher.

L'évolution de la fonction objectif en fonction des itérations est présentée dans la figure ci-dessous. On remarque qu'elle diminue jusqu'à atteindre un écart minimal entre les déplacements calculés et mesurés (elle converge après 11 itérations).

Les paramètres obtenus correspondent aux paramètres caractérisant les deux défauts: déséquilibre de phases et désaimantation des aimants. Ils sont regroupés dans le tableau IV.5.

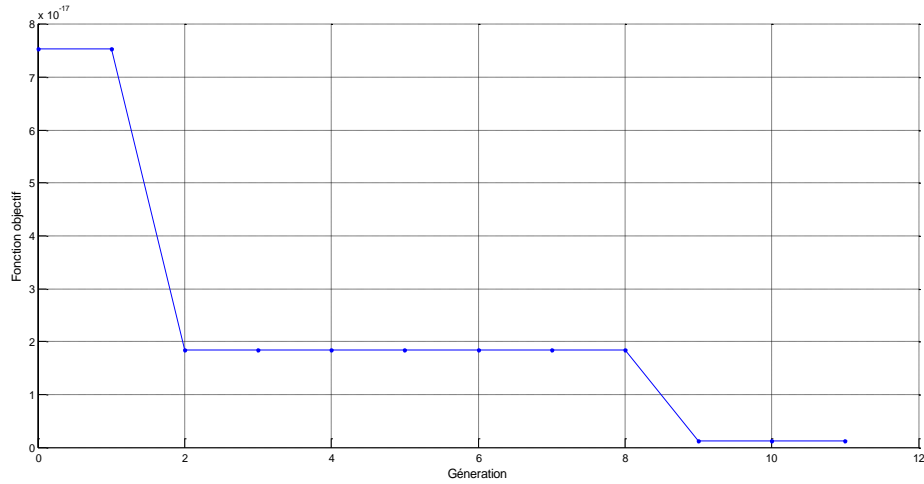


Figure IV.17. Fonction objectif pour la caractérisation de défauts de déséquilibre de phases et de désaimantation

Le déplacement calculé ainsi que celui mesuré en présence de ces défauts sont présentés dans la figure ci-dessous. On remarque bien qu'ils sont très proches. Donc, on a pu définir des paramètres de défaut très proches de ceux réels.

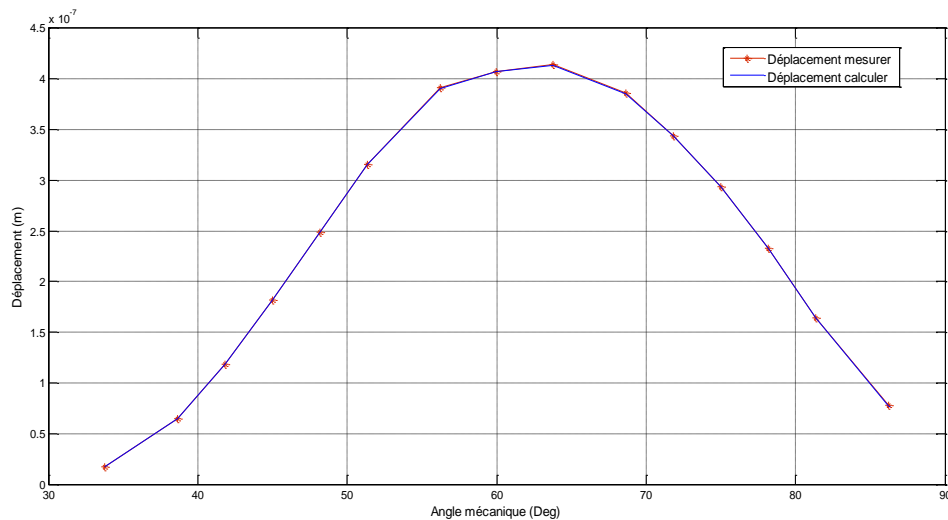


Figure IV.18. Déplacements calculer et mesurer en présence de défauts de déséquilibre de phases et de désaimantation

Tableau IV.5. Paramètres obtenus des défauts

Paramètres des défauts	Valeurs	Temps de calcul (s)
I_1 (A)	5.26	7491.4
I_2 (A)	4.1	
B_{aim1} (T)	0.1	
B_{aim2} (T)	0.6	

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'exploitation des modèles numériques développés pour le CND d'une MSAP par analyse vibratoire.

Trois applications ont été effectuées. Premièrement on a considéré le défaut d'une fissure dans un aimant. Ensuite, on a pris le cas de deux fissures dans deux aimants différents. En fin on a considéré les défauts de déséquilibre de phases et de désaimantation des aimants permanents.

Les résultats obtenus ont bien montré le grand intérêt de la technique d'analyse vibratoire dans le domaine du CND des machines électriques (caractérisation des défauts de la machine).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le CND présente un spectre disciplinaire très large et il joue un rôle crucial dans le contrôle de qualité des produits en cours de fabrication. Il est aussi utilisé pour le suivi de l'état d'un matériel en cours d'utilisation, lors d'opérations de maintenance ou à la suite de détection d'anomalies de comportement, afin de localiser et caractériser des défauts.

Le travail présenté dans ce mémoire traite le contrôle non destructif (CND) par analyse vibratoire des machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Il a visé plus particulièrement les défauts de fissure et de désaimantation des aimants ainsi que le défaut de déséquilibre de phases.

Dans ce but, nous avons développé et exploité des modèles numériques multi-physiques permettant la caractérisation des défauts de la MSAP. Sachant que la résolution du problème direct (programme magnéto-mécanique) est effectuée en utilisant un code de calcul déjà développé. Ce modèle tient compte de paramètres divers d'ordre électrique, mécanique et géométrique comme par exemple, la hauteur des dents, l'épaisseur de la culasse, l'ouverture des aimants, les courants statoriques, la perméabilité des circuits magnétiques.... Ces codes de calcul basés sur la méthode des éléments finis (MEF) ont été développés sous environnement Matlab.

La première étape indispensable, lors de la détermination des vibrations d'origine magnétique est le calcul de la distribution du champ magnétique dans la machine. Ensuite, il faut déterminer les forces magnétiques exercées sur le stator. La deuxième étape est le calcul de la réponse dynamique de l'ensemble stator-carcasse aux sollicitations de ces forces. Dans ce but, nous avons exploité un code de calcul mécanique 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 / accélération) de n'importe quel point de l'ensemble stator-carcasse.

Dans cette étude, le problème de CND de la MSAP par analyse vibratoire a été transformé en un problème inverse qui a été formulé mathématiquement en se basant sur la méthode des algorithmes génétiques (AG). Les paramètres du défaut sont obtenus lorsque les écarts entre les déplacements calculés et mesurés deviennent minimaux (convergence de l'AG).

Les MSAP sont soumises à de nombreux types de défauts. Ces derniers peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur les accouplements, usure des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, fissures des aimants,

désaimantation des aimants ...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques...). Dans cette étude, en se basant sur cette nouvelle démarche du CND des machines électriques, on a pu caractériser les défauts cités plus haut (fissure et désaimantation des aimants + déséquilibre de phases) et on a pu obtenir des résultats très satisfaisants.

En conclusion, on peut dire que les vibrations sont des indicateurs objectifs de l'état de santé des machines électriques. Ainsi, le suivi vibratoire apporte la connaissance de l'état réel de la machine. A tout moment, il permet de suivre son évolution donc de programmer l'arrêt du système.

La limite principale de cette technique est le temps important que nécessite le problème direct (problème magnéto-mécanique). Cette démarche est devenue, aujourd'hui, possible, grâce à l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs et aux développements réalisés dans le domaine de l'optimisation.

Comme perspectives, cette étude pourrait être élargie en considérant d'autres types de défauts tels que l'excentricité, le décalage des aimants, la rupture de barres et d'anneaux de court-circuit dans les machines asynchrones....

De plus, l'intelligence artificielle peut être utilisée pour remplacer le problème direct dans le processus du CND. Ceci, en remplaçant le code de calcul magnéto-mécanique (problème direct) par un réseau de neurones.

Donc, pour remédier au problème de temps de calcul, on peut faire recours à l'intelligence artificielle. Dans ce cas, l'approche proposée pourrait être d'un intérêt majeur pour les problèmes 3D impliquant un nombre plus important de degrés de liberté et un temps de calcul plus important que les problèmes 2D.

Références

Références

- [1] Benhadda, N. (2006). Modélisation des capteurs inductifs à courants de Foucault (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [2] KHEBAL Merwane, DALI Abderrahmane, « contrôle Non Destructif par Flux de Fuite Magnétique Appliqué aux Pièces Ferromagnétiques », Université de m'sila, mémoire de Master 2019.
- [3] BOUDJERADA Moufida, TOUNSI Bilal, Contrôle Non Destructif (CND), « Approche Expérimentale pour un Contrôle par Ondes ultrasonores et Radiographique » Université Mohamed Boudiaf-M'sila, Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique 2020
- [4]AzouaouBerkache, « Modélisation de structure CND par la méthode des éléments finis stochastique », Mémoire de Fin d'Etude de MASTER ACADEMIQUE, Université Mouloud Mammedi de Tizi-Ouzou, 2015.
- [5] Abdelhak Abdou, «Contrôle Non Destructif par Courants de Foucault Etude et Réalisation d'un Capteur Inductif», Mémoire de Magistère en Électrotechnique, Batna 2006.
- [6] Ala-Eddine Lakhdari, « Etude et modélisation de capteurs en CND par courants de Foucault : application à la détection des fissures », mémoire de Master 2011.
- [7]Mohammed Chebout, « Utilisation des techniques électromagnétiques du contrôle non destructif par courants de Foucault pour la détermination de forme des défauts », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Seddik Ben Yahia de Jijel, 2019.
- [8]Benhadda Nabil, « Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif », Thèse de Doctorat.
- [9]Djamel EddinAbdelli , «Estimation de la probabilité de détection dans le contrôle non destructif par courants de Foucault», Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra, 2021.
- [10] BOUABDALLAH, ELHADJ, and MAROUANE MATALLAH. Réalisation d'une maquette didactique pour les mesures CND «courant Foucault». Université de Kasdimerbahouargla.
- [11]Monsieur Yohan Le DIRAISON « Imagerie à courants de Foucault pour l'évaluation non-destructive de structures rivetées aéronautiques ».Thèse de Doctorat, de l'école normale supérieure Cachan 2008.
- [12] Makhoulf Abdellah, and Amel Zobiri, « Etude et réalisation d'un dispositif de détection de défauts par courants de Foucault », Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2021.
- [13] BELKHEMMAR BILEL, BOURMEL MOHCEN. "Etude et calcul de l'effet de la conductivité t dans un capteur absolu par le contrôle non destructif par courant de Foucault."

- [14]Y. Choua, « Application de la méthode des éléments finis pour la modélisation de configurations de contrôle non destructif par courants de Foucault », Thèse de doctorat, Orsay, Université Paris Sud - Paris XI, Français.2009.
- [15]Mr : BouamamaMerabet et FaresCharaa « Etude comparative entre les méthodes de CND pour la détermination des défauts :application aux vordons de soudure (contrôle par ultrasons et radiographie à l'entreprise ALFAPIPE) », Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, 2018.
- [16] Bochra Meriem OUASSIL et Mehdi Nassim CHEHEB, « Détection des défauts de soudage et protection radioactive Cas de le SONATRACH d'Arzew-complex GPIZ ». Diss, 2020.
- [17] BENHADDA, Nabil. Modélisation et Etude pour la Réalisation d'un Capteur à Courants de Foucault en Mode Différentiel pour le Contrôle non Destructif (CND). Diss. Université de Batna 2, 2015.
- [18] Oussama, B. (2012). Contrôle non destructif par courants de Foucault. Université de Msila.
- [19] Aoufi Mahfoud, Khodja Lakhdar, « Etude et réalisation d'un banc d'essai dédiée aux applications du contrôle non destructif par courants de Foucault »Université de m'sila, mémoire de Master 2019.
- [20] Abdelhak, A. (2018). "Contrôle non Destructif (CND) :Étude et Modélisation d'un Capteur Inductif à Courant de Foucault". Batna: Université de Batna 2.
- [21] Houda Zaidi, « Méthodologies pour la modélisation des couches fines et du déplacement en contrôle non destructif par courants de Foucault : application aux capteurs souples ». Thèse de Doctorat, Université Paris –Sud, 2012.
- [22] OukacineNacima « Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive », Diss, Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [23] HoussamBoughedda, « Modélisation et Conception de Capteurs Électromagnétiques Acoustiques (EMAT) Pour le Contrôle Non Destructif », Thèse de Doctorat Université Mohammed Seddik Benyahia– Jijel, 2022.
- [24] Mouloud A., « Recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires », thèse de doctorat, Université de Sétif, 2015
- [25] BoughaghaFouzi. « Thème Diagnostic et détection des défauts mécaniques affectant les systèmes électromécaniques » Année 2019
- [26] : Aubert, B. (2014). Détection des courts-circuits inter-spores dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents: Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu (Doctoral dissertation).

- [27] : Raison, B. (2000). Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [28] : M'HAMED, Lamari. Modélisation et détection de défauts de courts-circuits statotriques dans une machine synchrone à aimants permanents. 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [29] : BAZI, S. (2016). Contribution à la Détection et au Diagnostic des Défauts dans un Système Machine à Induction-Convertisseur (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [30] : CHACHOUA, S. (2020). Régulation de la tension par DVR commandé en tension par régulateur fractionnel (Doctoral dissertation).
- [31] : Khov, M. (2009). Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents: Détection des courts-circuits par suivi paramétrique (Doctoral dissertation).
- [32] : Younsi, I., Benghedier, H., & Ferkha, N. E. (2021). Diagnostic des défauts d'une MSAP à flux radial (Doctoral dissertation, Université de Jijel)..
- [33] : Farooq, J. A. (2008). Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents (Doctoral dissertation, Éditeur inconnu).
- [34] : Ceban, A. (2012). Méthode globale de diagnostic des machines électriques (Doctoral dissertation, Artois).
- [35] : Alameh, K. (2017). Contribution au diagnostic et a l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation, Normandie).
- [36] : Farooq, J. A. (2008). Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents (Doctoral dissertation, Éditeur inconnu).
- [37] : Amar, S. A. (2018). Contribution de la Technique de la Logique Floue pour le Diagnostic des Défauts Statoriques dans la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun).
- [38] : Vaseghi, B. (2009). Contribution a l'etude des machines electriques en presence de défaut entre-spires Modélisation–Réduction du courant de défaut (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL).
- [39] Kerbouche, Mohammed Yahia, Daoud Boutaghane, and Zoubida Encadreur Belli, « Approche analytico-numérique pour la modélisation des régions conductrices en régions conductrices en régime magnétodynamique » Diss. Université de Jijel, 2022.
- [40] C.Labioud, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable», thèse de magister, Université de Biskra, 2014.

- [41] Tarek, Bouchala. Application des RN pour la Caractérisation Géométrique d'un Défaut 3D par CF.Diss
- [42] Derouiche, Seif-eddine, Mohamed DéyaaEl-hakKahlat, « Réduction des vibrations d'une machine électrique en agissant sur ses propriétés physique »Diss, université de jijel.2013.
- [43] Golovanov, C. (1997). « Développement de formulations éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique: application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement » Doctoral dissertation, université politechnicaBucuvesti.
- [44] Zaouia, M. (2013). Modélisation numérique du couplage électromagnétique-mécanique dans les structures linéaires tubulaires (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou).
- [45] 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.
- [46].Hamdi, Seyf Eddine. "Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL-Multiphysics." (2018).
- [47].BOUROUIAH.S, Hala.M, Etude de l'influence de l'emplacement des aimants dans le rotor sur le comportement vibratoire d'une MSAP à flux radial, mémoire de master, université de Jijel, 2016.
- [48] Adil, Mr. HAMADOU, and Mr NESSISSEN Abdelkader "Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil." Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention de diplôme Master En Génie électrique (2015).
- [49]Merzouki, Tarik. Modélisation couplée électrique-magnétique-mécanique des machines asynchrones à cage en régime transitoire par la méthode des élément finis. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2009.
- [50]Z. Lagoune, « Commande par hysteresis d'une machine synchrone a aimants permanents en utilisant maxwell-simplorer », These de Master, Université de Setif-1, 2011.
- [51] Boutbiba Walid « Diagnostic d'une MSAP par analyse vibratoire », mémoire de master, Université de Jijel, 2022.
- [52] SafiaFerkha& Zineb Belkhelfa, « Modélisation et diagnostic des défaillances d'une MAS par analyse de ses grandeurs électromagnétiques », mémoire de master, Université de Jijel, 2018.
- [53] A. Belahcen, « Methods of calculating the magnetic forces for vibration and noise analysis in electrical machines », ACTA Polytechnica Scandinavia, Electrical engineeringseries, n° 103, Finish Academies of Technology. Espoo, Finland, 2000.

[54] 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.