الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلـمـــــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : MAI

Thème

Contribution en amélioration de la distinction entre le défaut de démagnétisation et ce de l'excentricité d'un moteur synchrone à aimant permanent par la méthode SVM

Présenté et soutenu publiquement par :

BOUHAMAMA Moussa & BERRAMDANE Mohammed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mm. L.BELKHODJA	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Présidente
Mr. NEKROUF Djilali	MAA	Univ. Oran-2, IMSI	Encadrant
Mm. D.GENDOUZ	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	Examinatrice

Année 2024/2025

Remerciement

Nous remercions avant tout, Dieu le tout puissant de nous avoir indiqué le chemin du savoir, de nous avoir donné la passion et la patience d'accomplir ce travail.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Mr.NEKROUF Djilali. Ses encouragements constants, sa bienveillance et ses précieux conseils ont été une source inestimable de motivation et de guidance tout au long de ce projet. Son expertise et son dévouement m'ont permis de surmonter de nombreux obstacles et d'atteindre les objectifs fixés.

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury qui nous ferons l'honneur de juger notre travail, et pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives qui nous permettrons d'améliorer notre projet.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'accomplissement de ce projet. Leur soutien moral, leurs encouragements et leurs conseils nous ont été d'une aide précieuse.

Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à :

A mes chers parents.

A mes chers frères et ma sœur.

A tous mes amis.

Mon encadrant Mr. NEKROUF Djilali.

Toute personne qui m'a souhaité la réussite et m'a soutenu au long de ma carrière universitaire.

Moussa

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à ceux qui ont beaucoup sacrifié de leur temps

pour mon bonheur et ma réussite. Aux être les plus chers et les plus proches au

monde et qui symbolisent le courage et la tendresse,

Mes très chers parents.

A mes sœurs.

A tous mes amies

Mon encadrant Mr. NEKROUF Djilali.

Et à tous ce qui m'aiment et qui me connaissent de près ou de loin.

Mohammed

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur la détection et la classification des défauts dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP), en combinant l'analyse spectrale haute résolution **ROOT-MUSIC** et la méthode de classification supervisée **SVM**. L'objectif principal est de séparer efficacement les défauts d'**excentricité** et de **désaimantation**, et de valider expérimentalement les performances de cette approche hybride.

Un banc d'essai a été conçu pour créer des scénarios de défauts : l'excentricité a été induite par la modification des bagues de roulements, tandis que la désaimantation a été simulée par le remplacement partiel des aimants par un matériau ferromagnétique. Les signaux électriques ont été mesurés par des capteurs de courant et de tension, puis analysés à l'aide de la méthode ROOT-MUSIC, permettant d'extraire les composantes fréquentielles caractéristiques de chaque défaut.

Les données spectrales obtenues ont ensuite été utilisées comme vecteurs d'entrée pour un classificateur **SVM**, qui a permis de distinguer avec précision les deux types de défauts, même lorsque leurs signatures étaient proches. Les résultats ont montré une séparation nette entre les défauts, avec une précision élevée, confirmant la pertinence de cette double approche pour le diagnostic avancé des MSAP.

Cette méthode intégrée offre une solution fiable, rapide et exploitable dans un cadre industriel, en vue d'une maintenance prédictive efficace et d'un renforcement de la sûreté de fonctionnement des machines tournantes.

Abstract

This final-year project focuses on the detection and classification of faults in Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSMs) by combining high-resolution spectral analysis (**ROOT-MUSIC**) with supervised classification using **Support Vector Machines (SVM)**. The main objective is to effectively separate **eccentricity** and **demagnetization** faults and to experimentally validate the performance of this hybrid approach.

A test bench was designed to simulate fault scenarios: eccentricity was introduced by modifying bearing rings, while demagnetization was simulated by partially replacing magnets with ferromagnetic material. Electrical signals were measured using current and voltage sensors, then analyzed using the ROOT-MUSIC method, enabling the extraction of characteristic frequency components for each fault.

The spectral data obtained were used as input features for an **SVM classifier**, which successfully distinguished between the two types of faults, even when their frequency signatures were close. The results showed a clear separation of faults with high accuracy, confirming the relevance of this dual approach for advanced fault diagnosis in PMSMs.

This integrated method offers a reliable, fast, and industry-ready solution for predictive maintenance and improved operational safety of rotating electrical machines.

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
MSAP :	**Moteur synchrone à aimants permanents**
MCC :	**Machine à courant continu**
MSAPSB :	**Machine à aimants permanents sans balais**
Sm-Co:	**Samarium-Cobalt**
FFT:	**Fast Fourier Transform**
DMF :	**Défaut de Désaimantation**
DE :	**Défaut d'excentricité**
HR :	**Haute Résolution**
Lq :	**la Réactance Synchrone sur l'axe q**
Ld :	**la Réactance Synchrone sur l'axe d**
MSAP-FA :	**Moteur synchrone à aimants permanents à Flux Axial**
NdFeB :	**Néodyme-Fer-Bor**
MUSI :	**Multiple Signal classification**
SVM :	**Support vecteur machine**

Table des matières

Introduction générale **:** 1

Chapitre I : généralitées sur les MSAP

I.1 Introduction 4
I.2 Généralités sur les MSAP 4
I.3 Domaines d'application 6
I.4 Différents types de machines à aimants permanents 6
I.4.1 Les machines à courant continu à aimants permanents (MCC) 6
I.4.2 Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB) 7
I.5 Différentes structures de la machines synchrones à aimants permanents 8
I.5.1 Les machines à flux radial 8
I.5.2 . Machines synchrones à aimants permanents à flux axial (MSAP-FA) 12
I.5.3 Machines synchrones à aimant permanent à flux transverse 14
I.6 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents 15
I.6.1 Le stator 15
I.6.2 Le rotor 16
I.7 Principe et modes de fonctionnement 17
I.8 Avantages de la machine synchrone à aimants permanents 17
I.9 Inconvénients d'utilisation de la machine synchrone à aimants 18
I.10 Les types d'aimants permanents dans la MSAP 18
I.10.1 Les ferrites 18
I.10.2 Terre rares 18
I.10.3 Alnico 19
I.10.4 Les aimants métalliques 19
I.10.5 Le samarium cobalt (SmCo5, Sm2Co17) 19
I.10.6 Le Néodyme-Fer-Bor 19
I.11 Les organes mécaniques 21
I.12 Situation des défaillances dans la MSAP 21
I.13 Etude statistique sur les défauts dans les machines électriques 23
I.13.1 Défaillance au rotor : 23
I.13.2 Défauts statoriques 27
I.14 Méthodes de diagnostic : 30
I.14.1 Méthodes externes : 31

I.14.2 Méthodes internes : 31
I.15 Conclusion : 32

Chapitre II : Méthode d'analyse spectrale ROOT-MUSIC

II.1 Introduction : 34
II.2 Les méthodes de Haute Résolution (HR) 34
II.2.1 Méthode de Prony 35
II.2.2 La méthode de Pisarenko 35
II.2.3 Classification des méthodes à haute résolution 35
II.2.4 L'algorithme MUSIC (Multiple Signal Classification): 36
II.2.5 La méthode ROOT-MUSIC : 36
II.2.6 Les étapes : 37
II.2.7 Estimation de puissances des harmoniques: 40
II.3 L'organigramme de l'algorithme ROOT - MUSIC : 42
II.4 Conclusion : 42

Chapitre III : La méthode SVM (support vector machine)

III.1 Introduction : 44
III.2 Historique : 44
III.3 Présentation de SVM : 45
III.4 Principes de fonctionnement général de la technique SVM : 46
III.5 Séparation linéaire et non linéaire : 46
III.6 Domaines d'applications : 47
III.7 Avantages des SVMs : 48
III.8 Inconvénients des SVMs : 48
III.9 Conclusion : 49

Chapitre IV : Résultats d'étude & Discussion

IV.1 Introduction : 51
IV.2 Description du Banc de Mesures : 52
IV.2.1 Moteur Synchrone à aimants permanents : 53
IV.2.2 Génératrice à courant continu : 54

IV.2.3 Onduleur triphasée : 54
IV.2.4 Carte dSPACE : 55
IV.2.5 Carte d'acquisition : 55
IV.2.6 Capteur de courant : 56
IV.2.7 Capteur de tension : 56
IV.2.8 Micro-ordinateur : 57
IV.3 L'application de la méthode ROOT-MUSIC : 57
IV.4 Détails et étapes des programmes MATLAB : 58
IV.5 Création des défauts : 58
IV.5.1 Création du défaut d'excentricité : 58
IV.5.2 Création du défaut de désaimantation : 59
IV.6 Signatures fréquentielles des défauts étudiés : 60
IV.7 Fonctionnement du moteur sain : 61
IV.8 Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité : 64
IV.9 Fonctionnement du moteur en présence du défaut de démagnétisation : 68
IV.10 Rapport entre la démagnétisation et l'excentricité : 71
IV.11 Observations et remarques : 72
IV.12 Différences entre les deux défauts : 72
IV.13 Résultats d'application de la méthode SVM : 72
IV.14 Conclusion : 75
Conclusion générale **81**

Listes des figures

Figure I.1 : Constitution du MSAP 5
Figure I.2 Représentation simplifiée d'un MCC 7
Figure I.3 Représentation simplifiée d'un MAPSB 8
Figure I.4 Vue schématique des machines : (a)flux radial, (b) flux axial 8
Figure I.5 Machine à aimants en surface 9
Figure I.6 Machine à aimants insérés 10
Figure I.7 Machine à aimants enterrés 11
Figure I.8 machines à concentration de flux 11
Figure I.9 Configuration des MSAP à flux axial 14
Figure I.10 Vue d'une machine à flux transverse 15
Figure I.11 Stator (induit) 16
Figure I.12 Rotor à aimants lisses (a) et à aimants saillants (b) 17
Figure I.13 Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte. 25
Figure I.14 Vue éclatée d'un roulement à bille 26
Figure I.15 Représentation de court-circuit entre spire, entre phase, phase et terre 29
Figure I.16 Différentes défauts statoriques 30
Figure II.1 L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC 42
Figure III.1 Hyperplan Optimal séparant les points des deux classes 46
Figure III.2 Transformation d'espace 47
Figure IV.1 Schéma synoptique du banc de mesure réalisé. 52
Figure IV.2 banc de mesures réalisé 53
Figure IV.3 MSAP utilisé 53
Figure IV.4 Photo de la génératrice utilisée 54
Figure IV.5 Photo de l'onduleur utilisée 54
Figure IV.6 Photo de l'onduleur utilisée 55
Figure IV.7 Photo de la carte d'acquisition utilisée 55
Figure IV.8 Capteur de courant FLUKE i30s 56
Figure IV.9 Capteur de tension TEKTRONIX P5200 56
Figure IV.10 Mécanisme de création du défaut d'excentricité 59
Figure IV.11 procédure de création de défaut de désaimantation 60
Figure IV.12 Moteur sain 10S essai 1 61
Figure IV.13 Moteur sain 10s essai 2 62
Figure IV.14 Moteur sain 20s essai 1 62
Figure IV.15 Moteur sain 20s essai 2 63
Figure IV.16 DE 30% 20s essai 1 65
Figure IV.17 DE 10% 10s essai2 65
Figure IV.18 DE 10% 10s essai 1 66
Figure IV.19 DE 20% 10s essai 1 66
Figure IV.20 DE 10% 20s essai 1 67
Figure IV.21 DE 20% 20s essai 1 67
Figure IV.22 DE 30% 10s essai 1 68

Figure IV.23 DMF 2 pôles 20s essai 2 69
Figure IV.24 DMF2 pôles 20s essai 1 69
Figure IV.25 DMF 2 pôles 10s essai 2 70
Figure IV.26 DMF 2 pôles 10s essai 1 70
Figure IV.27 DMF_1_pole_60S_3kHz_Essai_03 72
Figure IV.28 Dynamic_Eccentricity_20_percent_3_1_60S_3kHz_Essai_03 73
Figure IV.29 DMF_2_pole_10S_3kHz_Essai_05 73
Figure IV.30 Dynamic_Eccentricity_30_percent_2_2_10S_3kHz_Essai_05 74

Liste des tableaux :

Tableau I-1 Exemple de propriétés des aimants..... 20
Tableau I-2 Classification des défauts selon leurs origines 22
Tableau IV-1: Signatures fréquentielles des défauts étudiés..... 61
Tableau IV-2 Rapport entre les défauts..... 71

Introduction générale :

Les moteurs synchrones jouent un rôle fondamental dans de nombreuses applications industrielles, grâce à leur rendement élevé et à leur aptitude à maintenir une vitesse constante indépendamment des variations de charge. Toutefois, comme tout système électromécanique, ils sont sujets à différents types de défauts pouvant compromettre leur performance et leur durabilité. Parmi ces défauts, **la démagnétisation des aimants permanents** et **l'excentricité du rotor** sont parmi les plus fréquents et les plus critiques. La détection précoce et la séparation fiable de ces anomalies sont essentielles pour assurer une maintenance conditionnelle efficace et prévenir les défaillances majeures.

La démagnétisation survient lorsque les aimants permanents perdent une partie de leur magnétisation, souvent à cause de surcharges, de températures élevées ou de défauts de fabrication. Ce phénomène entraîne une baisse du couple moteur et une réduction de l'efficacité énergétique. Quant à l'excentricité, elle se manifeste sous deux formes : statique (décalage fixe entre le rotor et le stator) ou dynamique (décalage variable pendant la rotation), générant des vibrations et des déséquilibres magnétiques nuisibles.

Pour diagnostiquer ces défauts, l'analyse spectrale des signaux électriques ou vibratoires est largement utilisée. La méthode **ROOT-MUSIC** (Root-MUltiple SIgnal Classification) offre une haute résolution fréquentielle, permettant de détecter des composantes spectrales très proches, contrairement à la FFT (Fast Fourier Transform) qui souffre de limitations comme la fuite spectrale. Grâce à sa précision, ROOT-MUSIC permet de mettre en évidence des signatures spécifiques liées à la démagnétisation et à l'excentricité.

Cependant, lorsque les deux défauts coexistent ou présentent des signatures similaires, leur séparation devient plus complexe. C'est dans ce contexte que s'insère l'apport de l'intelligence artificielle, et en particulier des **machines à vecteurs de support (SVM)**. Cette méthode de classification supervisée permet de distinguer efficacement les défauts à partir des caractéristiques extraites, en exploitant leur séparabilité dans un espace de dimension supérieure. Les SVM se présentent ainsi comme **un complément idéal à l'analyse fréquentielle**, permettant d'automatiser et de fiabiliser la reconnaissance des défauts.

Ce mémoire est structuré en **quatre chapitres**. Le **premier chapitre** présente les moteurs synchrones et les défauts étudiés. Le **deuxième chapitre** est consacré aux méthodes d'analyse spectrale, avec un accent particulier sur ROOT-MUSIC. Le **troisième chapitre** introduit la méthode SVM, ses principes, ses avantages, et sa pertinence dans le contexte du diagnostic. Enfin, le **quatrième chapitre** expose les résultats expérimentaux de l'application conjointe de ROOT-MUSIC et SVM, avec une évaluation des performances de classification et de séparation des défauts.

La problématique de ce mémoire se formule ainsi : **comment combiner efficacement une méthode d'analyse spectrale de haute résolution avec une approche d'intelligence artificielle supervisée pour détecter et séparer les défauts de démagnétisation et d'excentricité dans un moteur synchrone ?**

Chapitre I :

Généralités sur les Machines Synchrones à Aimants Permanents

I.1 Introduction

Les Moteurs Synchrones à Aimants Permanents (MSAP), également appelés moteurs à courant continu sans collecteur, connaissent un développement significatif grâce aux avancées dans la fabrication d'aimants permanents de haute qualité. Ces derniers permettent d'obtenir un couple volumique élevé et une inertie très faible. De plus, leur faible inductance favorise une réponse rapide des courants et, par conséquent, du couple. Lorsqu'ils possèdent un nombre de pôles élevé, leur puissance peut atteindre plusieurs centaines de kilowatts.

Ces moteurs jouent un rôle essentiel dans les équipements industriels en raison de leurs excellentes caractéristiques couple-vitesse, de leurs performances dynamiques élevées, de leur bon rendement et de leur large plage de vitesses de fonctionnement. Leur grande durée de vie et leur compacité les rendent particulièrement adaptés aux applications où l'encombrement et la masse sont des critères essentiels, notamment dans les systèmes embarqués.

Grâce à ces avantages, les MSAP sont largement utilisés dans divers domaines tels que la robotique, les véhicules électriques et hybrides, l'aérospatial, les outils électriques, la production d'énergies renouvelables et les équipements médicaux…etc. [1].

Dans ce chapitre, nous aborderons la machine synchrone à aimants permanents en présentant d'abord ses principes de fonctionnement ainsi que les caractéristiques des aimants permanents utilisés dans sa conception. Nous poursuivrons ensuite par un bref état de l'art sur les défauts susceptibles d'affecter les MSAP.

I.2 Généralités sur les MSAP

Le terme machine synchrone désigne l'ensemble des machines où la vitesse de rotation de l'arbre de sortie correspond à celle du champ magnétique tournant. Pour atteindre cette synchronisation, le champ tournant est généré soit par un aimant permanent, soit par un circuit d'excitation. [1]

Ce groupe de machines comprend en fait plusieurs sous-familles:

A - Machines synchrones à rotor bobiné.

b - Machines synchrones à fréquence variable.

C - machines synchrones à aimants permanents.

Notre attention se porte particulièrement sur cette dernière catégorie.

La Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) est un dispositif électromagnétique rotatif conçu pour fonctionner sur un réseau électrique alternatif polyphasé. Elle permet la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique lorsqu'elle est utilisée en mode moteur, et inversement, la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique lorsqu'elle fonctionne en mode générateur.

La machine synchrone est constituée de deux parties principales : le stator, qui est fixe, et le rotor, qui est en mouvement. Le rotor peut être équipé d'aimants permanents ou comporter un bobinage alimenté en courant continu associé à un circuit magnétique, formant ainsi un électro-aimant.

Pour générer du courant, une force extérieure est nécessaire pour faire tourner le rotor. En tournant, son champ magnétique induit un courant alternatif dans les bobines du stator. La vitesse à laquelle ce champ tourne est appelée « vitesse de synchronisme ».

Une machine synchrone ne peut pas démarrer correctement par simple connexion de ses enroulements statoriques à un réseau alternatif sans une aide extérieure. Si aucune force extérieure n'entraîne le rotor, il est néanmoins possible de le faire démarrer en alimentant progressivement les enroulements statoriques avec un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro jusqu'à la fréquence de synchronisme, tout en veillant à ce que la tension appliquée soit proportionnelle à cette fréquence. La vitesse de synchronisme dépend directement de la fréquence de l'alimentation électrique. [2] [3]

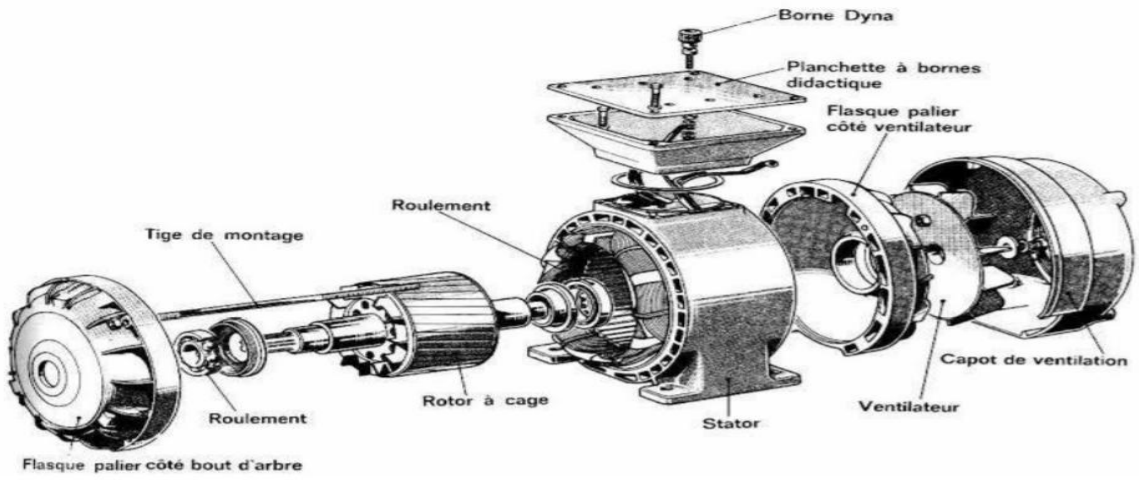


Figure I.1 : Constitution du MSAP

I.3 Domaines d'application

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires), dans des applications aussi diverse que le positionnement, la synchronisation l'entrainement à vitesse variable, et la traction [9].

- il fonctionne comme compensateur synchrone.
- il est utilisé pour les entrainements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique,...).

I.4 Différents types de machines à aimants permanents

Les machines à aimant permanents peuvent être classées comme suit, selon le principe de fonctionnement:

- Les machines à courant continu à aimants permanents (MCC).
- Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB).

I.4.1 Les machines à courant continu à aimants permanents (MCC)

Les machines à courant continu à aimants permanents sont une variante des machines à courant continu classiques, dans lesquelles le champ magnétique, habituellement généré par des électroaimants, est remplacé par celui des aimants permanents. Cette configuration permet d'éliminer les pertes joules associées aux bobinages d'excitation, améliorant ainsi le rendement énergétique. Cependant, l'absence de contrôle sur le champ d'excitation limite leur flexibilité, notamment en mode de défluxage. En raison de ces contraintes, ces machines sont principalement utilisées dans des applications de faible puissance nécessitant une grande réactivité et des performances dynamiques élevées. [4]

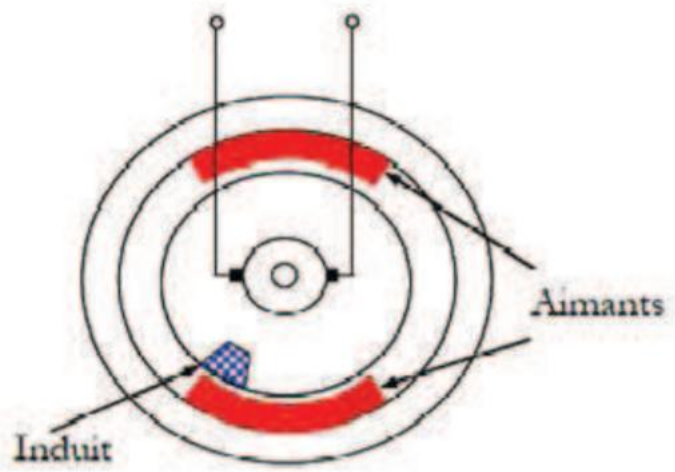


Figure I.2 Représentation simplifiée d'un MCC

I.4.2 Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

Les progrès dans la technologie des semi-conducteurs ont conduit au développement d'autres types des machines à courant continu où la commutation avec le système balais collecteur est remplacé par la partie tournante et le stator est constitué de trois enroulements alimentés pas les formes d'onde carrées fournies un convertisseur. La commutation du convertisseur est contrôlée de telle façon que, à chaque instant, seulement deux phases conduisent. Ce système de commutation électronique est fonctionnellement équivalent à la commutation des balais mécanique de la machine à courant continu. Par conséquent, ce type de machine à aimants permanents est connu comme la machine à aimant permanents sans balais (MAPSB) (brushless PMDC) ou la machine à aimants permanent avec forme d'onde carrée (square wave PMDC). La machine MAPSB est préférable pour des nombreuses applications du fait qu'elle ne nécessite que peu d'entretien, elle présente un rendement élevé et sa loi de commande est relativement simple [5]

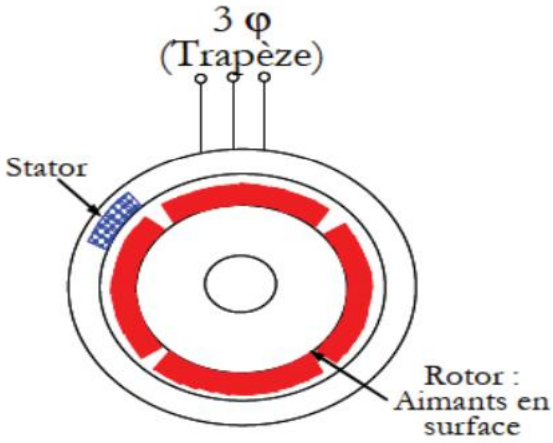


Figure I.3 Représentation simplifiée d'un MAPSB

I.5 Différentes structures de la machines synchrones à aimants permanents

Les structures des machines synchrones à aimant permanents sont classées suivant la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial, à flux axial, et à flux transverse.

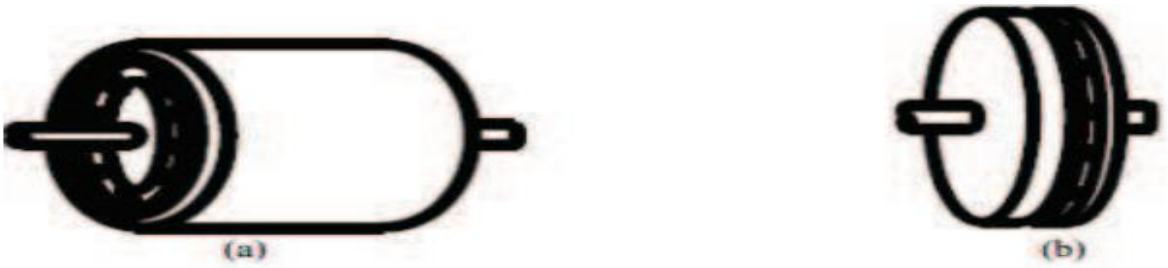


Figure I.4 Vue schématique des machines : (a)flux radial, (b) flux axial

I.5.1 Les machines à flux radial

La machine synchrone à flux radial est la première machine à aimants permanents introduite dans l'industrie. Grâce aux avancées en électronique de puissance et à l'amélioration des performances des aimants permanents, elle tend progressivement à remplacer la machine asynchrone.

La première machine synchrone à flux radial développée est une machine dont le bobinage est réparti et les aimants placés en surface. Il est possible de l'utiliser pour équiper un turbo compresseur (50 kw, 70000 tr /min, 8 poêles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40kw, 6000 tr/min, 4 poêles). Le principal inconvénient de cette machine est la manière de disposition des aimants permanents en surface, ainsi que les applications à haute vitesse sont difficiles. C'est pourquoi, pour diminuer le risque de décollement des aimants, le rotor de la machine peut être placé à l'extérieur du stator. Ainsi, les aimants en surface sont placés sur le rotor grâce à l'effet de la force centrifuge [5]

I.5.1.1 Aimants en surface

Dans ce type de machine, les aimants sont disposés à la surface du rotor et sont alimentés radialement. Cette configuration est la plus couramment utilisée en raison de sa simplicité, ce qui permet de réduire les coûts de fabrication par rapport à d'autres machines à aimants permanents. Cependant, cette conception présente certains inconvénients. Les aimants sont directement exposés aux champs de démagnétisation et soumis aux forces centrifuges, ce qui peut entraîner leur détachement du rotor. Pour pallier ces problèmes, un cylindre externe non ferromagnétique et hautement conducteur est parfois ajouté. Il protège les aimants contre la démagnétisation, atténue l'effet de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. De plus, ce cylindre peut contribuer à générer un couple de démarrage synchrone et jouer un rôle d'amortisseur. Dans le cas des aimants en terres rares, la réactance synchrone dans l'axe d et l'axe **q** est pratiquement identique, ce qui influence le comportement électromagnétique de la machine. [4]

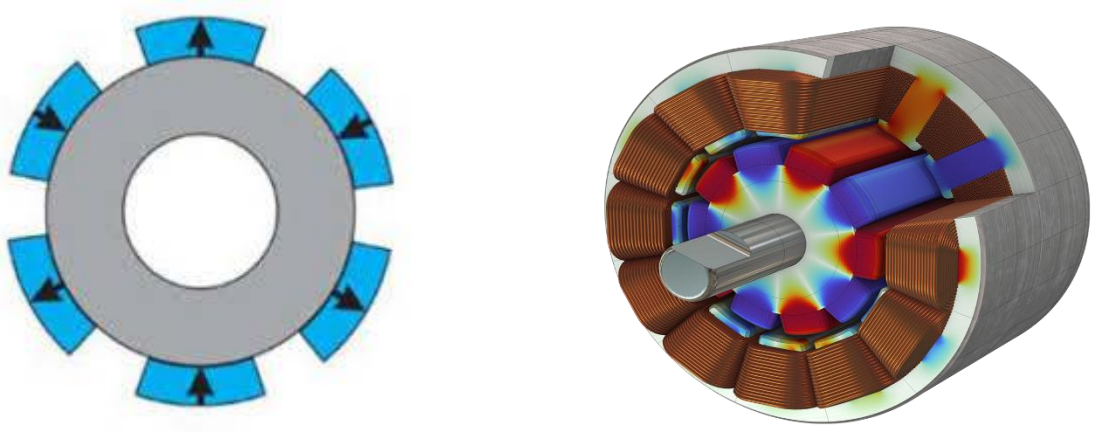


Figure I.5 Machine à aimants en surface

I.5.1.2 Aimants insérés

Comme les machines avec aimant en surface, les machines à aimants insérés sont aussi montées sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement comblées par du fer.

La présence de fer entre les aimants permanents crée une saillance et générant ainsi un couple reluquant en complètent du couple produit par les aimants permanents. La réactance synchrone de l'axe-q est légèrement supérieure à celle dans l'axe-d [3].

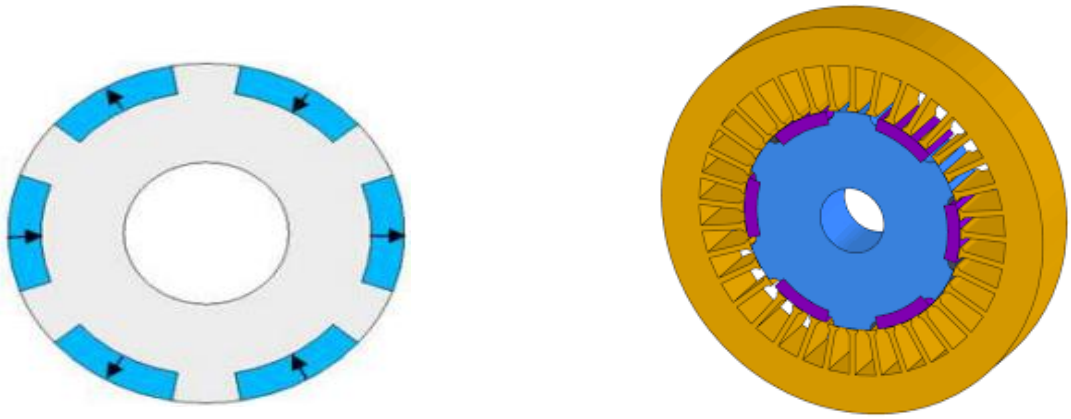


Figure I.6 Machine à aimants insérés

I.5.1.3 Aimants enterrés

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor et aimantés radialement. Du fait que la surface du pole magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe **d** est plus petite que celle de l'axe **q**.

Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [3].

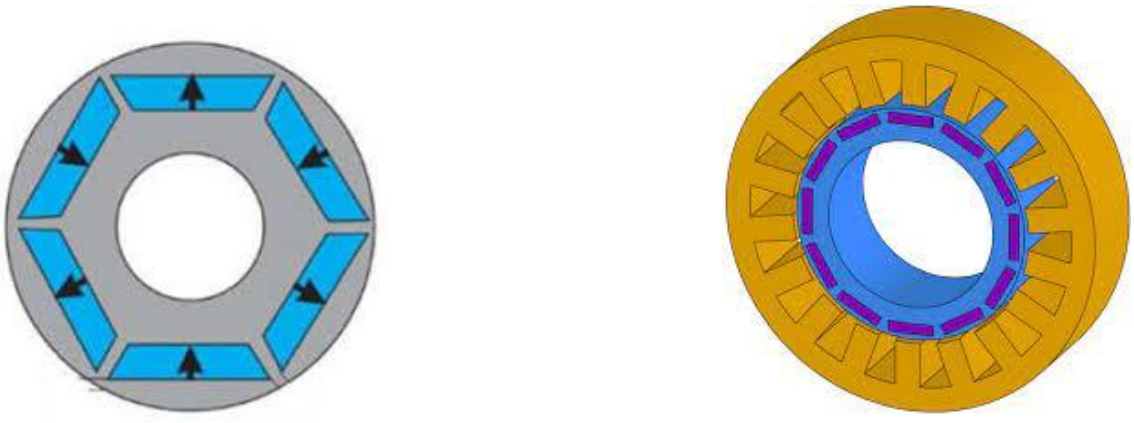


Figure I.7 Machine à aimants enterrés

I.5.1.4 Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence. Les pôles magnétiques se forment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration du flux provenant des aimants permanents. L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux générés par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protéger contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe-q est plus grande que celle de l'axe-d [6].

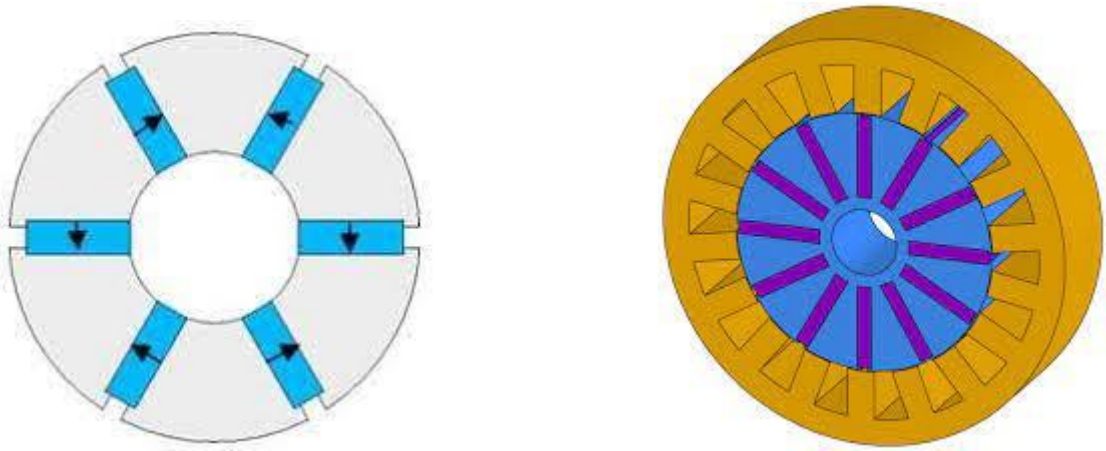


Figure I.8 machines à concentration de flux

Parmi ces types de machines on peut alors distinguer particulièrement deux types de machines:

- **Les machines sans pièces polaires (Ld = Lq)**

Les machines sans pièces polaires possèdent un rotor où les aimants sont fixés en surface, à la périphérie du noyau magnétique, et sont maintenus par collage ou frettage. Cette configuration se distingue par une réluctance constante et relativement faible le long de l'entrefer. Lorsque les aimants sont magnétisés radialement et que l'entrefer est réduit, il est possible d'obtenir une force électromotrice quasi trapézoïdale. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse pour une alimentation en courants rectangulaires, permettant ainsi un fonctionnement sans ondulations de couple. [1]

- **Les machines avec pièces polaires (Ld < Lq)**

Le rôle des pièces polaires consiste à élever l'induction dans l'entrefer à une valeur supérieure à celle fournie par les aimants, particulièrement lorsque l'on y ajoute un effet de concentration géométrique du flux magnétique. A cause de l'épaisseur des aimants l'entrefer sur l'axe direct est plus grand que celle sur l'axe indirect, par conséquent Ld est inférieure à Lq. On peut distinguer deux types de machine avec pièces polaires. Les rotors avec aimants sous les pièces polaires comportant des aimants disposés contre le noyau magnétique .Ces aimants peuvent être de forme parallélépipédique à aimantation parallèle ou en forme de tuile aimantée radialement. Les rotors à concentration de flux qui utilisent l'aimantation tangentielle d'aimants généralement parallélépipédiques disposés entre les pièces polaires contre un arbre amagnétique. Ces dernières réalisent une concentration de flux à condition que le nombre de pôles soit suffisamment élevé, ce qui permet d'augmenter le module du champ dans l'entrefer de façon significative [1].

I.5.2 . Machines synchrones à aimants permanents à flux axial (MSAP-FA)

Plusieurs configurations de machine synchrone à flux axial peuvent être trouvés concernant les positions de rotor et les arrangements d'enroulement donnant des degrés de libertés en vue de choisir la structure de la machine la plus appropriée dans l'application considérée. Les configurations possibles sont : [7]

- Structure avec un seul rotor et un seul stator : est la forme la plus simple de machine à flux axial (Campbell, 1974 ; Kurronen, 2003). Toutefois, cette structure présente un

déséquilibre des forces axiales entre le rotor et le stator. En conséquence, elle nécessite des roulements plus complexes ainsi qu'un rotor doté d'un disque plus épais, comparé aux structures où les forces axiales sont équilibrées.

- **Structure dans laquelle le stator est situé entres les rotors :** Dans cette conception, les enroulements de phase possèdent des extrémités courtes, ce qui améliore le rendement ainsi que la densité de puissance de la machine. Toutefois, un inconvénient majeur réside dans la fixation plus complexe du stator à l'armature (carcasse), comparée à une structure alternative où le rotor est placé entre deux stators, connue sous le nom de machine à aimant permanent à rotor intérieur à flux axial.

- Structure dans laquelle le rotor est placé entres des stators : Dans cette configuration, le rotor est placé entre deux stators, permettant une symétrie du champ magnétique qui améliore le rendement global et la densité de puissance de la machine. Cette disposition facilite également le refroidissement du rotor, ce qui est avantageux pour les applications à haute performance. Cependant, cette structure présente une complexité accrue au niveau de la fabrication du rotor, notamment pour l'intégration des aimants permanents ou des enroulements, ainsi qu'un défi technique pour garantir un alignement précis entre les deux stators. Ce type de structure est typiquement utilisé dans les machines à flux axial ou certaines topologies de moteurs à double stator.

- Structure à plusieurs étages comprenant plusieurs rotors et stator en assemblant plusieurs machines alignées sur le même axe et en formant une machine à plusieurs étages à flux axial. De telles machines peuvent être considérées pour l'usage d'entrainement de propulsion de bateau, pompe et application de générateur de vitesse élevée. [7].

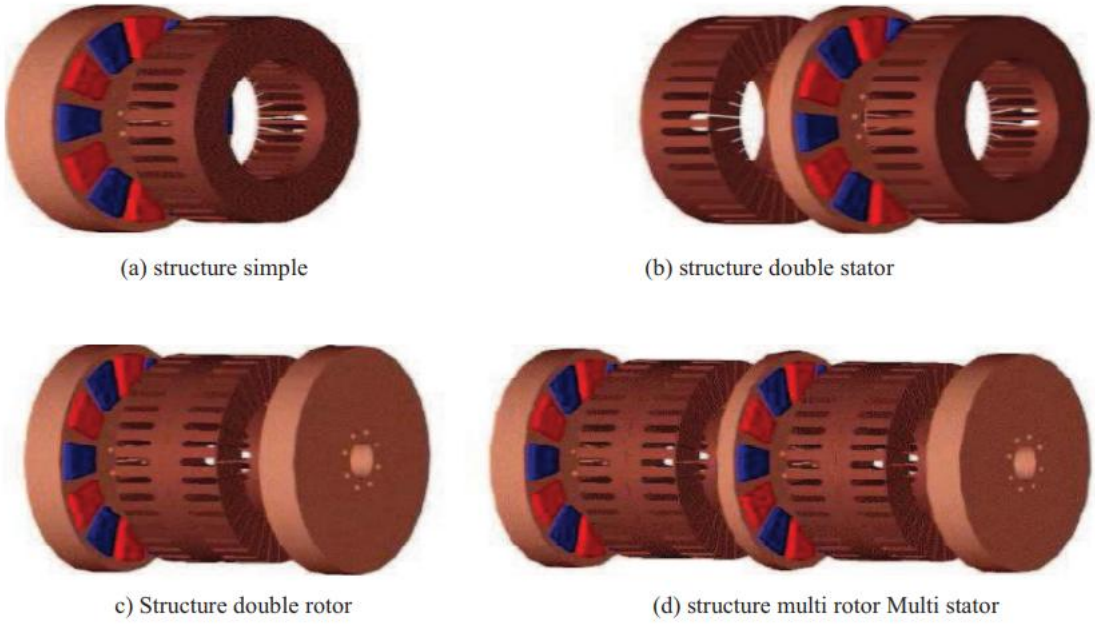


Figure I.9 Configuration des MSAP à flux axial

I.5.3 Machines synchrones à aimant permanent à flux transverse

Dans cette structure, des circuits magnétique en forme de fer à cheval régulièrement disposés entourent le bobinage statorique de chaque phase un moteur à flux transverse q-phase comprendra alors plusieurs moteurs monophasés (circuits magnétiques) montés sur le même arbre et décalés d'un angle géométrique de ($2\pi/q$). Ces structures sont particulièrement adaptées pour des exigences de forte densité de couple, en raison de ses fort couple pulsatoires, des vibratoires et des pertes fer excessive dues aux caractères tridimensionnel du champ. Pour réduire ces pertes, on pourrait utiliser des matériaux magnétiques composites (poudre compacte) ou détriment de couple volumique lié à un niveau d'induction de sa saturation relativement faible pour ce type de matériau. En autre, les quelques réalisation effectuées ont mis en évidence que l'achèvement d'un fort couple volumique se traduit par un surdimensionnement de la partie convertisseur [6], [7].

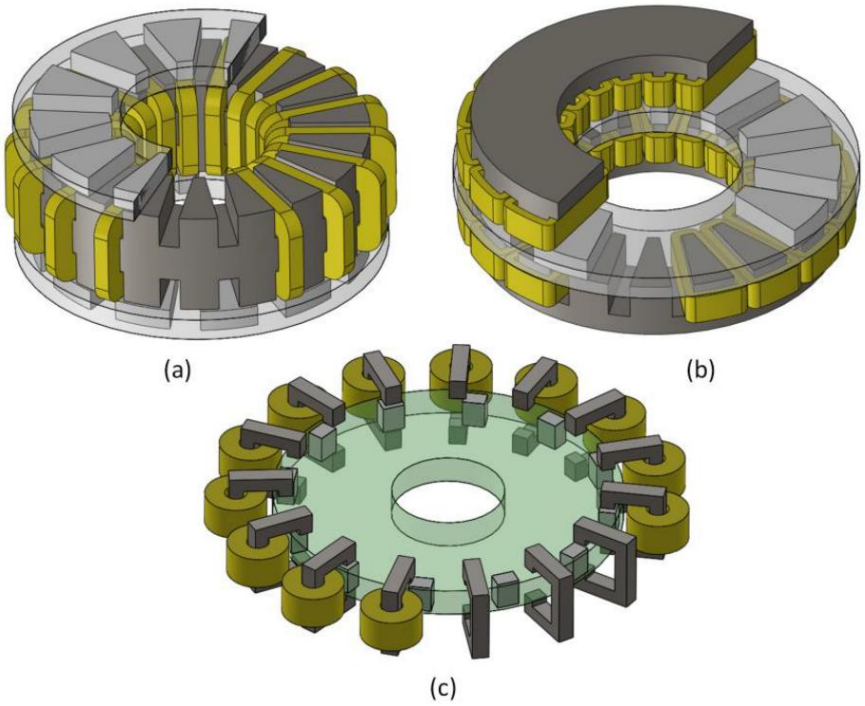


Figure I.10 Vue d'une machine à flux transverse

I.6 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

Du point de vue de la topologie ou construction, la partie active de la MSAP est principalement constituée d'un stator et un rotor à aimants permanents telle que représentée dans sa forme générale par la figure

I.6.1 Le stator

Le stator est constitué d'un certain nombre de bobines réparties dans des encoches qui constituent trois bobinages indépendants. Elles sont destinées à créer un champ magnétique tournant lorsqu'on les alimente par un système de tensions ou de courants triphasés. Les topologies rencontrées dans les bobinages des machines tournantes à courants alternatifs sont nombreuses. On distingue deux grandes catégories de bobinage. Les bobinages dits réguliers, parmi lesquels on trouve les bobinages à pas diamétral, les bobinages à pas raccourcis, les bobinages répartis et les bobinages non réguliers, comme les bobinages à trous ou à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase [8].



Figure I.11 Stator (induit)

I.6.2 Le rotor

Le rotor est la partie mobile de la machine, il est séparé par un entrefer du stator. Couplé mécaniquement à l'extérieur, il est destiné à créer ou recevoir (dans le cas générateur) un couple mécanique capable de fournir un mouvement de rotation. On distingue deux catégories de rotor :

Le rotor à pôles lisses et le rotor à pôles saillant.

- **Rotor à pôles lisses :** il se caractérise par un entrefer constant dans toute les directions c'est-à-dire que la perméance de l'entrefer et constante.
- **Rotor à pôles saillants :** dans lequel l'entrefer est variable. Dans ce cas la perméance vue du stator dans l'entrefer change d'un point à un autre dans toutes les directions.

Il existe une grande variété de structures de moteur synchrone à aimants permanents. Elles varient principalement selon la disposition des aimants et des pièces polaires sur le rotor [9].

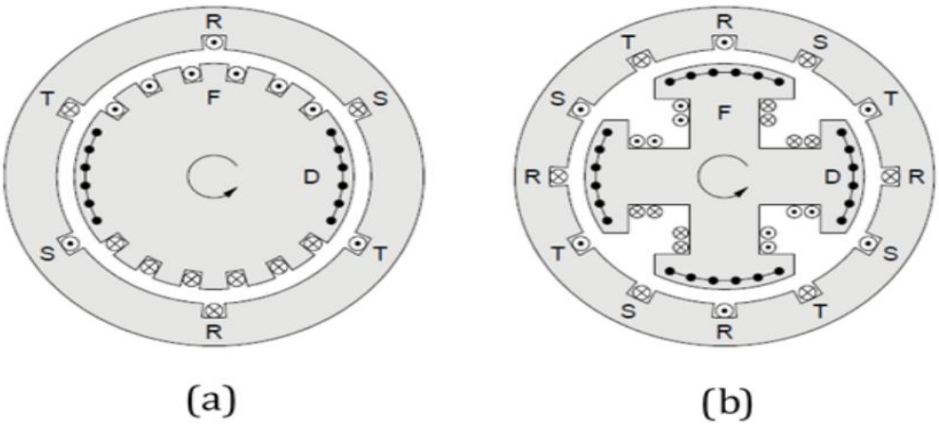


Figure I.12 Rotor à aimants lisses (a) et à aimants saillants (b)

I.7 Principe et modes de fonctionnement

Les courants statorique créent dans le stator un champ magnétique tournant de même fréquence que les courant statorique. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. Les aimants permanents (semblable à des enroulements alimentés par un courant continu) n'ont pas besoin d'être alimentés. Le champ magnétique ainsi crée cherche en permanence à s'aligner avec celui du stator. La machine est dite synchrone car elle tourne à la même vitesse que le champ statorique.

I.8 Avantages de la machine synchrone à aimants permanents

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines : [10]

- Puissances massiques importantes et élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Pas des pertes résistives au rotor ; ce qui facilite l'évaluation de la chaleur due aux pertes dans la machine. Ainsi, il y a suppression d'équipement de refroidissement au rotor.
- Suppression des bagues et des ballait, ce qui réduit les problèmes de maintenance.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement en survitesse

I.9 Inconvénients d'utilisation de la machine synchrone à aimants

Comme inconvénients de la MSAP on cite : [11]

- Coût élevé des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- Diminution de l'aimantation selon loi logarithmique en fonction du temps.
- Problème de tenu en température des aimants permanents (250°C pour le samarium cobalt).
- Impossibilité de régler l'excitation.

I.10 Les types d'aimants permanents dans la MSAP

Selon les caractéristiques démagnétisâtes, les aimants permanents peuvent être subdivisés en plusieurs groupes. Il existe aujourd'hui, principalement, trois familles de matériaux conduisant l'essentiel des applications sur le marché des aimants permanents. Ces trois familles sont dans l'ordre d'apparition : les ferrites, les Terre rares et les alnico [7].

I.10.1 Les ferrites

Sont des composes d'oxyde de fer, de baryum et de strontium. Ils sont obtenus par frittage et peuvent être isotropes ou anisotropes. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible prix de revient et d'une rigidité magnétique élevée permettant de les utilisés dans les machines. En raison de leurs faibles valeurs d'aimantation rémanente (environ 0.4T), les ferrites sont utilisées plutôt dans des machines à aimants de faible puissance à faible coût [7]

I.10.2 Terre rares

Les terres rares sont les meilleurs matériaux pour aimant performants. Ils paraissent très bien appropriés pour les machines électrique. Leur cout encore élevé, a tendance à freiner l'extension de leur utilisation de leur utilisation. Néanmoins des solutions intermédiaires apparaissent avec les Plasto-Néodyme. C'est un mélange de Néodyme-Fer-Bor avec un liant plastique. Cette matière permet de réaliser des pièces moulées, ce qui facilite l'assemblage et diminue le nombre de pièce mécanique [7].

I.10.3 Alnico

Les aimants en Alnico ont un champ rémanent très élevé, mais un champ coercitif très faible, ce qui pose de gros problèmes de démagnétisation. Ces aimants ne peuvent être sortis de leur circuit magnétique, sous peine de les désaimanter. [7]

I.10.4 Les aimants métalliques

Il existe plusieurs types d'aimants métalliques ; les plus intéressants pour être utilisée dans les machines électriques sont ceux du type alliage (ALNICO) à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane. Ils peuvent être isotropes ou anisotrope. Pour les isotrope Br0.7 T, Hc de 50 à 80 Km/m et (BH) max de 12 à 18 KJ/m3 . Le titane augmente la trempabilité, le niobium la coercivité. La faible valeur de leur champ coercitif rend difficile leur utilisation niveau des machines électriques. Le plus grave inconvénient est qu'en cours de fonctionnement, ils nécessitent généralement un ré aimantation. [7].

I.10.5 Le samarium cobalt (SmCo5, Sm2Co17)

Le samarium cobalt est beaucoup plus performants en terme de densité volumique d'énergie que les autres type d'aimants de 140 à 200kJ/m3 pour le SmCo5 et de 180 à 240[kJ/m3] pour le Sm2Co17et, autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 350°C), mais il est très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition. [7].

I.10.6 Le Néodyme-Fer-Bor

Les Néodyme-Fer-Bor est le type d'aimants le plus récent. Sa première utilisation remonte à 1985. Dans un court intervalle de temps, il a pris plus d'ampleur au niveau de sa production. Le NdFeB est presque le matériau idéal pour les excitations des machines électriques. L'induction qu'il permet de produire dans l'entrefer est importante, son champ coactif est élevé. Ils sont constitués essentiellement de Nd2Fe14B. Ils sont moins couteux que les Samarium-Cobalt et présentent des propriétés magnétiques supérieures. Leur produit d'énergie volumique (BH) max atteint 400 KJ/m3 à température ambiante. L'inconvénient principal de ce type d'aimant est qu'ils sont peu utilisables à des températures supérieures à 100°C et sont très sensibles à l'oxydation de l'air [7].

Matériaux	B_r en Tesla	H_c de Curie en C°	T° de Curie en C°	Remarques diverses
Ferrites **Alnico**	0.2 à 0.4 1.2	200 50	300 750 à 850	Les moins chers se démagnétisent trop facilement
Samarium-Cobalt	0.5	800	700 à 800	**Prix élevé à cause du cobalt**
Néodme-Fer-Bore	1.3	1500	310	**Prix en hausse (terre rares) sujet à l'oxydation**

Tableau I-1 Exemple de propriétés des aimants

I.11 Les organes mécaniques

Les organes mécaniques d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comprennent plusieurs composants importants :

- **L'arbre** : Il assure la transmission de mouvement. Il se compose d'une partie centrale qui supporte le corps du rotor et est connecté à la charge via un accouplement. L'arbre est soutenu par deux paliers.
- **Les paliers :** Ces éléments supportent et permettent la rotation de l'arbre rotorique. Ils se composent de flasques et de roulements à billes montés à chaud sur l'arbre. Les flasques, en fonte, sont fixés sur le carter statorique à l'aide de boulons ou de tiges de serrage.
- **La carcasse :** Habituellement constituée d'aluminium injecté pour les petites MSAP et de fonte grise pour les plus grandes, la carcasse enveloppe le circuit magnétique et assure sa protection contre l'environnement extérieur. La boîte à bornier est généralement montée sur le dessus ou sur le côté de la carcasse.
- **Le ventilateur :** Installé à l'extrémité de l'arbre du rotor, le ventilateur assure le refroidissement de la MSAP. Dans certains cas, il peut être remplacé par une ventilation forcée pour le refroidissement à des vitesses plus lentes.
- **Les roulements** : Ils permettent la liaison mobile entre deux éléments en rotation l'un par rapport à l'autre. Leur fonction est de garantir la rotation relative de ces éléments avec précision et un frottement minimal. [12]

I.12 Situation des défaillances dans la MSAP

On désigne par défaillance dans les machines électriques tout incident donnant lieu à un comportement anormal de la machine et qui peut à court ou long terme provoquer son endommagement. Les défaillances peuvent être d'origines diverses : électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent être classées en trois groupes :

- Les générateurs de pannes ou initiateurs de défauts: surchauffe du moteur, défaut électrique (court-circuit), survoltage d'alimentation, problème d'isolation électrique, usure des éléments mécaniques (roulements à billes), rupture de fixations, ...

- Les amplificateurs de défauts: surcharge fréquente, vibrations mécaniques, environnement humide, échauffement permanent, mauvais graissage, vieillissement,

- Les vices de fabrication et les erreurs humaines: défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine... . [13] [14].

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

Une classification des défauts qui existent dans les machines électriques selon leurs origines est présentée dans le Tableau suivant.

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le rotor et le stator
			Défaut de roulements
			Excentricité
			Mouvements de roulements et des tôles
		Electrique	Défaillances au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
			Défaillance au niveau du circuit magnétique
	Externe	Mécanique	Charge oscillante
			Surcharge de la machine
			Défaut de montage
		Environnementale	Humidité
			Température
			Propreté
		Electrique	Fluctuation de la tension
			Sources de tensions déséquilibrées
			Réseau bruité

Tableau I-2 Classification des défauts selon leurs origines

I.13 Etude statistique sur les défauts dans les machines électriques

Le défaut d'un élément est une condition de la réduction de capacité liée à des exigences minimales. Cela peut être le résultat d'une dégradation normale, une mauvaise spécification ou conception, un mauvais montage (y compris les mauvais alignements), une mauvaise utilisation, ou une combinaison de ceux-ci conduira à la défaillance du composant et provoquera sa sortie prématurée du fonctionnement. Plusieurs enquêtes ont été menées sur la fiabilité des machines électriques. Dans ces enquêtes, un grand nombre d'opérateurs des machines ont remis en question les types et la fréquence des défauts dans leurs usines. Les plus importantes de ces enquêtes, ont été menées par la General Electric Company. Leurs résultats publiés dans le journal de EPRI (Electric Power Research Institute) en 1982 et couvrant environ 5000 moteurs, dont 97% d'entre ont été des machines asynchrones à cage. La figure (II.1) présente la répartition des défauts dans les moteurs testés. Il convient de noter que cette figure fournit des données des machines travaillant dans des nombreuses applications différentes et dans diverses branches de l'industrie. Il est connu que la survenance de l'un des types de défaut dépendra en grande partie de l'application spécifique de la machine. Par exemple, il a été constaté que, dans les machines asynchrones à cage, l'incidence de la défaillance de la cage rotorique peut être aussi élevée que le défaut de l'enroulement statorique dans les applications où la machine est constamment arrêtée et redémarrée sous une charge lourde. Les machines à percer dans l'industrie d'exploitation de pétrole et des mines sont des cas typiques de ces applications [4].

Dans le système synchrone, les défauts peuvent être causés à la fois par la partie fixe (stator) et la partie mobile (rotor), ce qui explique la classification suivante :

I.13.1 Défaillance au rotor :

Les pannes du rotor sont principalement causées par des problèmes :

-Thermiques (excès de charge) ;

-Résiduel (déformation) ;

-Écologique. (Agression) ;

-La dynamique de l'arbre de transmission

On peut identifier les défauts les plus fréquents, situés au niveau du rotor comme suit :

-Excentricité statique et dynamique et mixte.

-Désaimantation des aimants.

-Défauts de roulements.

I.13.1.1 Excentricité statique et dynamique

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la 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 engendre une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor.

L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine [8].

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées:

- L'excentricité statique (Figure I.13 (a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure I.13(b)) – corresponds, elle a un centre de rotation du rotor diffèrent 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 (Figure I.13 (c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

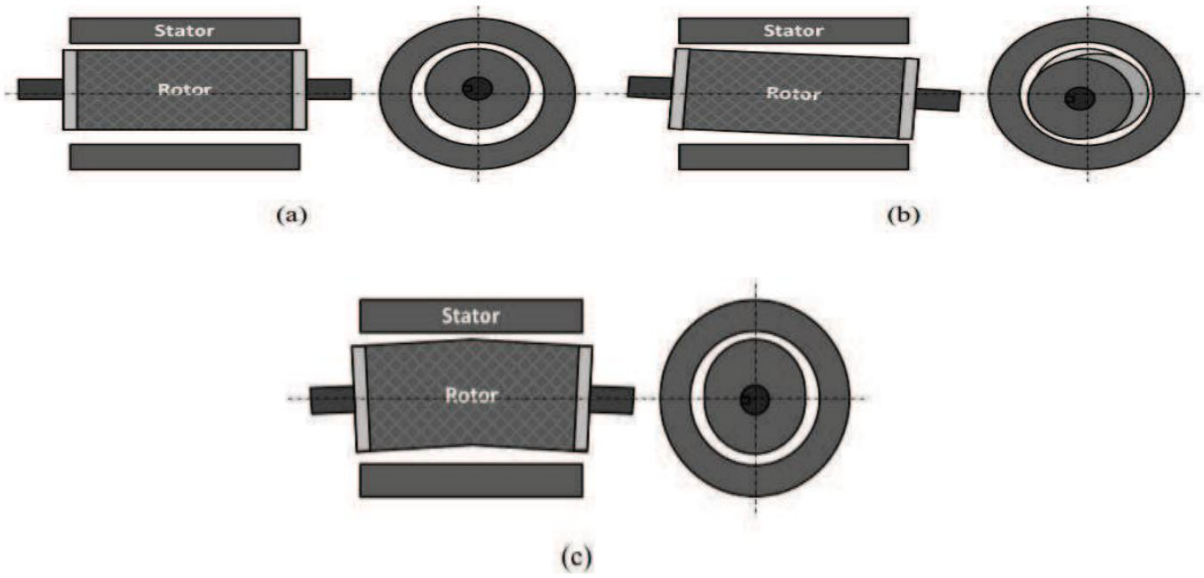


Figure I.13 Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

I.13.1.2 Défauts de roulements

En général, les roulements des machines électriques sont constitués d'une bague interne et d'un roulement. Une bague externe est composée d'un organe de roulement, généralement composé de billes maintenues dans une bague cage à rouleaux ou cage. La part des défauts de roulement varie de 42% à 50% de l'ensemble des défauts des problèmes de moteurs. Ils peuvent être d'origines variées :

-Assemblage incorrect (installation incorrecte du roulement en forçant incorrectement le roulement)

-Le roulement se produit sur l'arbre du rotor ou dans les flasques issues liées à l'environnement.

-Le roulement est traversé par un courant qui provoque des arcs électriques. -Contrainte mécanique causée par une charge excessive.

-Des imperfections dans l'usinage.

Le plus souvent, ces imperfections se traduisent par une usure ou une fissure des bagues ou par une détérioration de l'organe de roulement (bille ou rouleaux), ce qui entraîne des vibrations mécaniques. [4], [14], [15].

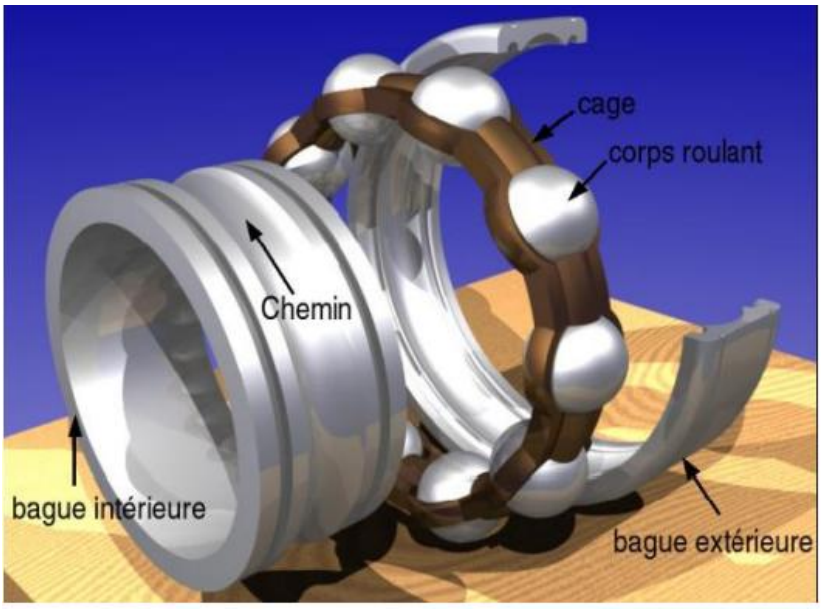


Figure I.14 Vue éclatée d'un roulement à bille

I.13.1.3 La désaimantation des aimants permanents

Les aimants permanents génèrent un champ magnétique extrêmement stable. Malgré les bénéfices et les désavantages liés à leur composition, tout aimant a souvent tendance à diminuer sa puissance au fil du temps (vieillissement).Il peut survenir en raison d'un échauffement excessif ou d'un champ magnétique induit intense, mettant en danger la stabilité magnétique de la machine. Les défaillances du convertisseur, notamment des onduleurs à trois bras, sont courantes dans les systèmes de variation de vitesse. Les courts-circuits sur un interrupteur ou les circuits ouverts peuvent compromettre le fonctionnement de l'onduleur, affectant la production de couple et la stabilité du système. Les doubles fautes, telles que les courts-circuits simultanés sur deux bras ou sur deux interrupteurs, peuvent entraîner l'arrêt complet de la machine et nécessiter des mesures d'isolation pour éviter des dommages plus graves [4].

I.13.2 Défauts statoriques

Les bobinages sont la principale cause des défauts dans une machine électrique. L'intégrité des fils et de leur isolant est affectée par les effets d'usure tels que les frottements ou le vieillissement des matériaux. Lorsqu'il y a une détérioration excessive de cet isolant, ces bobinages peuvent être en court-circuit ou, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert. Différents types de défauts peuvent avoir des conséquences variées [15].

I.13.2.1 Défauts d’isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des court-circuites. En effet, les différentes pertes (joule, fer, mécanique,….) engendrent une augmentation de la température des différents constituants de la machine. Or les matériaux d’isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. Les différentes causes de ce type de défauts sont :

- Dégradation de l’isolant à la fabrication ;
- La tension de l’enroulement est supérieure à la tenue diélectrique du matériau d’isolation ;
- Courant élevé dans l’enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur ou une surcharge ;
- Vibrations mécaniques ;
- Vieillissement naturel des isolants ;

- Fonctionnement dans un environnement sévère.

Lorsque le défaut de l'isolant se crée sur une spire, le courant de défaut circule entre le cuivre de cette spire et la tôle du stator (défaut phase– masse) voir la figure (I-12-c). Il peut aussi circuler entre deux spires d'une même phase si l'isolant qui les sépare est détérioré (défaut entre-spires) voir figure (I-12-a). Dans le cas des bobinages à deux couches, une même encoche peut contenir des conducteurs de deux phases différents. La détérioration simultanée, et dans une même zone, des isolants de ces deux bobines provoque un contact électrique entre deux spires de deux phases différentes : défaut phase- phase (figure I-12-b) Ce type de défaut peut aussi exister dans les bobinages à une couche au niveau des têtes de bobines où les conducteurs de deux phases différentes peuvent entrer en contact. La topologie du circuit électrique est ainsi modifie par ces défauts. [16]

I.13.2.2 Les courts-circuits statoriques :

En général, les courts-circuits statoriques se manifestent par un court-circuit situé entre plusieurs spires d'un même enroulement (court-circuit inter-spires), après que le matériau isolant qui recouvre les conducteurs ait dégradé (Fig.I.14.a). Il est possible que ce genre de phénomène se transforme en court-circuit généralisés, tels que des courts-circuits entre les phases (Fig.I.14.b) ou entre la phase et le neutre (Fig.I.14.c). En général, il est facile de repérer ces défauts car les conséquences qu'ils ont sur les courants de phase sont significatives. De leur côté, les défauts de court-circuit inter-spires sont plus difficilement observables à partir de l'observation directe des courants de ligne, ce qui accroît les problèmes de détection. [17]

I.13.2.3 Court-circuit entre spires

Le défaut d'un circuit entre des spires de la même phase est assez courant. Ce problème est causé par un ou plusieurs problèmes d'isolation dans l'enroulement en question. Cela provoque une hausse des courants statoriques dans la phase touchée. Une légère différence d'intensité sur les autres phases. Cela entraîne une hausse de la température dans le bobinage et, par conséquent, une détérioration accélérée des isolants, ce qui peut entraîner un défaut en chaîne (apparition d'un autre court-circuit).On la voit dans la figure (I.15.a).

I.13.2.4 Court-circuit entre phases

Ce genre de pannes peut survenir à n'importe quel endroit du bobinage, mais les conséquences ne seront pas les mêmes en fonction de leur localisation. La présence de cette caractéristique rend complexe l'analyse de l'impact de ce défaut sur le système. Lorsqu'un court-circuit se forme près de l'alimentation entre phases, cela entraînerait des courants très élevés qui entraîneraient la fusion des conducteurs d'alimentation et la disjonction par les protections. Par ailleurs, une transition courte proche du neutre entre deux phases a des conséquences moins graves ; elle entraîne un déséquilibre des courants de phase avec un risque réduit de fusion des conducteurs. La figure (I.15.b) représente les différents types de court-circuit statorique.

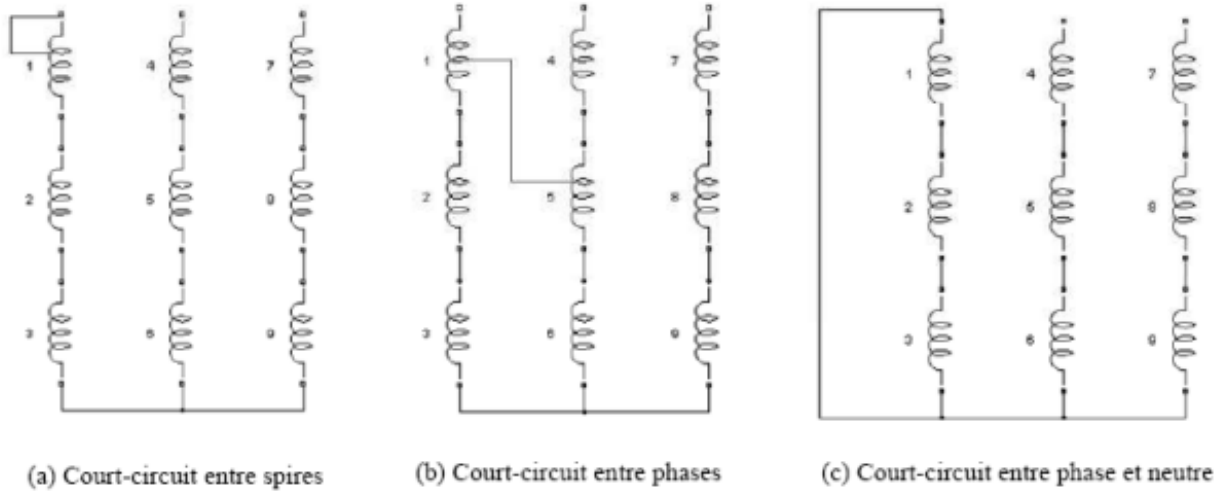


Figure I.15 Représentation de court-circuit entre spire, entre phase, phase et terre

I.13.2.5 Conséquences des défauts statoriques :

Les problèmes liés au bobinage du stator sont principalement causés par une modification topologique du circuit statorique de la machine en question, ce qui entraîne l'apparition de boucles de court-circuit. Elles peuvent se manifester à divers endroits en fonction de la configuration du bobinage statorique. En règle générale, un court-circuit a pour effet d'altérer la répartition spatiale du champ tournant. D'un côté, cela entraîne des fluctuations du couple électromagnétique, ce qui entraîne des variations de vitesse. Les vibrations mécaniques qui en résultent peuvent être destructrices pour les organes mécaniques entourant la machine si elles sont puissantes. Par ailleurs, la tension dans la boucle engendrée par le court-circuit peut atteindre des niveaux élevés. La destruction par effet thermique du matériau isolant qui recouvre

les conducteurs de cette boucle se produit rapidement. Les dangers de fuite de fumées ou même d'incendie sont donc considérables. (Voir I.15). [8]

La figure (I.15) représente les déférents défauts statoriques.

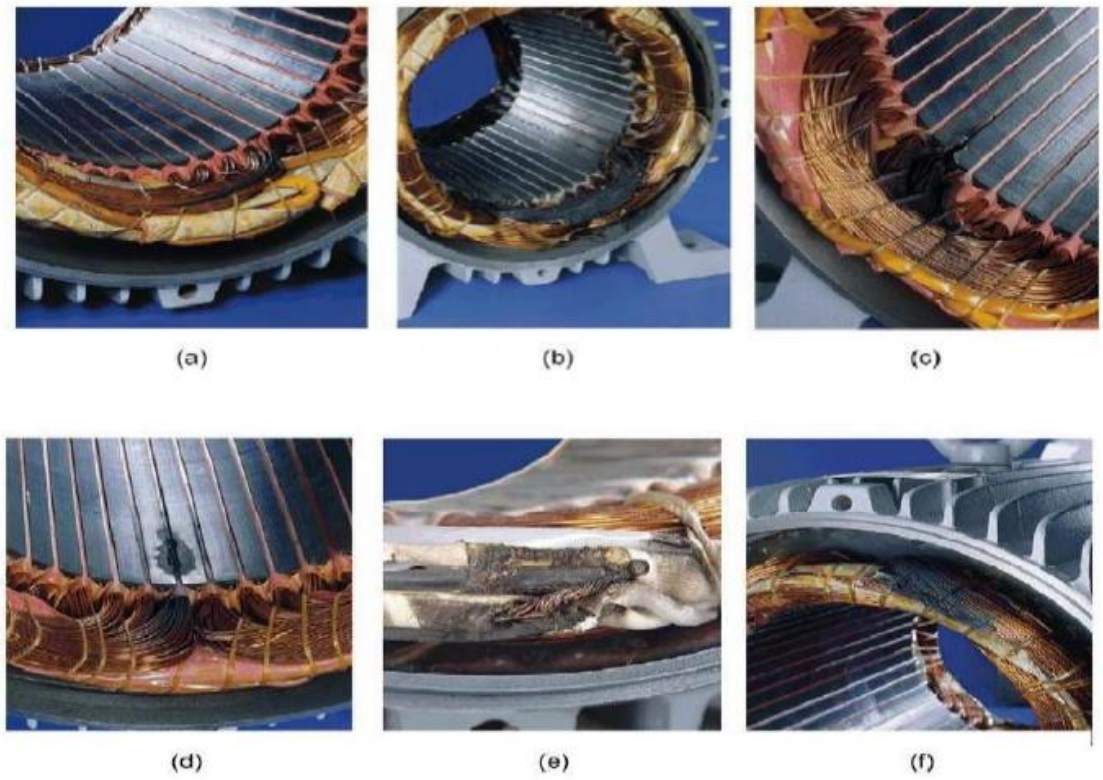


Figure I.16 Différentes défauts statoriques

(a) court-circuit entre spires des spires de la même phase.

(b) Enroulement court-circuité.

(c) Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique à l'extrémité de l'encoche statorique.

(d) (e) Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique au centre de l'encoche statorique.

(f) court-circuit entre phases.

I.14 Méthodes de diagnostic :

Le raisonnement et la connaissance sont deux éléments clés dans la solution d'un problème. Le diagnostic est au niveau conceptuel une distribution systématique des symptômes en diverses

catégories de défauts. Par rapport à la connaissance et au raisonnement deux classes des méthodes de diagnostic existent :

- Les méthodes internes.
- Les méthodes externes.

I.14.1 Méthodes externes :

Les méthodes externes de diagnostic supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine acquise par apprentissage, ces méthodes se basent sur l'analyse des signaux que fournit à la machine lors de son fonctionnement, les signaux utilisables qui peuvent être : Flux d'entrefer, puissance instantanée, courant statorique et vibration acoustique. [22].

I.14.2 Méthodes internes :

La connaissance du modèle permet de décrire les relations de cause à effet, ces méthodes requirent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèle mathématique, ces méthodes utilisent un modèle pour reproduire le comportement du système.

On distingue ces méthodes suivant le modèle utilisé [22].

- Modèle de simulation : les modèles analytiques utilisés dans ce mode sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert.
- Observateur (estimateur) ce modèle est décrit sous une représentation de variable d'état.
- Estimation paramétrique : c'est la détermination des vecteurs des paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système.
- Modélisation des signaux : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts, l'analyse spectrale est très utilisé pour détecter des défaillances dans les machines électriques.

I.15 Conclusion :

Ce chapitre s'intéresse d'une manière globale aux généralités sur la machine synchrone à aimants permanents. Nous avons présenté principalement la constitution de la MSAP, ses types, ses avantages et ses domaines d'applications. Puis nous avons donné quelques aspects structurels des différents types d'aimants permanents et de matériaux ferromagnétiques ainsi que leurs propriétés. La dite machine montre son énorme potentiel pour une plus large utilisation dans le domaine industriel. Toute fois la MSAP peut parfois être exposée à de différents défauts tels que les défauts de court-circuit ou de démagnétisation, ce qui constitue l'objet du second chapitre.

Le chapitre suivant sera consacré à la méthode d'analyse spectral ROOT-MUSIC et à ses applications, notamment en matière de détection et de localisation des défauts au niveau de la machine synchrone.

Chapitre II:

Méthode d’analyse spectrale ROOT-MUSIC

II.1 Introduction :

L'analyse spectrale joue un rôle central dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques, en fournissant un outil essentiel pour l'étude et la caractérisation de phénomènes complexes. Elle consiste, de manière générale, à décomposer un signal en ses composantes fréquentielles, ce qui permet de mettre en lumière des informations fondamentales sur sa structure et son comportement. Cette méthode trouve des applications variées, allant de la physique et l'ingénierie à la biologie et la finance. En tirant parti des propriétés spectrales des signaux, les chercheurs sont en mesure de révéler des données dissimulées, de détecter des anomalies et d'optimiser les performances des systèmes.

Dans le cas particulier des moteurs synchrones, l'analyse spectrale s'avère être un outil crucial pour l'identification, la caractérisation et le diagnostic de défauts potentiels. En effet, des anomalies telles que la démagnétisation ou l'excentricité du rotor se traduisent souvent par des signatures spécifiques dans le spectre des signaux électriques ou mécaniques. En isolant les fréquences caractéristiques associées à ces défauts, les ingénieurs peuvent localiser leur origine, en estimer la gravité et mettre en œuvre des stratégies de maintenance préventive ou corrective. L'analyse spectrale devient ainsi un élément fondamental dans la surveillance et la gestion de l'état de santé des moteurs synchrones, contribuant directement à leur fiabilité et à leur efficacité.

Ce chapitre n'a pas pour objectif de présenter de manière exhaustive l'ensemble des méthodes de haute résolution (HR), mais plutôt d'introduire les principes fondamentaux sur lesquels elles reposent. À ce titre, seules certaines approches seront abordées, telles que les méthodes de Prony, de Pisarenko, ESPRIT et ROOT-MUSIC.

II.2 Les méthodes de Haute Résolution (HR)

Les méthodes de Haute Résolution (HR) ont évolué depuis les travaux de Proney en 1795, qui cherchaient à estimer des sommes d'exponentielles à l'aide de techniques de prédiction linéaire. Plus récemment, Pisarenko a approfondi cette approche pour estimer des sinusoïdes. En comparaison, les méthodes HR modernes exploitent les propriétés spécifiques de la matrice de covariance du signal. Elles utilisent la décomposition de cette matrice pour séparer l'espace des données en deux sous-espaces : l'espace signal, composé des sinusoïdes, et l'espace bruit,

orthogonal à celui-ci. Les méthodes HR basées sur cette décomposition sont réputées pour leur robustesse par rapport aux techniques de prédiction linéaire. Parmi ces méthodes, on trouve MUSIC et ROOT-MUSIC (qui se concentrent sur l'espace bruit), ainsi que l'algorithme ESPRIT (qui se focalise sur l'espace signal). [18] [19] [20] [21]

Nous commençons par présenter ici les méthodes à haute résolution les plus anciennes, qui utilisent des techniques de prédiction linéaire, avant d'explorer les méthodes plus récentes de type sous-espace.

II.2.1 Méthode de Prony

Les travaux du baron de Prony ont été à l'origine du développement des méthodes à haute résolution. Il a proposé une méthode d'estimation inspirée de résultats antérieurs sur les équations de récurrence linéaires. Initialement conçue pour estimer des exponentielles réelles non bruitées, cette méthode est ici appliquée à l'estimation d'exponentielles complexes bruitées. La méthode de Prony implique premièrement la détermination d'un polynôme P[z] à l'aide de techniques de prédiction linéaire, puis l'extraction des racines de ce polynôme. [17].

II.2.2 La méthode de Pisarenko

Une variante de la méthode de Prony, implique la minimisation de la puissance de l'erreur. La méthode de Pisarenko implique le calcul et la diagonalisation de la matrice d'auto-correlation, puis la détermination du vecteur propre p associé à la plus petite valeur propre, suivi de l'extraction des racines du polynôme P[z]. Les méthodes de Prony et de Pisarenko sont parmi les plus anciennes méthodes HR, mais elles sont généralement considérées comme peu robustes en pratique. C'est pourquoi les méthodes de type sous-espace, plus récemment proposées, sont généralement préférées.

II.2.3 Classification des méthodes à haute résolution

- **Méthodes basées sur la notion de sous-espace:**

II.2.3.1Méthodes à recherche spectrale:

Elles utilisent l'analyse du spectre via la projection orthogonale des vecteurs d'observation sur le sous-espace bruit. Exemples : MUSIC, prédiction linéaire. Limitées par la précision des extrémums recherchés et sensibles au bruit et au couplage mutuel.

II.2.3.2 Méthodes sans recherche spectrale:

Elles exploitent l'invariance rotationnelle du sous-espace signal et l'invariance transrationnelle de la structure du réseau de capteurs des signaux.

II.2.4 L'algorithme MUSIC (Multiple Signal Classification):

Dans le domaine du traitement d'antennes, la méthode MUSIC a d'abord été proposée de manière autonome par Schmidt bienvenu et Kopp dans les années 1980, est une technique largement utilisée dans le domaine du traitement du signal pour estimer les paramètres des signaux sinusoïdaux à partir des données bruitées La décomposition en vecteurs propres de la matrice d'autocorrélation est utilisée par l'algorithme MUSIC en relation avec le vecteur des observations. L'espace des observations est divisé en deux espaces vectoriels orthogonaux grâce à cette décomposition : le sous espace de signal et son complément orthogonal, ou le sous-espace bruit.

II.2.5 La méthode ROOT-MUSIC :

La technique ROOT-MUSIC offre une puissance considérable pour détecter la fréquence du signal immergé dans un bruit, mais son principal désavantage réside dans le temps de calcul élevé de la fréquence lorsque l'ordre des dimensions du signal est élevé ou lorsque de nombreux échantillons sont nécessaires. C'est pourquoi cette méthode ne peut être employée que dans le diagnostic en ligne. On sait que lorsque le signal à traiter peut être représenté par une somme d'exponentielles complexes pondérées, les méthodes les plus efficaces pour extraire l'information utile sont les méthodes appelées méthodes de l'extraction de l'information utile. La méthode MHR, qui fait partie de la famille ROOT-MUSIC, vise à diviser l'espace initial en deux sous espaces vectoriels orthogonaux : le sous-espace signal et son complément orthogonal, l'espace sous-bruit.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la méthode de ROOT-MUSIC, examinons de plus près les étapes cruciales qui la composent, permettant ainsi une analyse robuste des fréquences dans un signal

II.2.6 Les étapes :

II.2.6.1 Lecture des données:

Pour commencer, il est essentiel de recueillir les données indispensables à notre analyse. Celles-ci proviendront très probablement de capteurs installés sur le moteur synchrone, chargés de mesurer les signaux électriques ou mécaniques qu'il émet.

II.2.6.2 Calcul de la fonction d'autocorrélation:

Cette étape consiste à calculer la fonction d'autocorrélation des données recueillies. Celle-ci permet d'évaluer la similitude entre un signal et une version décalée de ce même signal, en fonction du décalage appliqué.

II.2.6.3 Calcul des vecteurs propres :

Ensuite, la méthode ROOT-MUSIC est utilisée pour déterminer les vecteurs propres de la matrice d'autocorrélation. Ces vecteurs représentent les directions caractéristiques des signaux contenus dans les données, au sein de l'espace vectoriel considéré.

II.2.6.4 Détermination des fréquences :

Une fois les vecteurs propres calculés, la méthode ROOT-MUSIC permet d'estimer les fréquences des signaux présents dans les données. Ces fréquences sont associées aux défauts du moteur synchrone que nous cherchons à identifier.

II.2.6.5 Détermination des énergies :

Enfin, il est possible de déterminer l'énergie associée à chaque fréquence estimée. Ces énergies reflètent l'importance relative des différentes composantes fréquentielles présentes dans les données. En général, des énergies plus élevées indiquent des signaux plus intenses, souvent liés à des défauts plus significatifs dans le moteur synchrone.

Maintenant que nous avons une vision claire des différentes étapes à suivre, passons à leur application concrète à travers des calculs détaillés.

Conformément à notre hypothèse, le courant du stator Is(n) s'exprime comme suit :

$$I_s(n) = \sum_{i=1}^{L} e^{\mathrm{j}(2\pi.\frac{\mathrm{fi}}{\mathrm{fsh}}.\mathrm{n}+\Phi\mathrm{i})} + w(n)$$

(1)

- $\boldsymbol{I_i, f_{i,} \Phi_i}$ **:** Sont l'amplitude, la fréquence et la phase aléatoire de la sinusoïde complexe **i** (composants harmonique).
- **n**=0, 1,2..... (N-1).
- **W(n)** : Le bruit.
- $\boldsymbol{f_{sh}}$: La fréquence d'échantillonnage.
- **N**: Nombre d'échantillonnage.
- **L**: Nombre de sinusoïdes ou des sources.

La matrice d'autocorrélation du signal de bruit est la somme des matrices d'auto-corrélation du signal $\boldsymbol{i_s}$, et le bruit **W** définit comme suit :

$$\boldsymbol{R_i = R_s + R_w = E[i_s(n).i_s^H(n)] + E[w(n).W^H(n)] = S.A.S^H + \sigma_w^2.I}$$

(2)

- $\boldsymbol{i_s(n)}$**= [**$\boldsymbol{i_1}$ ... $\boldsymbol{i_L}$**]** Vecteur d'observation. °(•) Est l'opérateur de transposition - conjugaison c'est-à-dire le vecteur complexe transposé et conjugué (hermitien transposent en anglais).
- $(\bullet)_{\boldsymbol{H}}$: Est l'opérateur de transposition –conjugaison c'est-à-dire le vecteur complexe transposé et conjugué (hermitien transposent en anglais).
- **E** (•) L'espérance mathématique.
- **I** : Etant la matrice identité de la taille (N ×N).
- **S= [**$\boldsymbol{S_1}$**...**$\boldsymbol{S_i}$ **....**$\boldsymbol{S_L}$ **; ; :** Vecteur d'observation.

$$\boldsymbol{S_i = [1e^{j.2\pi\frac{f_i}{fsh}}\ e^{j.4\pi.\frac{f_i}{fsh}} \dots \dots e^{j.2\pi}(N-1).\frac{f_i}{fsh}]^T} \quad \textbf{(3)}$$

- **A** : Est la matrice de puissance des harmoniques

$$\boldsymbol{A = diag\left[I_1^2 I_2^2 \ldots . . I_n^2\right]}$$

(4)

- $\boldsymbol{\sigma_w^2}$: La variation du bruit blanc
- $\boldsymbol{Ii}$: la matrice d'identité.

La décomposition en valeurs propres de la matrice d'autocorrélation R_i est donnée par :

$$\boldsymbol{R_i = \sum_{K=1}^{N} \lambda_k . \mu_k . \mu_K^H = \underbrace{U_s . D_s . U_S^H}_{R_s} + \underbrace{U_W . D_W . U_W^H}_{R_w}} \quad \textbf{(5)}$$

Ou :

$\boldsymbol{\lambda_K; \mu_K}$ **:** Vecteurs et valeurs propres de $\boldsymbol{R_i}$

$$\begin{cases} \boldsymbol{U_s = [U1 \ \ldots u_1]; D_s = \text{diag}\,[\lambda_1 \lambda_1]} \\ \boldsymbol{U_w = [u_{1+1} \ldots u_N];\ D_W = \sigma_W^2 . I_{N-1}} \end{cases}$$

(6)

Les matrices $\boldsymbol{U_s}$ *et* $\boldsymbol{U_w}$ et UW sont composées par les valeurs propres de vecteurs propres disposées dans l'ordre décroissant. L'équation (5) montre cela, nous pouvons diviser ces vecteurs propres en deux groupes ou sous-espaces :

L vecteurs propres correspondant à **L** les plus grandes valeurs propres (sous espaces de signal $\boldsymbol{E_s}$), et N-1 vecteurs propres de bruit qui idéalement ont des valeurs propres égales à $\boldsymbol{\sigma_w^2}$ (sous-espace de bruit $\boldsymbol{E_b}$).

Les matrices diagonales $\boldsymbol{D_s}$ et $\boldsymbol{D_w}$ contiennent les valeurs propres $\boldsymbol{\lambda_k}$ correspondant aux vecteurs propres ; car les valeurs propres du bruit sont égales à la variation du bruit, la matrice

D_W peut être écrite comme montré dans l'équation (6, en comparant les équations (2), (5) et (6) nous pouvant écrire :

$$\boldsymbol{R_i.U_W = U_W.D_W = \sigma_W^2.D_W = S.A.S^H.U_W + \sigma_W^2.U_W}$$

(7)

Ce qui implique que :

$\boldsymbol{S^H.U_W = 0}$ Avec $\begin{cases} \boldsymbol{S_i \in E_S; i = 1, \dots, L} \\ \forall \cup \in \boldsymbol{E_b} \end{cases}$

La méthode de Root-Music emploie le principe de cette orthogonalité entre le sous-espace de signal et le sous-espace de bruit. Les fréquences d'estimation requis

$\boldsymbol{Z_i = e^{j.2\pi\frac{fi}{fsh}}}$ Sont les racines d'équations (7) et la quelle peut être exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{U_{(z)} = \sum_{K=0}^{L-1} I_k . Z_i^{-k}}$$

$$\boldsymbol{S_i^H.U_i^H.U_i.S_i = 0} \quad \text{Avec } \mathbf{i = 1, 2, L} \qquad \mathbf{(8)}$$

Les matrices de (4) vont en paires (c-à d si $\boldsymbol{Z_i}$ est une racine, $\boldsymbol{1/Z_i}$. est aussi). Ces L racines les plus proches du cercle unité correspondent aux harmoniques possibles selon :

$$\boldsymbol{f_i = \frac{f_{sh}}{2\pi}.\arg(Z_i)} \quad \text{Avec} \quad \mathbf{i = 1,2,\dots, L} \qquad \mathbf{(9)}$$

II.2.7 Estimation de puissances des harmoniques:

Savoir ceci :

$$\boldsymbol{R_s = S.A.S^H = \sum_{K=1}^{L} (\lambda_k + \sigma_W^2) u_k.u_h^k}$$

(10)

Il est plus facile à inverser $\mathbf{R_s}$ qu'à inverser **S**. par conséquent les puissances d'harmoniques peuvent être estimées par la méthode suivante :

$$\mathrm{Q} = \boldsymbol{A^{-1} = \frac{1}{S^H.S.R_s^{-1}}}$$

(10)

Là où:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R_s^{-1}} = \sum_{K=1}^{L} \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\lambda_k} + \boldsymbol{\sigma_w^2}} . \boldsymbol{u_k} . \boldsymbol{u_k^H} \\ \boldsymbol{\sigma_w^2} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{N - L}} \sum_{k=L+1}^{N} \boldsymbol{\lambda_k} \end{cases}$$

(11)

Le problème d'identification est résolu en sachant les fréquences et les puissances des divers harmoniques. En outre, le rang (l'ordre) de sous-espace qui nous permet d'estimer le positionnement de fréquences. En raison de la longueur finie de données, nous ne pouvons pas avec précision calculer la matrice de corrélation.

II.3 L'organigramme de l'algorithme ROOT - MUSIC :

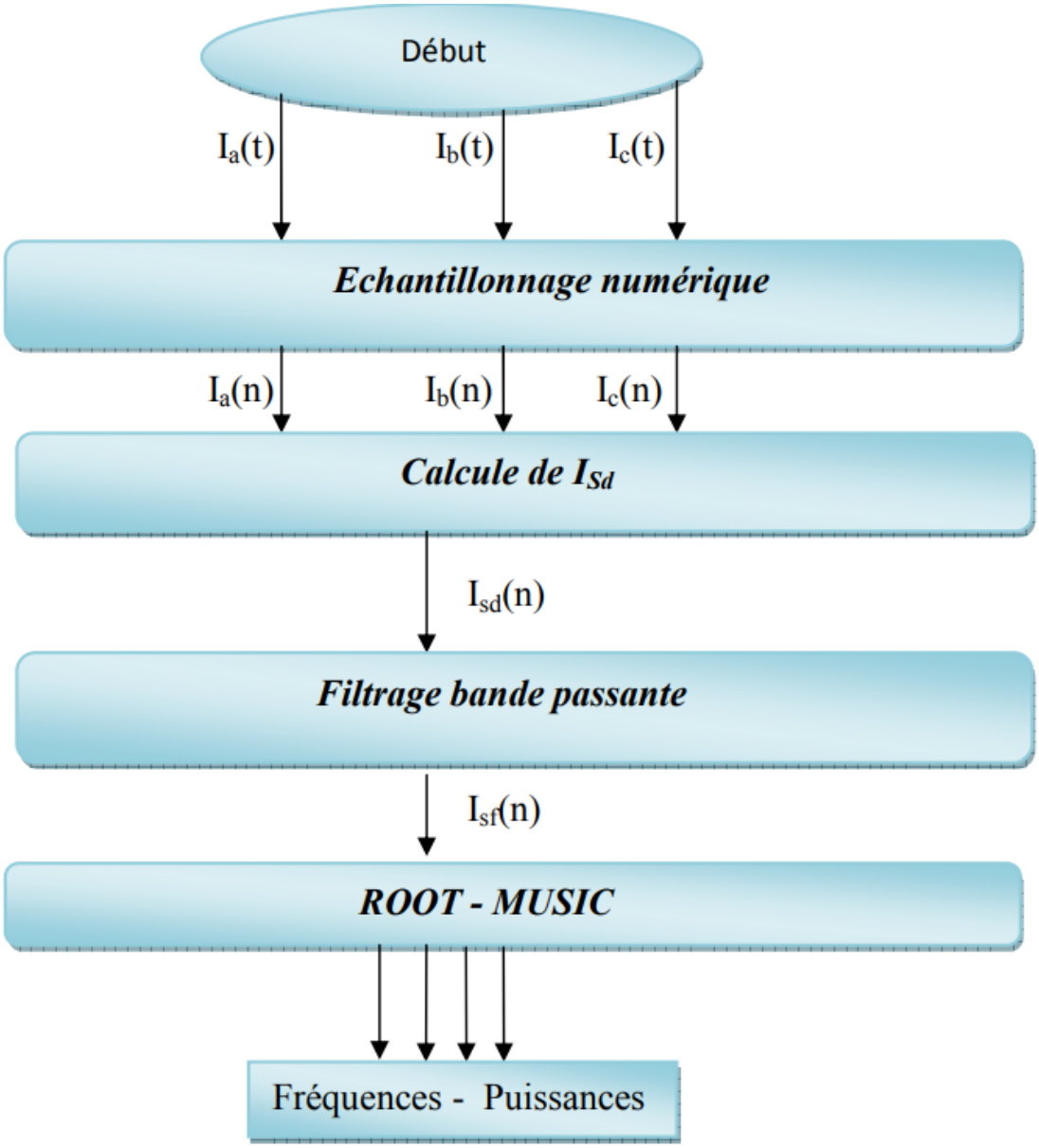


Figure II.1 L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la détection et la classification des défauts à travers l'extraction des paramètres du courant statorique, en utilisant la méthode **Root-MUSIC**, une technique d'analyse spectrale à haute résolution. Il a été constaté que cette méthode offre une résolution fréquentielle nettement supérieure à celle d'autres techniques d'extraction de paramètres. Par ailleurs, la mise en œuvre de cette méthode sera traduite par le développement d'un programme en langage **MATLAB**.

Chapitre III : La méthode SVM (support vector machine)

III.1 Introduction :

La fiabilité des machines électriques, notamment les moteurs à aimants permanents (MSAP), est un enjeu crucial dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'automobile ou encore l'énergie. Parmi les défaillances susceptibles de compromettre leurs performances, les défauts d'excentricité et de démagnétisation occupent une place importante. L'excentricité, qu'elle soit statique ou dynamique, perturbe la symétrie du champ magnétique, tandis que la démagnétisation affecte directement l'intensité du flux magnétique généré par les aimants permanents. Ces deux types de défauts peuvent entraîner une dégradation progressive du moteur, une réduction du rendement énergétique, voire des pannes irréversibles.

Dans ce contexte, il devient impératif de développer des méthodes de diagnostic efficaces, capables non seulement de détecter précocement ces défauts, mais aussi de les distinguer avec précision. Les approches classiques basées sur l'analyse spectrale ou sur des modèles physiques présentent certaines limites en termes de sensibilité et de robustesse face à la variabilité des conditions de fonctionnement. L'émergence de techniques d'apprentissage automatique, et plus particulièrement des machines à vecteurs de support (SVM – Support Vector Machine), ouvre de nouvelles perspectives pour le traitement et la classification des données issues de la surveillance conditionnelle.

La méthode SVM s'avère particulièrement adaptée aux problèmes de classification binaire ou multi-classes, grâce à sa capacité à trouver un hyperplan de séparation optimal dans un espace de caractéristiques, même en présence de données non linéairement séparables. Dans le cadre de ce mémoire, nous étudierons l'application des SVM à la séparation des défauts d'excentricité et de démagnétisation, à partir de signatures issues de signaux électromagnétiques ou mécaniques.

III.2 Historique :

Les séparateurs à vastes marges (Support vector machine) reposent sur deux idées clés : la notion de marge maximale et la notion de fonction noyau. Ces deux notions existaient depuis plusieurs années avant qu'elles ne soient mises en commun pour construire les SVM. L'idée des hyperplans à marge maximale a été explorée dès 1963 par Vladimir Vapnik et

A. Lerner, et en 1973 par Richard Duda et Peter Hart dans leur livre 'Pattern Classification'. Les fondations théoriques des SVM ont été explorées par Vapnik et ses collègues dans les années 70s avec le développement de la théorie de Vapnik-Chervonenkis, et par Valiant et la théorie de l'apprentissage PAC. [23]

L'idée des fonctions noyaux n'est pas non plus nouvelle : le théorème de Mercer date de 1909, et l'utilité des fonctions noyaux dans le contexte de l'apprentissage artificiel a été montrée dès 1964 par Aizermann, Bravermann et Rozoener.

Ce n'est toutefois qu'en 1992 que ces idées seront bien comprises et rassemblées par Boser, Guyon et Vapnik dans un article, qui est l'article fondateur des séparateurs à vaste marge. L'idée des variables ressorts, qui permet de résoudre certaines limitations pratiques importantes, ne sera introduite qu'en 1995. À partir de cette date, qui correspond à la publication du livre de Vapnik, les SVM gagnent en popularité et sont utilisés dans de nombreuses applications. [24] Un brevet américain sur les SVM est déposé en 1997 par les inventeurs originels. [23][24]

III.3 Présentation de SVM :

Les SVM sont un ensemble de techniques d'apprentissage supervisé destinées à résoudre des problèmes de la classification binaire et de la régression. Les SVM reposent sur deux idées principales : la notion de la marge maximale et la notion de la fonction noyau. La marge maximale est employée pour les problèmes de la classification linéaire. Elle représente la distance entre la frontière de séparation et les échantillons d'apprentissages les plus proches. Ces derniers sont les vecteurs supports. Les fonctions noyau sont employées dans le cas des problèmes de la classification non-linéaire pour transformer l'espace de représentation des données d'entrées en un espace de plus grande dimension dans lequel il est probable qu'il existe de séparateurs linéaires [25].

Le classificateur SVM est un algorithme qui maximise la marge entre les classes du problème à résoudre et réduit au minimum l'erreur de classification.

L'objectif de la marge maximale est de faire séparer deux classes par un hyperplan de telle sorte la distance par rapport aux vecteurs supports soit maximale [26]

III.4 Principes de fonctionnement général de la technique SVM :

A l'origine, la méthode des machines à vecteurs de supports était destinée à la classification binaire. Elle a été présentée dans plusieurs travaux [27],[28]. D'une manière simple, soient x1, x2,…, x_n un ensemble d'observations décrites par des attributs prédéfinis. Soient C1 et C2 deux classes possibles. Étant donné un étiquetage connu des n observations en termes de classes, la méthode SVM cherche à estimer les paramètres d'un classificateur pour étiqueter une nouvelle observation. En effet, cela revient à chercher l'hyperplan optimal, celui dont la distance aux exemples d'apprentissage est maximale. Cette distance est appelée marge entre l'hyperplan et les exemples. Les points les plus proches qui suffisent à déterminer cet hyperplan sont appelés vecteurs de support. Comme on cherche à maximiser cette marge, on parlera de méthode des séparateurs à vaste marge [29]

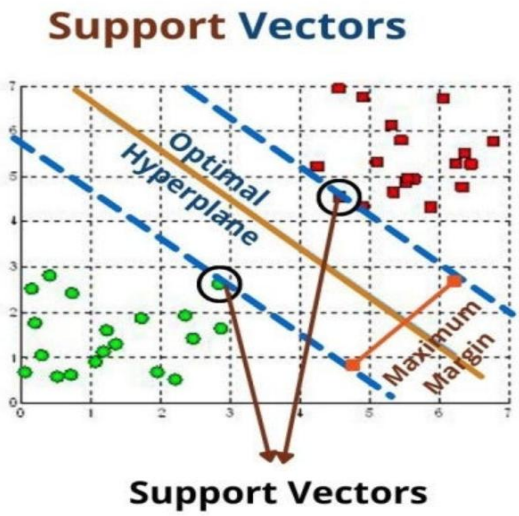


Figure III.1 Hyperplan Optimal séparant les points des deux classes

III.5 Séparation linéaire et non linéaire :

Il existe deux cas de séparation, les cas linéairement séparables et les cas non linéairement séparables. Le premier cas est le plus simple à réaliser mais dans la majorité des cas pratiques, très peu de problèmes peuvent être séparés d'une manière linéaire. Pour surmonter les inconvénients du deuxième cas, l'idée des SVMs est de changer l'espace des données (figure 2). La transformation non-linéaire des données peut permettre une séparation linéaire des

exemples dans un nouvel espace. On va donc procéder à un changement de dimension. Cette nouvelle dimension est appelée « espace de redescription ». En effet, plus la dimension de l'espace de redescription est grande, plus la probabilité de pouvoir trouver un hyperplan séparateur entre les exemples est élevée.

Nous avons donc transformé un problème non linéairement séparable dans l'espace de représentation à deux dimensions à un cas linéairement séparable dans un espace de plus grande dimension qui est l'espace de redescription (Featuresspace).

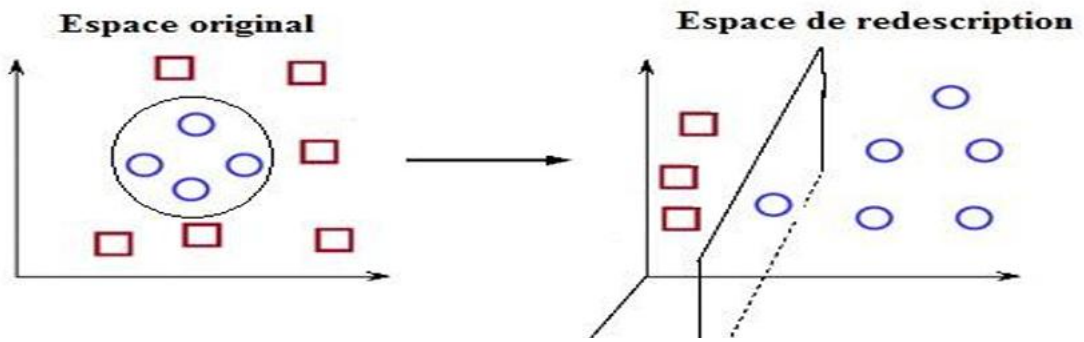


Figure III.2 Transformation d'espace

III.6 Domaines d'applications :

Les SVM est une méthode de classification qui montre de bonnes performances dans la résolution de problèmes variés. Cette méthode a montré son efficacité dans de nombreux domaines d'applications tels que le traitement d'images, la catégorisation de textes ou le diagnostiques médicales et ce même sur des ensembles de données de très grandes dimensions [30].

Plusieurs communautés de chercheurs ont utilisé le SVM dans leurs recherches. Blanz et al, ont utilisé le SVM pour la classification d'objets 2D de vues différentes. Schmidt et al, ont exploré la tâche de reconnaissance d'orateur. Osuna et al, ont développé un système de reconnaissance de visages. Cortes et al, Scholkopf et al, Burges et al, ont appliqué le SVM à la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés [31].

III.7 Avantages des SVMs :

Les SVMs ont un nombre d'avantages sur les autres méthodes statistiques ou les réseaux de neurones :

- Capacité de généralisation induite par la théorie statistique d'apprentissage et le concept de minimisation du risque structurel.
- Pas de problème avec une grande dimension des données. Faire face à des situations complexes lorsque le nombre de variables est plus grand que celui d'observations.
- La solution est parcimonieuse, unique et l'optimum est global.
- Peu de paramètres de réglage.
- Implémentation facile, pas de problème d'instabilité numérique et la rapidité de calcul.
- Capacité d'obtenir un résultat précis même dans le cas de taille réduite de l'ensemble d'apprentissage.
- Manipulation des valeurs aberrantes, et du bruit.
- Elimination des données non significatives par la concentration de l'information utile sur les vecteurs supports.
- Robustesse face aux variations des paramètres du système.
- Construction de modèle non linéaire grâce aux fonctions noyaux.

III.8 Inconvénients des SVMs :

Malgré leurs performances, les SVM représentent aussi des faiblesses, notamment celles-ci :

- Elles utilisent des fonctions mathématiques complexes pour la classification.
- Les machines à support de vecteurs demandent un temps énorme durant les phases de test. Classification binaire d'où la nécessité d'utiliser l'approche un-contre-un.
- Grande quantité d'exemples en entrées implique un calcul matriciel important.

- Temps de calcul élevé lors d'une régularisation des paramètres de la fonction noyau.

III.9 Conclusion :

En résumé, les machines à vecteurs de support (SVM) offrent une méthode de classification robuste et performante, particulièrement adaptée aux problèmes où les classes présentent des frontières complexes. Dans le cadre de ce mémoire, visant à distinguer les défauts d'excentricité et de démagnétisation, les SVM s'imposent comme l'outil idéal grâce à leur capacité à maximiser la séparabilité entre classes, même dans des cas de forte similarité des signatures. Leur efficacité en fait une solution pertinente pour le développement d'un système de diagnostic fiable. Le chapitre suivant présentera l'application concrète de cette méthode à notre problématique.

Chapitre IV : Résultats d'étude & Discussion

IV.1 Introduction :

L'acquisition des courants statoriques triphasés Ia(t), Ib(t), Ic(t) constitue la première étape cruciale de notre processus d'analyse. Ces courants sont mesurés en temps réel, puis convertis en signaux numériques via un échantillonnage approprié. Cette opération permet de transformer les signaux analogiques en une suite de valeurs discrètes Ia(n), Ib(n), Ic(n), facilitant ainsi l'application des techniques de traitement numérique du signal. Une acquisition précise et fiable des courants est essentielle pour garantir une analyse spectrale robuste et fidèle des phénomènes dynamiques affectant le moteur synchrone.

Avant l'application de la méthode **ROOT-MUSIC**, il est indispensable de synchroniser les signaux de courants issus de défauts (démagnétisation et excentricité) avec ceux d'un moteur sain. Cette synchronisation temporelle permet de s'assurer que les différences observées sont bien dues à des défauts spécifiques et non à des variations aléatoires du signal. Elle renforce la précision de l'analyse et facilite l'identification fiable des défauts.

À partir des séquences discrètes ainsi obtenues, on calcule le courant direct Isd(n) puis la matrice d'autocorrélation R, qui joue un rôle central dans l'algorithme ROOT-MUSIC. Cette matrice permet de capter les corrélations entre différentes observations du signal et sert de base à l'estimation des fréquences. La méthode ROOT-MUSIC exploite cette matrice pour déterminer les fréquences et les énergies associées aux composantes du signal. Elle se distingue par sa capacité à fournir des estimations de haute résolution, même en présence de bruit.

Avant l'estimation fréquentielle, un **filtrage bande passante** est appliqué afin d'éliminer les composantes indésirables situées en dehors de la bande de fréquence d'intérêt. Ce filtrage génère un signal filtré Isf(n), qui constitue l'entrée de l'algorithme ROOT-MUSIC.

Une étape essentielle de notre analyse consiste en la détection de **couples de fréquences caractéristiques**, notamment **75 Hz** et **125 Hz**, fréquences révélatrices de défauts typiques dans les moteurs synchrones. Grâce à la précision de la méthode ROOT-MUSIC, ces fréquences peuvent être détectées avec fiabilité, et leur énergie respective estimée. La présence de ces composantes fréquentielles dans le spectre du courant statorique constitue un indicateur potentiel de démagnétisation ou d'excentricité.

L'estimation précise de l'énergie associée à ces fréquences permet de quantifier l'intensité des défauts détectés et de suivre leur évolution dans le temps. Une **analyse comparative** des

énergies correspondant aux défauts de démagnétisation et d'excentricité est ensuite réalisée. Ces deux types de défauts impactent différemment le fonctionnement du moteur synchrone. En comparant les énergies détectées aux fréquences cibles (notamment 75 Hz et 125 Hz), un **diagnostic différentiel** peut être établi. Cette comparaison est déterminante pour la mise en place de **stratégies de maintenance préventive** et pour l'amélioration globale de la fiabilité des moteurs synchrones.

IV.2 Description du Banc de Mesures :

L'objectif principal de ce chapitre est de valider les résultats obtenus par simulation. Cependant, en l'absence d'un banc d'essai adapté au défaut de court-circuit entre spires statoriques, notre étude se limite à l'analyse des défauts suivants:

- **Le défaut d'excentricité**
- **Le défaut de désaimantation.**

Pour ce faire, nous avons utilisé un banc d'essais réalisé par le groupe diagnostic au sein du laboratoire de Développement des Entrainements Electriques (LDEE) de l'université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf (USTO-MB).
Le schéma synoptique du banc d'essais réalisé est illustré par la Figure suivante.

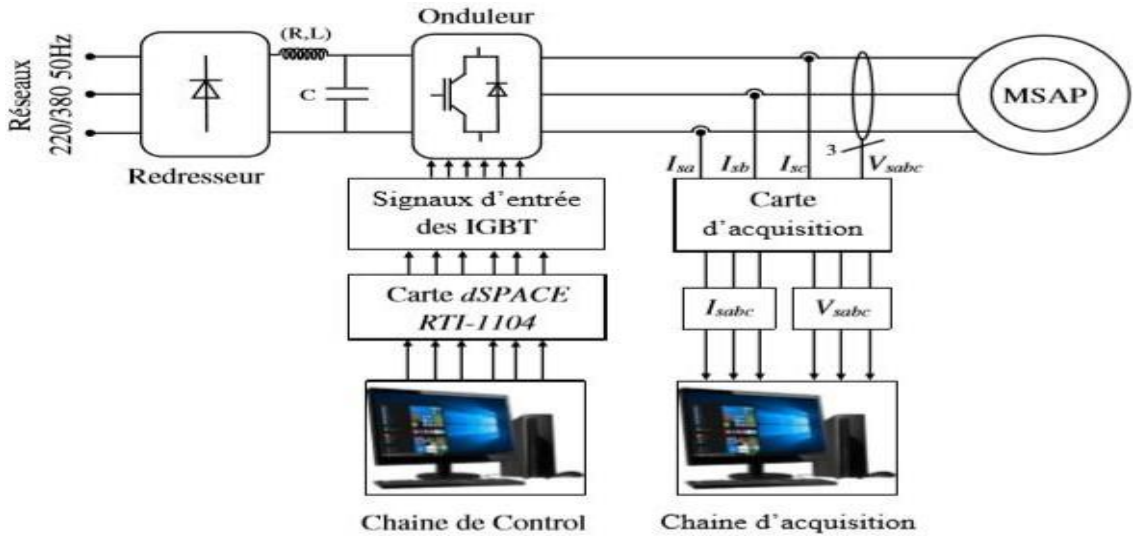


Figure IV.1 Schéma synoptique du banc de mesure réalisé.

L'ensemble des équipements utilisés pour la réalisation des différents essais de notre travail sont illustré par la photo de la Figure IV.2

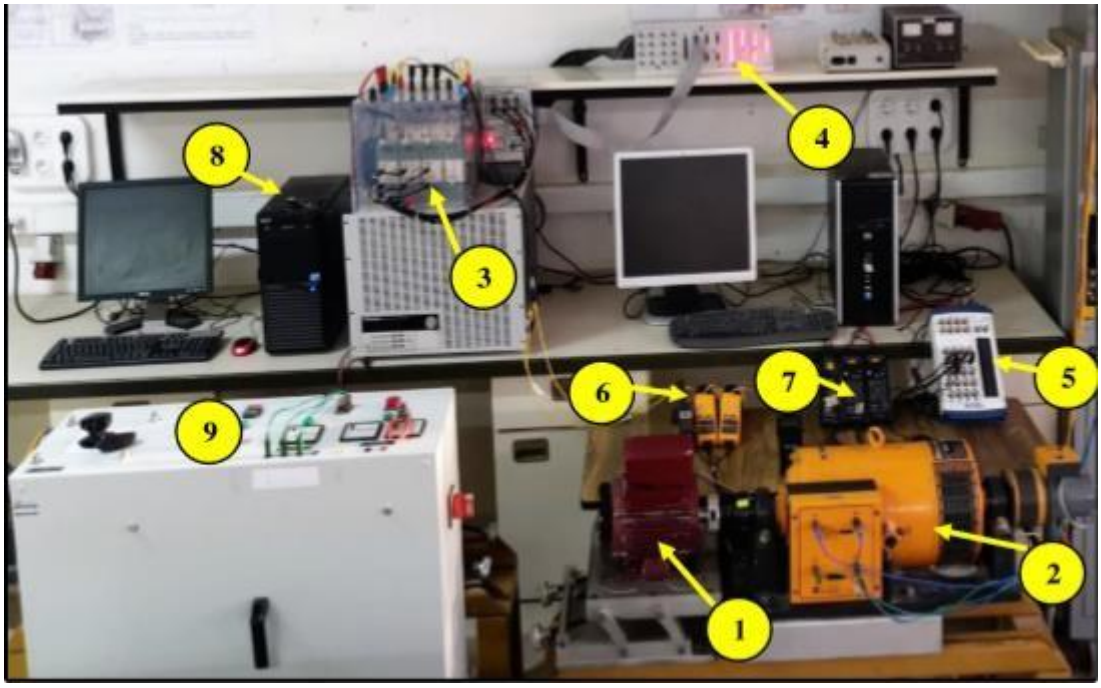


Figure IV.2 Banc de mesures réalisé

IV.2.1 Moteur Synchrone à aimants permanents :

Le moteur utilisé dans nos essais expérimentaux est de type LEROY SOMER LSRPM90SL et de 360 V, 100 Hz, 5.9 A, 8 pôles, 1500 tr/min et 3 kW. La photo de ce moteur est illustrée par la Figure IV. 3



Figure IV.3 MSAP utilisé

IV.2.2 Génératrice à courant continu :

Le moteur utilisé est couplé mécaniquement à une génératrice à courant continu. Cette génératrice alimente un ensemble de résistances jouant le rôle d'une charge mécanique. La photo de cette génératrice est illustrée par la



Figure IV.4 Photo de la génératrice utilisée

IV.2.3 Onduleur triphasée :

Le moteur utilisé est alimenté par un onduleur triphasé du type SEMIKRON AN-8005 à base des IGBT, contrôlé par une carte DSPACE RTI-1104. Les IGBT de cet onduleur sont commandés par la stratégie MLI-SVM avec une fréquence de commutation de 6 kHz. La photo de cet onduleur est illustrée par la Figure. IV.2.3.

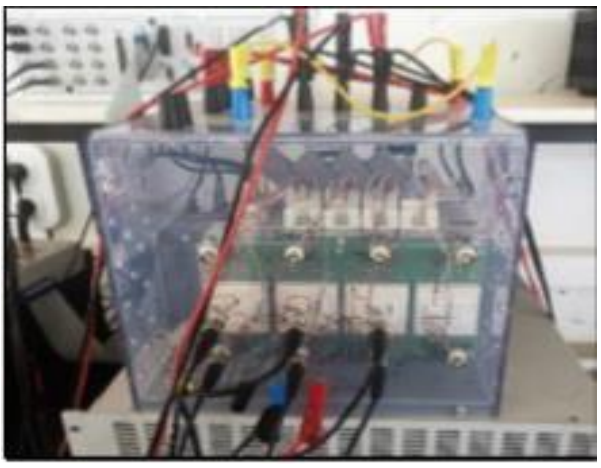


Figure IV.5 Photo de l'onduleur utilisée

IV.2.4 Carte dSPACE :

La dSPACE 1104, est une carte numérique très flexible et puissante comportant des caractéristiques informatiques élevées et des périphériques d'entrées- sorties. Elle joue le rôle d'interface entre l'ordinateur et les IGBT de l'onduleur. La programmation de cette carte est effectuée à l'aide de l'outil « Simulink » sous l'environnement MATLAB. La photo de la dSPACE utilisée est donnée par la figure suivante.



Figure IV.6 Photo de l'onduleur utilisée.

IV.2.5 Carte d'acquisition :

La carte d'acquisition utilisée est de type NATIONAL INSTRUMENT USB-622. Elle présente 8 entrées analogiques. Cette carte est l'élément principal de la chaine d'acquisition car elle permet de numériser les signaux analogiques.



Figure IV.7 Photo de la carte d'acquisition utilisée

IV.2.6 Capteur de courant :

Les capteurs de courant utilisés sont des capteurs à effet hall du type FLUCK i30s (AC/DC CURRENT CLAMP). Ces capteurs ont pour rôle de mesurer et de donner une image des courants statoriques. Le courant maximal pouvant être mesuré est de ± 20 A. La photo de ce capteur est donnée par la figure suivante.



Figure IV.8 Capteur de courant FLUKE i30s

IV.2.7 Capteur de tension :

Les capteurs de tension utilisés sont des capteurs du type TEKTRONIX P5200. Ces capteurs mesurent et donnent une image des tensions entre phases du MSAP. La tension maximale pouvant être mesuré est de ± 1000 V. Ce capteur est illustré par la figure suivante.



Figure IV.9 Capteur de tension TEKTRONIX P5200

IV.2.8 Micro-ordinateur :

Le micro-ordinateur utilisé pour la chaine d'acquisition présente les caractéristiques suivantes : Une RAM de 2 GB et un processeur de type AMD de 3 GHz. Cet ordinateur a pour rôle de commander la carte d'acquisition. De plus, il permet aussi de visualiser, analyser, traiter et stocker les différents signaux captés.

IV.3 L'application de la méthode ROOT-MUSIC :

Dans l'application de la méthode ROOT-MUSIC pour la détection des défauts de démagnétisation et d'excentricité dans le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), plusieurs paramètres spécifiques sont utilisés.

Tout d'abord, la méthode ROOT-MUSIC nécessite un certain nombre d'échantillons de données pour effectuer une analyse précise. Ce nombre est déterminé par la durée de chaque essai et la fréquence d'échantillonnage. Ainsi, le nombre d'échantillons utilisés est calculé en multipliant la fréquence d'échantillonnage (fsh) par la durée de chaque essai en secondes.

Ensuite, la fréquence d'échantillonnage (fsh) est un paramètre essentiel pour garantir une représentation précise du signal. Elle est généralement fixée à 3 kHz dans cet exemple, ce qui permet une résolution fréquentielle de 0.025 Hz. Le nombre de sinusoïdes ou de sources (L) est également un paramètre important pour l'analyse ROOT-MUSIC. Dans ce cas, L est défini comme étant égal à deux fois le paramètre P choisi par l'utilisateur. P est un paramètre déterminé par l'utilisateur en fonction des exigences spécifiques de l'application ou des caractéristiques du système étudié.

Les données utilisées dans les essais comprennent les courants statoriques triphasés (ia, ib, ic) du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces courants sont enregistrés dans des fichiers de données distincts, tels que

"DMF_1_pole_20S_3kHz_Essai_01.mat",
"Dynamic_Eccentricity_10_percent_4_0_10S_3kHz_Essai_01.mat",

"Ancien_MSAP_Sain_10_sec_01.mat". Ces fichiers suggèrent que les signaux ont été acquis avec une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz et pour des durées variant de 10 à 20 secondes.

Les trois différents phénomènes étudiés dans ces essais incluent le défaut de démagnétisation (DMF), le défaut d'excentricité (EF), ainsi que l'état sain du moteur (MS). Les essais sont réalisés pour différents pourcentages de défauts d'excentricité (par exemple, 10%, 20%, 30%) et de démagnétisation (par exemple, 2 pôles affectés), avec des durées d'acquisition de 10

secondes et 20 secondes. Ces variations permettent d'évaluer la performance de la méthode ROOT-MUSIC dans la détection et la caractérisation des défauts dans des conditions diverses et réalistes.

IV.4 Détails et étapes des programmes MATLAB :

- **Programme analyse.m:** Ce programme charge les données de chaque état (sain, démagnétisé, excentré), synchronise les séries temporelles et applique la méthode ROOT-MUSIC pour analyser les fréquences et puissances des signaux.
- **Programme displayPowerAtFrequencies.m:** Affiche les puissances à des fréquences spécifiques pour un état donné du moteur.
- **Programme RM_data.m** : Calcule les fréquences et puissances des composantes du signal en utilisant la méthode ROOT-MUSIC, en plus il utilise corrmtx pour calculer cette matrice à partir des données fournies, utilise ROOT-MUSIC pour estimer les fréquences et puissances correspondantes.

  Autres fonctions principales :

  - Synchronisation des courants de démagnétisation et d'excentricité par rapport aux courants d'un moteur sain pour une comparaison précise.
  - Affichage des spectres de puissance pour les trois états du moteur à différentes fréquences ciblés (75 Hz, 125 Hz)

IV.5 Création des défauts :

IV.5.1 Création du défaut d'excentricité :

Pour créer un défaut d'excentricité dans un MSAP, une grande précision est nécessaire à cause de l'épaisseur de l'entrefer. Il existe plusieurs façons d'introduire ce type de défauts exprimés comme suit :

- **Excentricité Statique :** Pour créer une excentricité statique, nous insérons une bague de forme ovale entre la bague externe du roulement et le flasque. Les dimensions de la bague interne sont maintenues identiques dans cette configuration.

- **Excentricité Dynamique :** Pour l'excentricité dynamique, le processus est similaire. Cependant, nous conservons les dimensions de la bague externe et plaçons une bague de forme ovale entre l'arbre de rotation et la bague interne du roulement

La Figure suivante illustre les roulements avec ces bagues supplémentaires, montrant le mécanisme utilisé pour introduire le défaut d'excentricité.



Figure IV.10 Mécanisme de création du défaut d'excentricité

IV.5.2 Création du défaut de désaimantation :

La création du défaut de désaimantation dans les MSAP est réalisée par différentes manières, selon la structure du rotor (aimants en surface, aimants insérés,). Dans notre étude, la structure du rotor est de type inséré avec une concentration de flux.

La création du défaut de désaimantation dans ce cas est réalisée avec différentes sévérités en remplaçant un ou plusieurs aimants situés aux rotors par un matériau ferromagnétique comme la montre la Figure. IV.5.2(b). Le remplacement de ces aimants par le matériau ferromagnétique est réalisé afin de garder une certaine aimantation à l'aide du matériau utilisé et de maintenir le même entrefer dans la machine même en présence du défaut de désaimantation.

Toutes les acquisitions sont réalisées en régime permanent avec une vitesse de rotation de 1500 tr/min. Les paramètres d'acquisition choisis sont respectivement : un temps d'acquisition de 40 s et une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz. Dans ces conditions, nous obtenons une résolution fréquentielle égale à 0.025 Hz. Pour avoir une analyse plus fiable et

vue le caractère aléatoire des signaux mesurés, plusieurs acquisitions ont été effectuées pour chaque mode de fonctionnement.

Les différents modes de fonctionnement traités sont :

- Fonctionnement du moteur sain ;
- Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité ;
- Fonctionnement du moteur en présence du défaut de désaimantation.

La figure suivante illustre la procédure de création du défaut de désaimantation

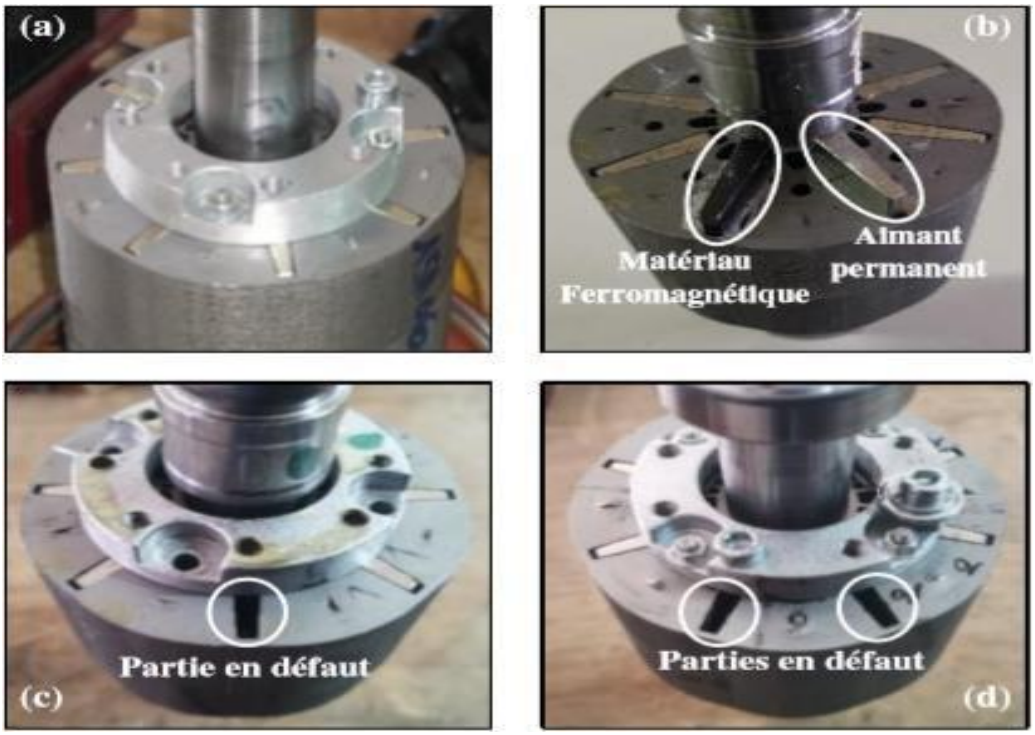


Figure IV.11 Procédure de création de défaut de désaimantation

IV.6 Signatures fréquentielles des défauts étudiés :

Pour mieux comprendre les défauts potentiels dans notre moteur synchrone, nous avons examiné les signatures fréquentielles associées aux défauts d'excentricité et de désaimantation. En utilisant les équations pertinentes et les paramètres fixes de notre machine, nous avons déterminé les fréquences caractéristiques de ces défauts. Le tableau ci-dessous présente les valeurs des différentes fréquences étudiées.

Type de défaut	Signatures fréquentielles	
	1ère signature	2ème signature
Défaut d'excentricité	75Hz	125 Hz
Défaut de démagnétisation	75 Hz	125 Hz

Tableau IV-1: Signatures fréquentielles des défauts étudiés

IV.7 Fonctionnement du moteur sain :

Pour détecter la présence de défauts dans un moteur synchrone, tels que la démagnétisation et l'excentricité, il est essentiel de comprendre d'abord le fonctionnement normal du moteur sain. Un moteur synchrone en bon état présente une réponse spectrale spécifique, caractérisée par une distribution régulière des harmoniques de fréquence en fonction de la vitesse de rotation et de la fréquence d'alimentation. Lorsqu'un défaut est présent, cette réponse spectrale est altérée, ce qui permet de diagnostiquer le problème.

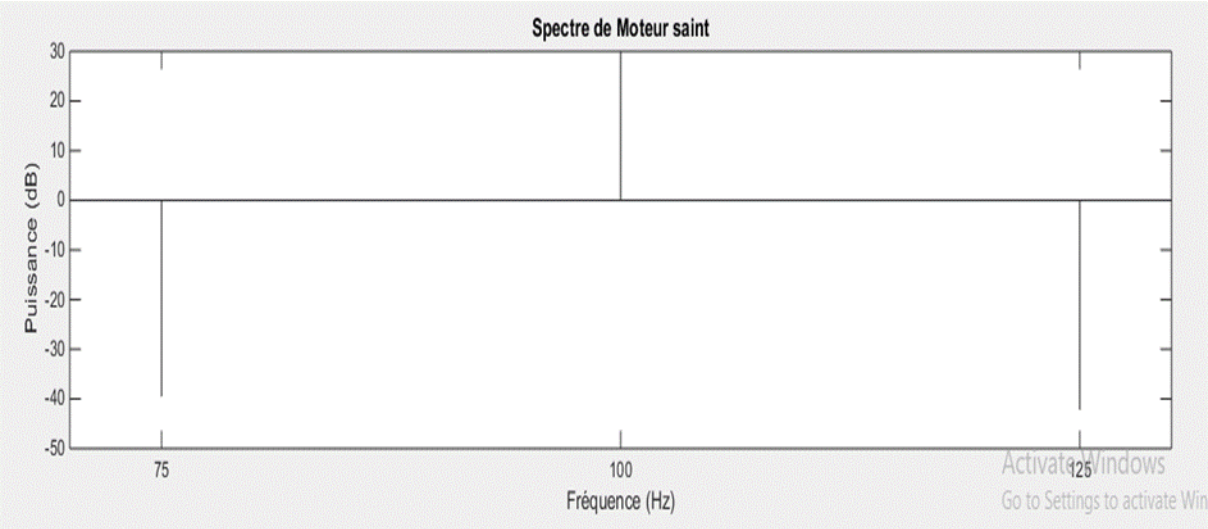


Figure IV.12 Moteur sain 10S essai 1

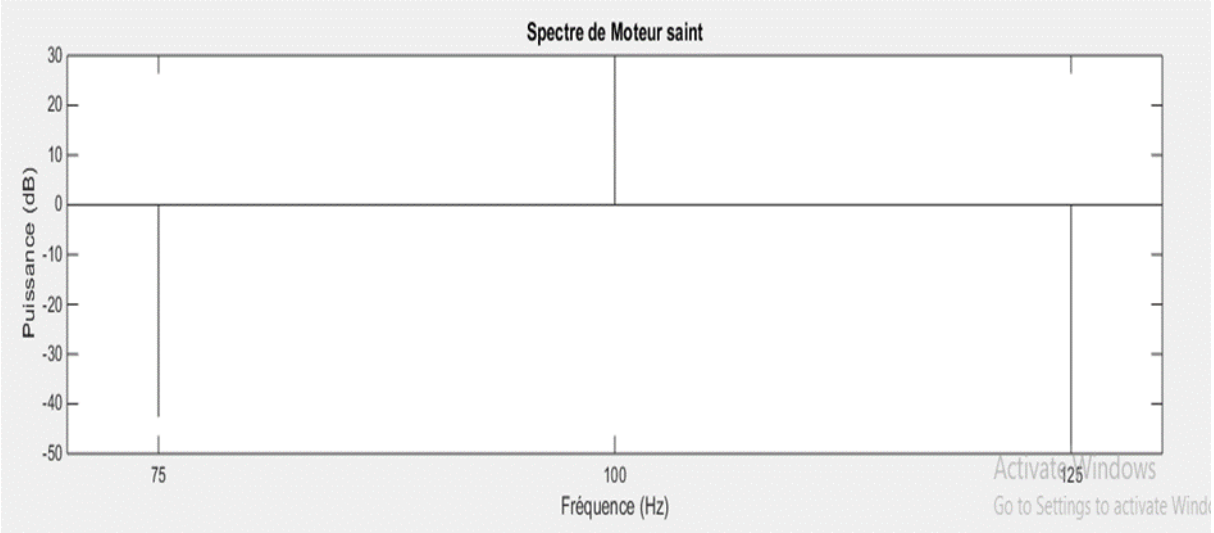


Figure IV.13 Moteur sain 10s essai 2

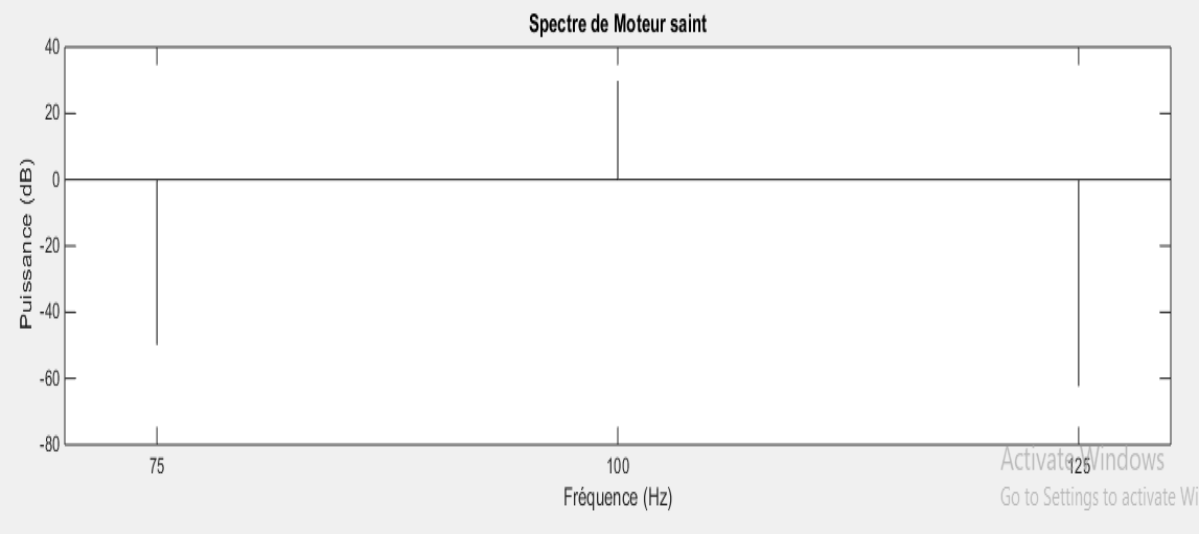


Figure IV.14 Moteur sain 20s essai 1

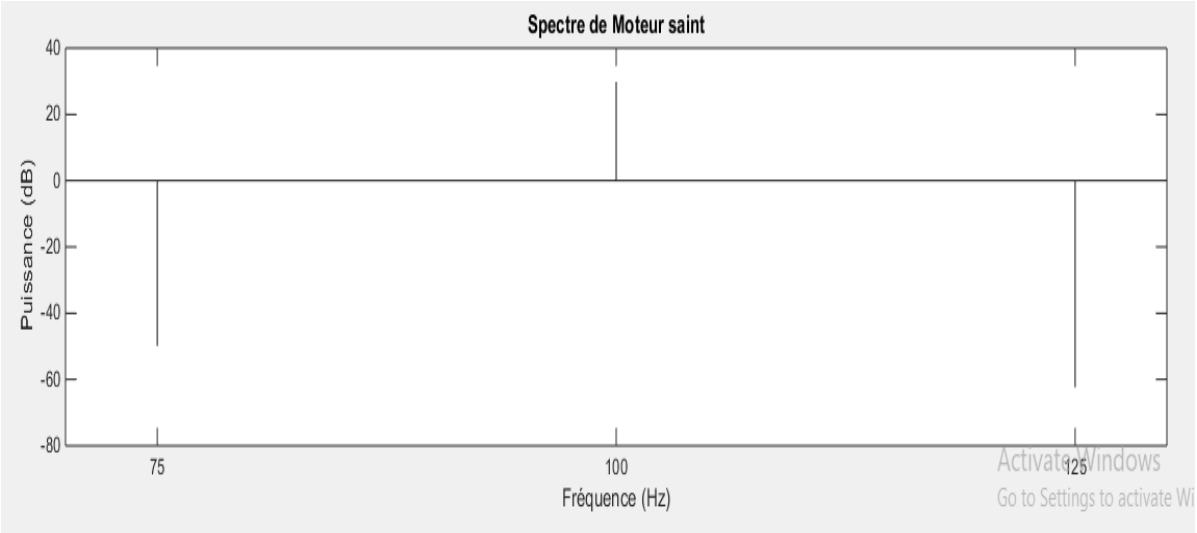


Figure IV.15 Moteur sain 20s essai 2

Les graphes ci-dessus montrent les résultats de l'analyse spectrale d'un moteur synchrone sain, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC, pour différentes durées d'essai (10s et 20s). Malgré l'absence de défauts, on observe la présence de pics à des fréquences spécifiques sur tous les graphes. Ces pics correspondent probablement aux fréquences caractéristiques du moteur sain, liées à sa conception et à son fonctionnement nominal.

La localisation et l'amplitude des pics sont très similaires entre les différents essais de même durée, ce qui témoigne de la répétabilité et de la fiabilité de la méthode ROOT-MUSIC pour l'analyse des moteurs sains. Cette cohérence est particulièrement visible en comparant les graphes de l'essai 1 et l'essai 2 pour chaque durée (10s et 20s).

En comparant les graphes des essais de 10s et 20s, on constate que l'augmentation de la durée d'analyse n'a pas d'impact significatif sur la localisation des pics.

Cependant, l'amplitude des pics est légèrement plus élevée pour les essais de 20s, ce qui suggère qu'une durée d'analyse plus longue peut améliorer le rapport signal/bruit et donc la détection des fréquences caractéristiques du moteur sain.

La présence de pics à des fréquences spécifiques dans le spectre d'un moteur sain peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés à la conception et au fonctionnement du moteur, tels que :

- Les fréquences de rotation du rotor et les harmoniques associées
- Les fréquences liées aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor
- Les fréquences propres de la structure mécanique du moteur

Les résultats de cette analyse spectrale d'un moteur sain par la méthode ROOT-MUSIC peuvent servir de référence pour la détection et le diagnostic de défauts. En comparant les spectres de moteurs potentiellement défectueux à cette référence, il serait possible d'identifier les déviations par rapport au comportement nominal et ainsi de détecter la présence de défauts.

En conclusion, bien que ces graphes représentent les résultats de l'analyse spectrale d'un moteur synchrone sain, ils fournissent des informations précieuses sur les fréquences caractéristiques de ce type de moteur. Ces informations peuvent servir de base de comparaison pour la détection et le diagnostic de défauts.

IV.8 Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité :

Les graphes présentent les résultats de l'analyse spectrale du défaut d'excentricité d'un moteur synchrone, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC. Chaque graphe correspond à un pourcentage différent du défaut et une durée d'essai spécifique.
L'amplitude des pics varie en fonction du pourcentage du défaut d'excentricité simulé.
Les graphes avec des pourcentages plus élevés (DE 30% 20s) présentent des pics plus prononcés que ceux avec des pourcentages plus faibles (DE 10% 10s), suggérant une relation directe entre le niveau d'excentricité et l'amplitude des composantes fréquentielles détectées. Pour un même pourcentage de défaut, l'augmentation de la durée de l'essai (de 10s à 20s) semble amplifier l'amplitude des pics. Cela suggère qu'une durée d'analyse plus longue permet une meilleure détection et caractérisation du défaut d'excentricité.
Bien que les fréquences des pics semblent apparaître à des fréquences spécifiques et cohérentes entre les différents essais, on observe de légères variations d'amplitude entre les essais de même pourcentage et durée (DE 20% 10s essai 1 et 2, par exemple).

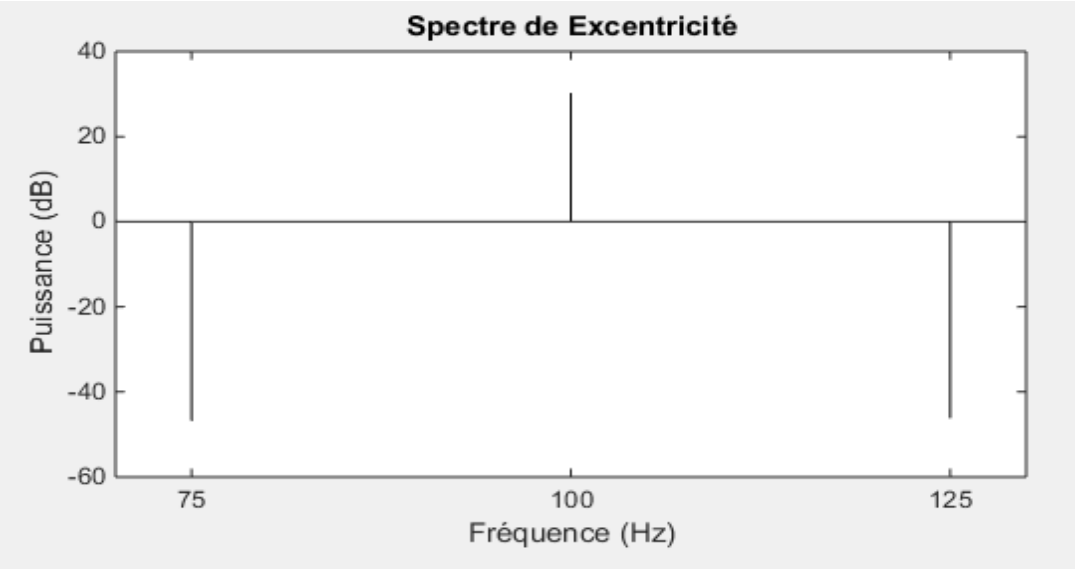


Figure IV.16 DE 30% 20s essai 1

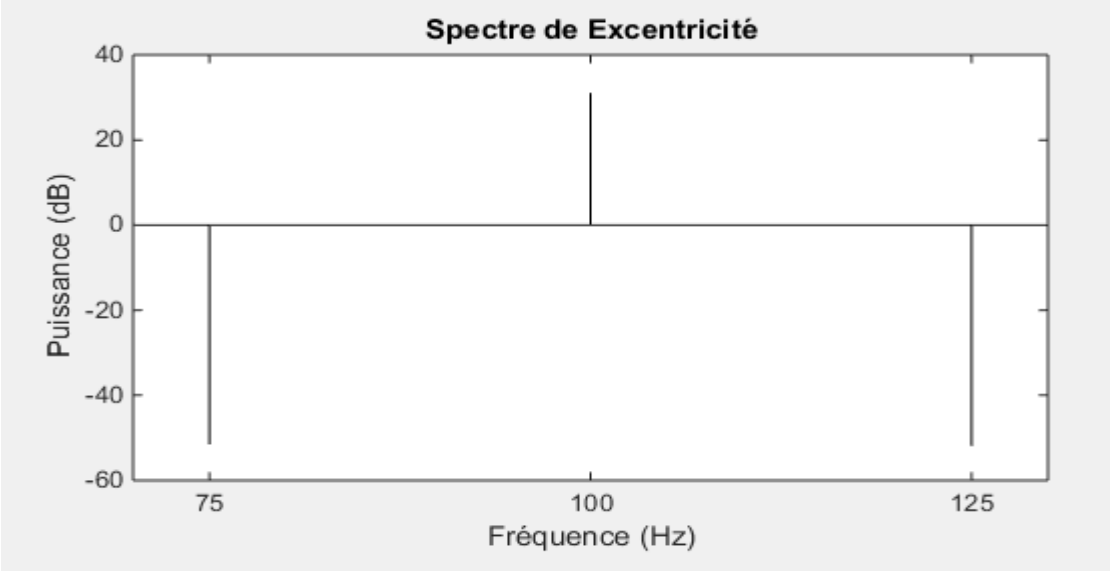


Figure IV.17 DE 10% 10s essai2

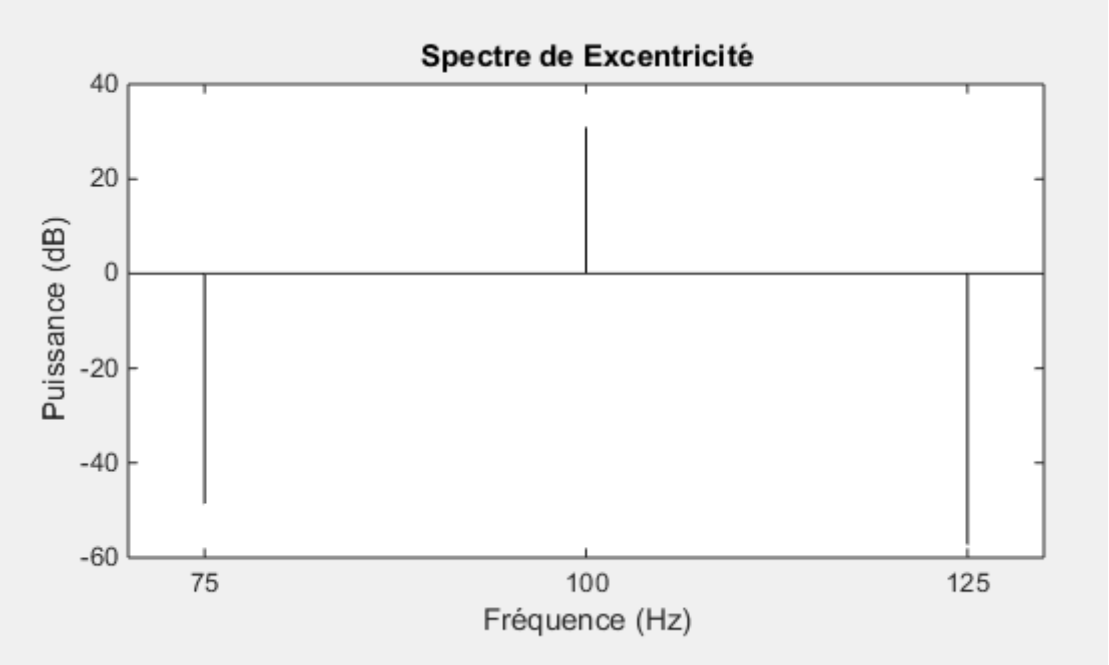


Figure IV.18 DE 10% 10s essai 1

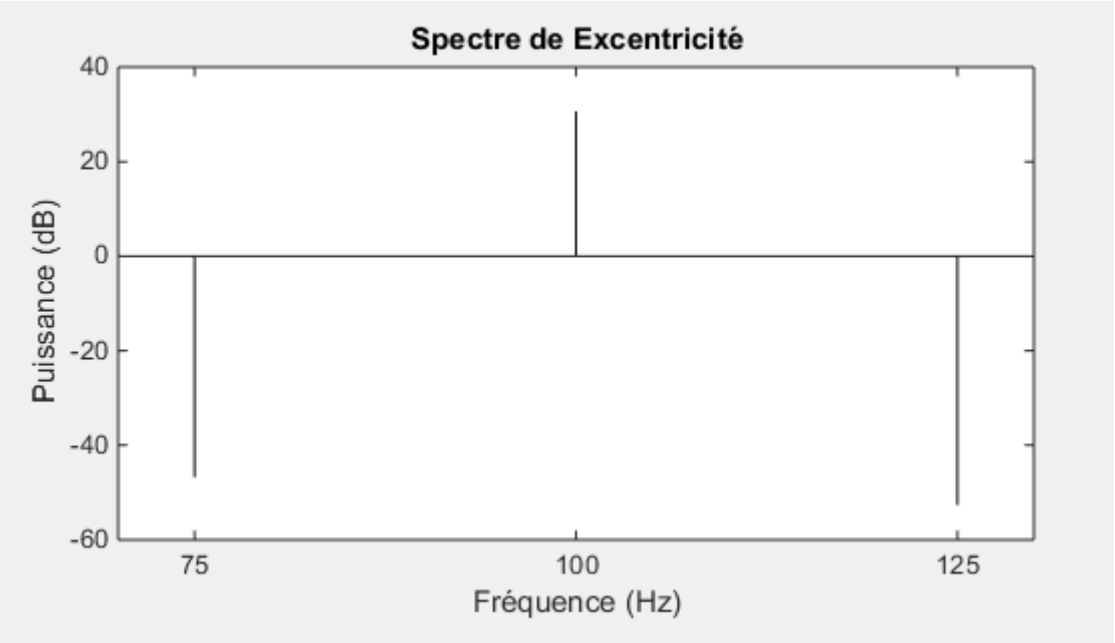


Figure IV.19 DE 20% 10s essai 1

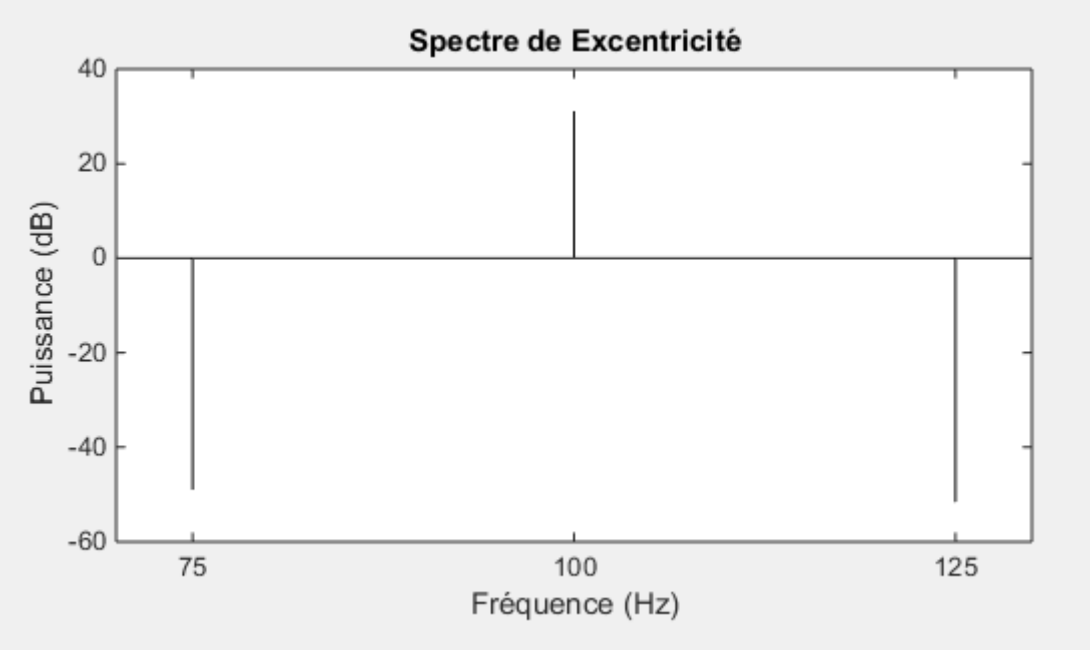


Figure IV.20 DE 10% 20s essai 1

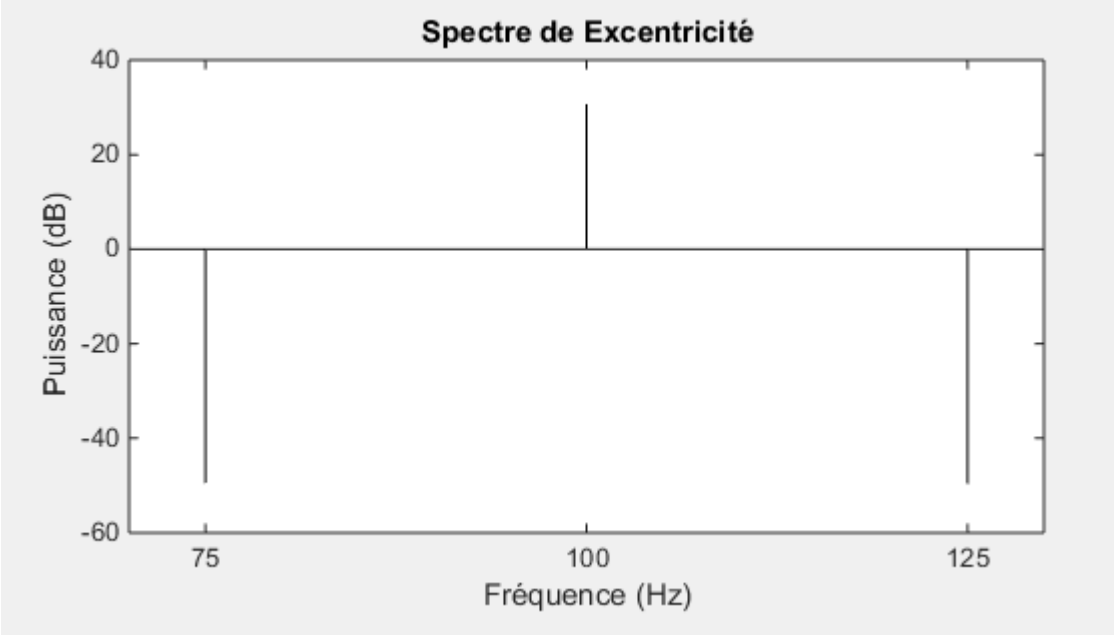


Figure IV.21 DE 20% 20s essai 1

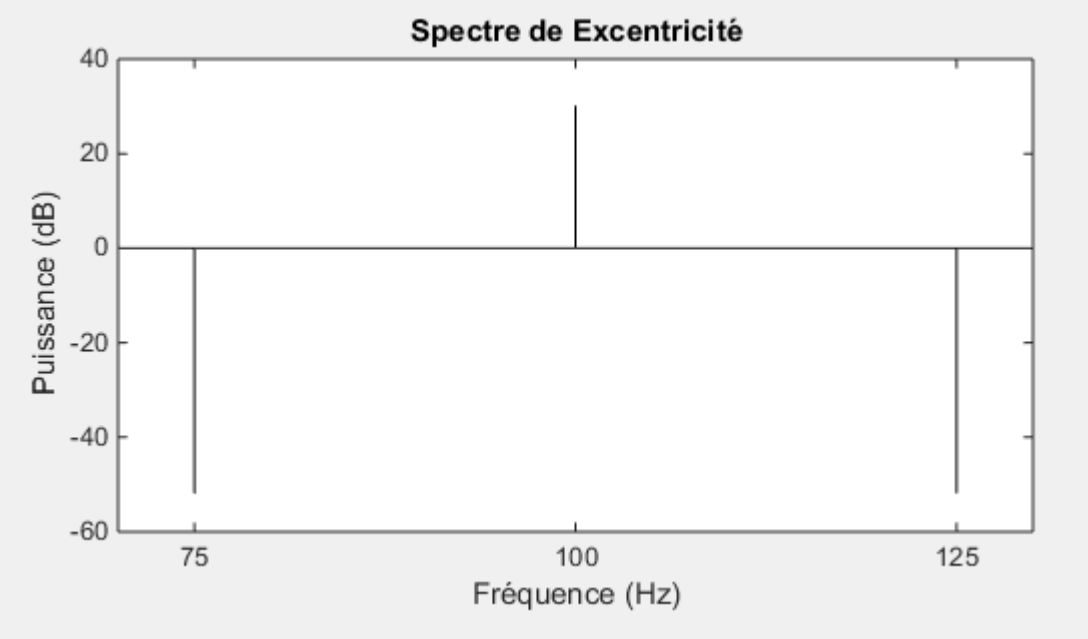


Figure IV.22 DE 30% 10s essai 1

IV.9 Fonctionnement du moteur en présence du défaut de démagnétisation :

Les graphes présentent les résultats de l'analyse spectrale du défaut de démagnétisation d'un moteur synchrone, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC. Chaque graphe correspond à un pourcentage différent du défaut et une durée d'essai spécifique. On observe plusieurs pics distincts à différentes fréquences sur chaque graphe, indiquant la présence de multiples composantes fréquentielles liées au défaut de démagnétisation. Contrairement à l'analyse du moteur sain.

L'amplitude et la position en fréquence des pics varient selon le pourcentage de démagnétisation et la durée d'essai. Pour un même pourcentage de défaut et pôles affectés, l'amplitude des pics caractéristiques est plus élevée pour les essais de 20s que pour ceux de 10s.Cela suggère qu'une durée d'analyse plus longue améliore la détection du défaut de démagnétisation, probablement en réduisant l'impact du bruit de mesure et en permettant une meilleure estimation des composantes fréquentielles.

Les fréquences auxquelles apparaissent les pics caractéristiques semblent différentes de celles observées pour le moteur sain. Cela indique que le défaut de démagnétisation modifie les fréquences de résonance du système.

L'identification précise de ces nouvelles fréquences caractéristiques pourrait permettre de développer des indicateurs spécifiques pour le suivi de l'état de santé du moteur et la détection précoce des défauts de démagnétisation.

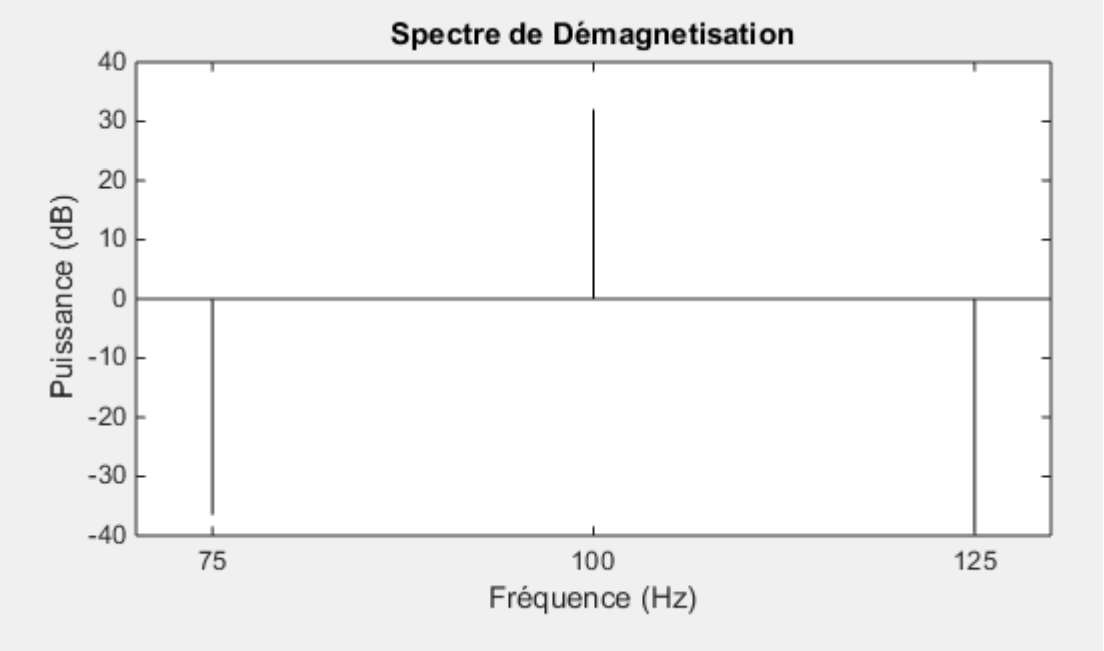


Figure IV.24 DMF2 pôles 20s essai 1

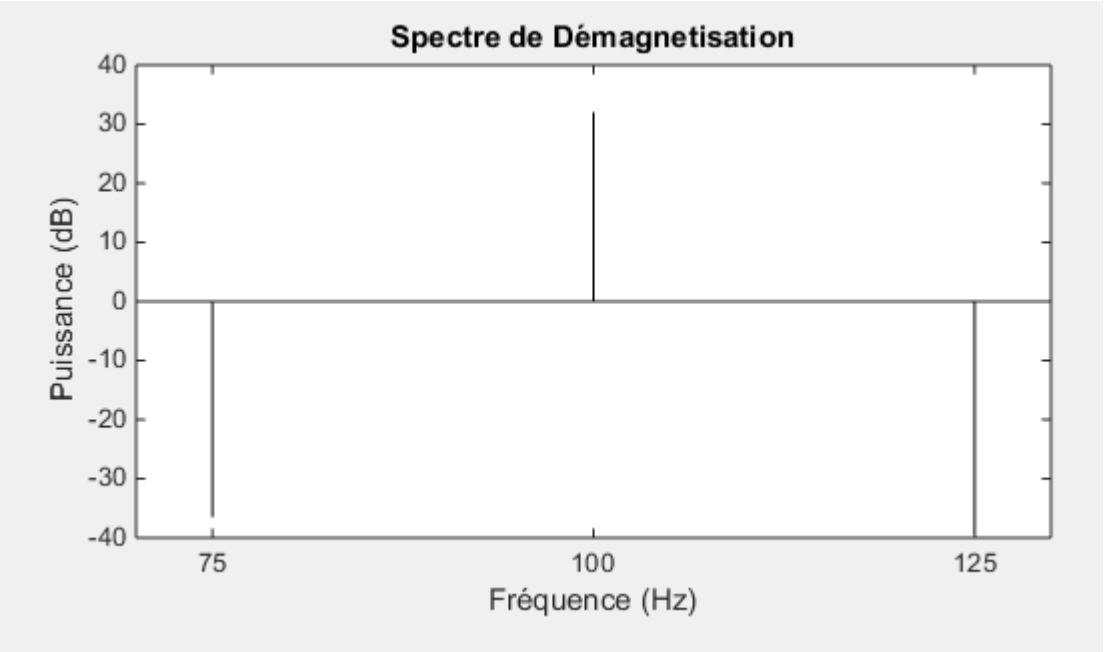


Figure IV.23 DMF 2 pôles 20s essai 2

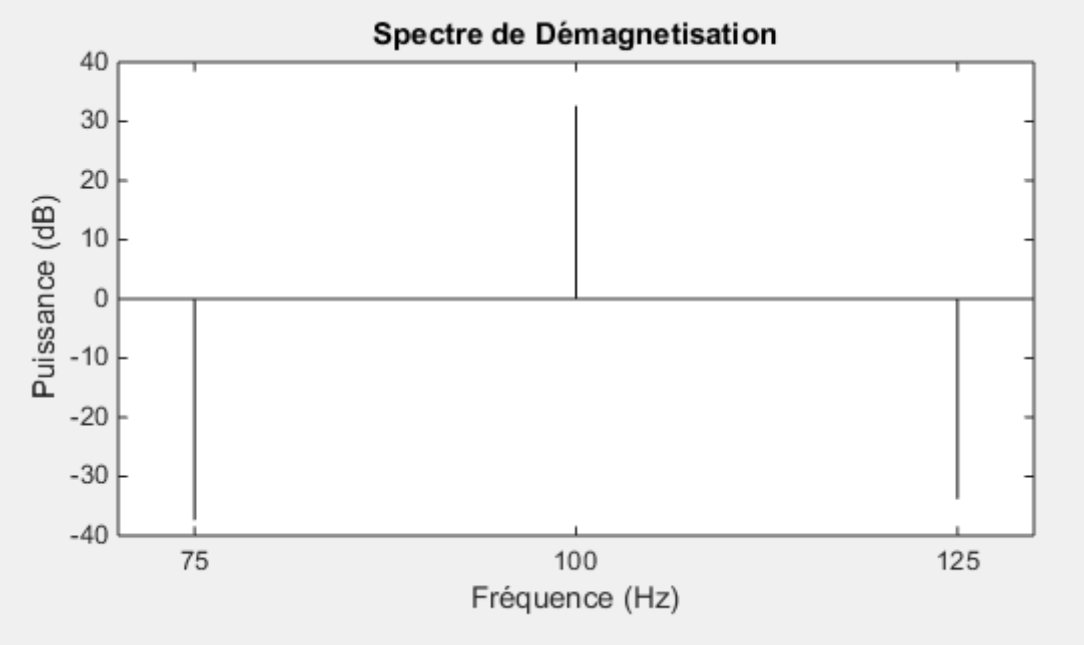


Figure IV.25 DMF 2 pôles 10s essai 2

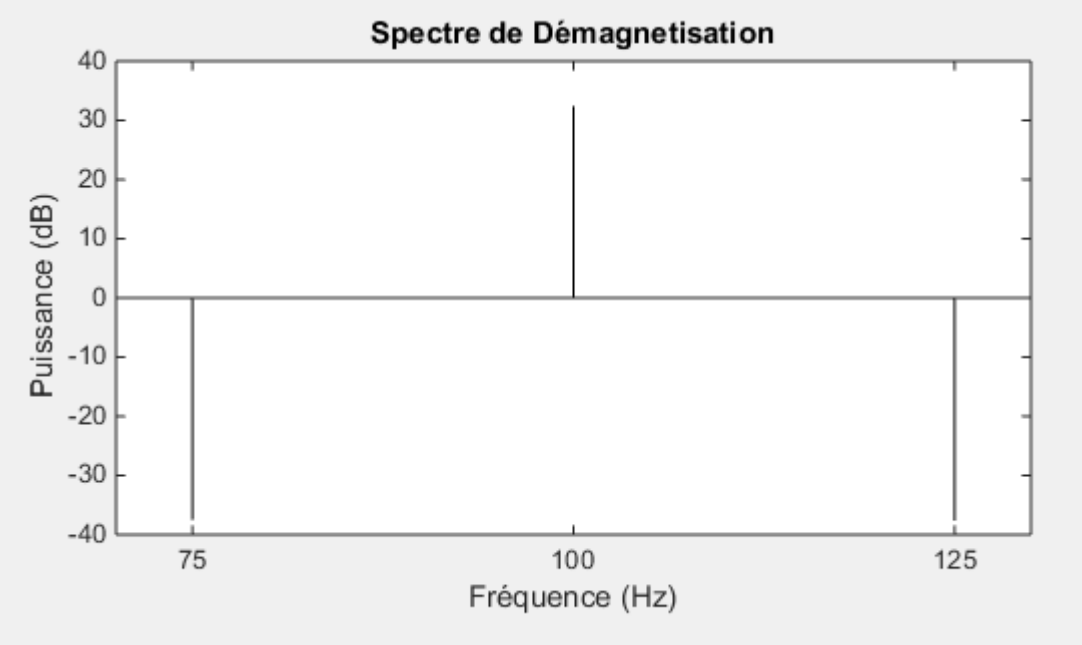


Figure IV.26 DMF 2 pôles 10s essai 1

IV.10 Rapport entre la démagnétisation et l'excentricité :

Essais	Pôles	Pourcentage	Durée (sec)	Fréquence (Hz)	Puissance DMF	Puissance DE	Rapport des Puissances en %
1	2		10s	75	-37.51	-48.63	77,1%
1		10%	10s	125	-37.62	-57.26	65,7%
2	2		10s	75	-37.39	-51.51	72,5%
2		10%	10s	125	-33.83	-51.90	65,1%
1	2		10s	75	-37.51	-46.74	80,2%
1		20%	10s	125	-37.62	-52.64	71,4%
1	2		20s	75	-36.50	-49.98	73%
1		20%	20s	125	-39.44	-49.58	79,5%
1	2		20s	75	-36.50	-48.98	74,5%
1		10%	20s	125	-39.44	-51.58	76,4%
2	2		20s	75	-37.81	-48.98	77,1%
2		10%	20s	125	-37.59	-51.58	72,8%
1	2		20s	75	-36.50	-46.83	77,9%
1		30%	20s	125	-39.44	-46.15	85,4%
1	2		10s	75	-37.51	-51.90	72,2%
1		30%	10s	125	-37.62	-51.85	72,5%

Tableau IV-2 Rapport entre les défauts.

Les défauts de démagnétisation et d'excentricité peuvent être distingués par leurs signatures spectrales à des fréquences spécifiques. La démagnétisation présente des puissances plus

élevées et constantes, tandis que l'excentricité montre des variations plus grandes, surtout à des fréquences plus élevées et des pourcentages plus importants. Les rapports calculés montrent clairement que la puissance de l'excentricité est inférieure à celle de la démagnétisation

IV.11 Observations et remarques :

- Les valeurs de puissance en dB sont systématiquement plus élevées à 125 Hz qu'à 75 Hz pour les mêmes conditions d'essai, suggérant que les défauts sont plus prononcés à des fréquences plus élevées.
- La puissance en dB est toujours négative, ce qui est typique lors de l'analyse de défauts, car les composantes de défaut ont généralement des amplitudes sont inférieures 1.

IV.12 Différences entre les deux défauts :

- Pour le même pourcentage et la même fréquence, les valeurs de puissance DMF sont généralement plus élevées que les valeurs de puissance DE, indiquant que le défaut de démagnétisation est plus prononcé que l'excentricité.
- L'écart entre les valeurs de puissance DMF et DE est plus important à 125 Hz qu'à 75 Hz, suggérant que la différence de sévérité entre les deux défauts est plus évidente à des fréquences plus élevées.

IV.13 Résultats d'application de la méthode SVM :

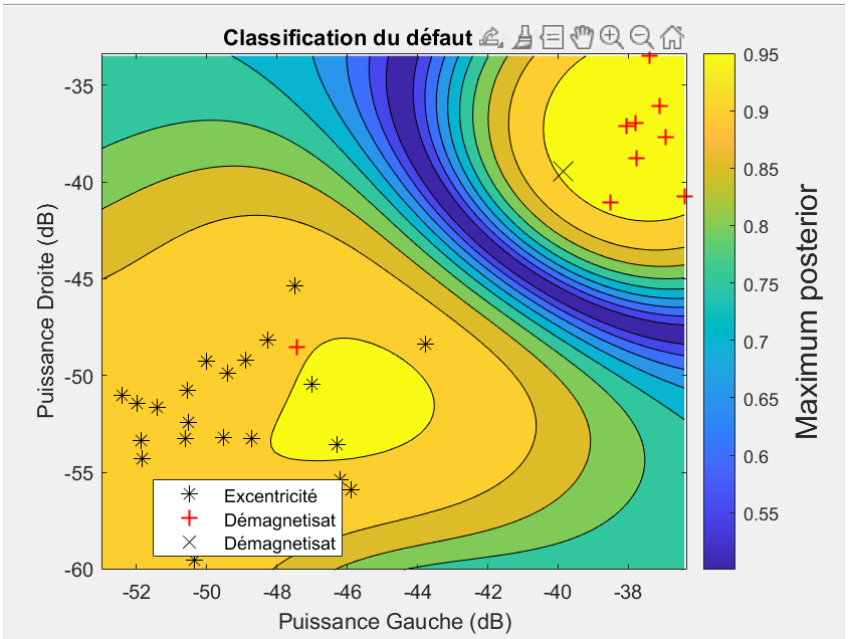


Figure IV.27 DMF_1_pole_60S_3kHz_Essai_03

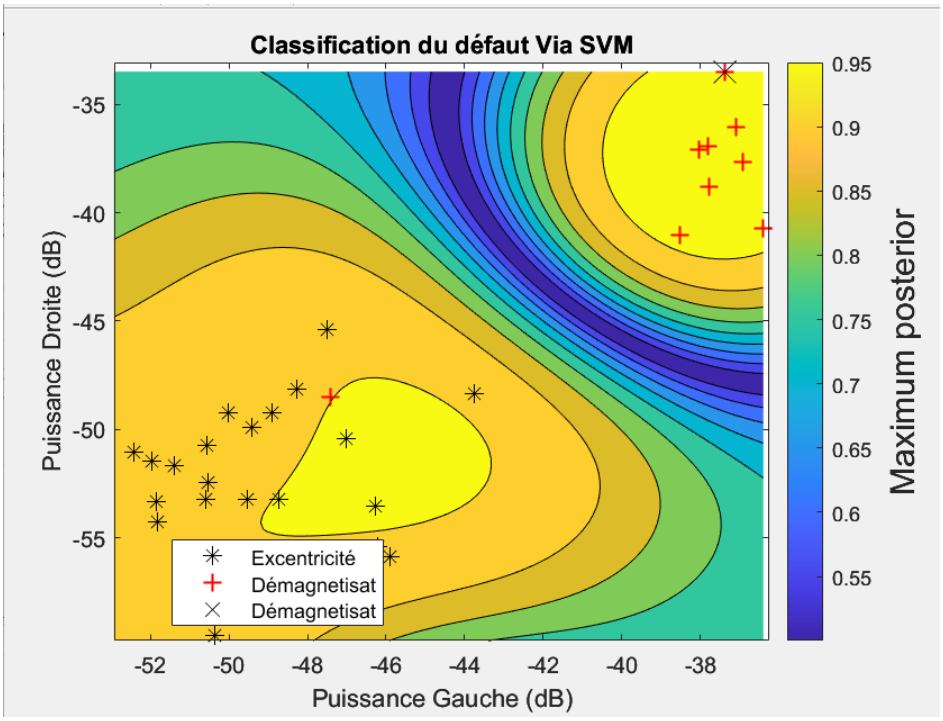


Figure IV.29 DMF_2_pole_10S_3kHz_Essai_05

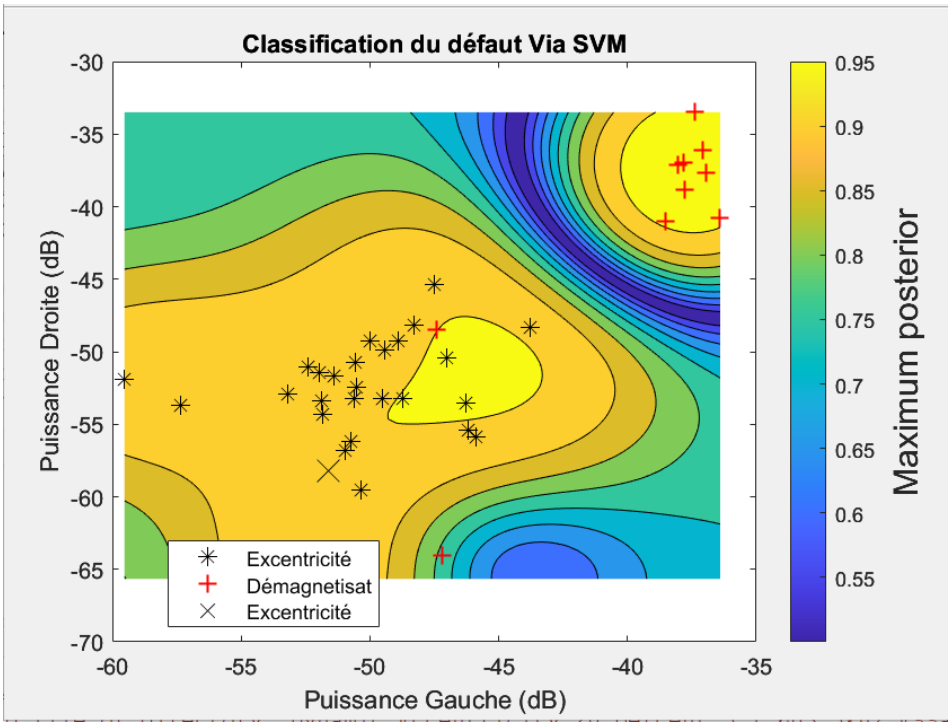


Figure IV.28 Dynamic_Eccentricity_20_percent_3_1_60S_3kHz_Essai_03

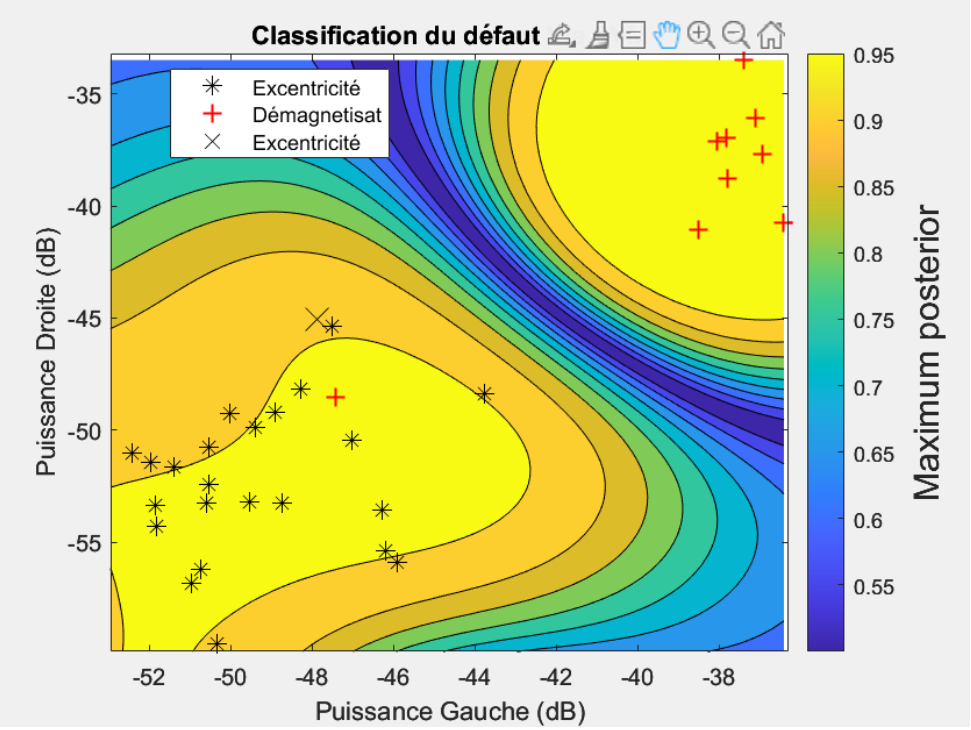


Figure IV.30 Dynamic_Eccentricity_30_percent_2_2_10S_3kHz_Essai_05

Les résultats de la classification SVM : une comparaison entre les défauts de démagnétisation et d'excentricité

Les graphiques que vous voyez ci-dessus montrent les résultats obtenus grâce à la méthode SVM (Support Vector Machine) pour classer deux défauts majeurs qui touchent les moteurs à aimants permanents : la démagnétisation (figure27 et 28) et l'excentricité (figure 29 et 30). Chaque graphique illustre comment les données expérimentales se répartissent selon deux variables discriminantes : la puissance gauche et la puissance droite (en dB), dérivées de l'analyse spectrale des signaux statoriques. L'arrière-plan coloré indique les niveaux de probabilité maximale, ce qui reflète la confiance du modèle dans ses décisions.

En examinant les graphiques ensemble, on peut voir que le SVM réussit à distinguer clairement les deux types de défauts. En effet :

Les données liées à l'excentricité (représentées par des étoiles noires) se regroupent systématiquement dans la partie inférieure gauche du graphique, dans une zone jaune/orange, ce qui indique une forte probabilité de classification correcte. Cette constance prouve que le

modèle identifie avec précision ce type de défaut, même s'il y a une certaine dispersion des points.

D'un autre côté, les cas de démagnétisation (indiqués par des croix rouges) se trouvent clairement éloignés, surtout dans la partie supérieure droite du graphique. Cette séparation spatiale entre les classes est bien captée par le modèle SVM, qui associe ces points à une zone de probabilité élevée (> 0.9), montrant ainsi une capacité de détection efficace et fiable.

La frontière de décision entre les deux défauts est clairement visible dans les deux graphiques, marquée par des transitions de couleur rapide (du bleu/vert au jaune), illustrant un fort contraste dans les caractéristiques spectrales entre ces deux types de défauts.

Ces résultats soulignent la solidité du classificateur SVM, qui parvient non seulement à détecter chaque défaut individuellement, mais aussi à éviter les confusions entre démagnétisation et excentricité. C'est crucial pour une utilisation en maintenance prédictive. La précision de cette méthode dans la détection, la séparation et la classification fiable des défauts prouve qu'elle est pertinente pour une application dans un environnement industriel réel.

IV.14 Conclusion :

Ce chapitre a mis en œuvre une approche combinée basée sur la méthode Root-MUSIC pour l'extraction des caractéristiques spectrales, suivie de la classification par SVM. Les résultats ont montré une séparation claire entre les défauts d'excentricité et de démagnétisation, avec une précision élevée. Cette méthode s'est révélée fiable et efficace, confirmant son potentiel pour le diagnostic automatique dans les systèmes industrie

Programmes

Analyse.m:

```
function [powe,powd]=analyse(saint,DMF,EF)
load(char(saint))
i1=ia;
Ts1=temps;
data1=timeseries(i1,Ts1);
load(char(DMF))
i2=ia;
Ts2=temps;
data2=timeseries(i2,Ts2);
[~,new_data2] = synchronize(data1,data2,'intersection','InterpMethod','zoh');
load(char(EF))
i3=ia;
Ts3=temps;
data3=timeseries(i3,Ts3);
[~,new_data3] = synchronize(data1,data3,'intersection','InterpMethod','zoh');
subplot(212)
[Fs, Ps]=RM_data(data1.data,60,'Moteur saint',Fe);
bar(Fs,Ps,10^-4)
xlabel('Fréquence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=append('Spectre de Moteur Saint');
title(char(titre))
pows=displayPowerAtFrequencies(Fs,Ps,[75 125],'Moteur Saint');
subplot(221)
[Fd Pd]=RM_data(new_data2.data,60,'Démagnetization',Fe);
bar(Fd,Pd,10^-4)
xlabel('Fréquence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=append('Spectre de Démagnetisation');
title(char(titre))
powd=displayPowerAtFrequencies(Fd,Pd,[75 125],'Démagnetisation');
subplot(222)
[Fe Pe]=RM_data(new_data3.data,90,'Excentricité',Fe);
bar(Fe,Pe,10^-4)
xlabel('Fréquence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=append('Spectre de Excentricité');
title(char(titre))
powe=displayPowerAtFrequencies(Fe,Pe,[75 125],'Excentricité');
end
```

displayPowerAtFrequencies1.m

```
function pow=displayPowerAtFrequencies1(frequencies,powers,targetFrequencies)
%fprintf('%s: \n',defaut);
for targetFreq=targetFrequencies
[~,idx]=min(abs(frequencies-targetFrequencies));
%fprintf('Fréquence: %.2f Hz Puissance: %.2f dB\n ',frequencies(idx),powers(idx));
pow=powers(idx);
end
end
```

Rm_data.m

```
function [f p]=RM_data(data,P,type_defaut,Fe)
L=2*P;
X=corrmtx(data,4*L,'autocorrelation');
% Calcul de la matrice d'autocorrelation
%[P,F]=peig(X,L,N,1/Te);
[F,P]= rootmusic(X,L,Fe);
%Estimation des fréquences et puissances
%correspondantes
Fef=F(F>=0);
Pdb=db(P);
p=Pdb;
f=Fef;
bar(f,p,10^-4)
xlabel('Fréquence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=append('Spectre de',char(type_defaut));
title(char(titre))
end
```

RM_d.m

```
function [f p]=RM_d(data,P,Fe)
L=2*P;
X=corrmtx(data,4*L,'autocorrelation');
% Calcul de la matrice d'autocorrelation
%[P,F]=peig(X,L,N,1/Te);
[F,P]= rootmusic(X,L,Fe);
%Estimation des fréquences et puissances
%correspondantes
Fef=F(F>=0);
```

```
Pdb=db(P);
p=Pdb;
f=Fef;
end
```

class_def.m

```
function class_def(saint,file_def,NP);
load(char(saint));
i1=ia;
Ts1=temps;
data1=timeseries(i1,Ts1);
load(char(file_def));
i2=ia;
Ts2=temps;
data2=timeseries(i2,Ts2);
[~,new_data2] = synchronize(data1,data2,'intersection','InterpMethod','zoh');
[F, P]=RM_d(data2.data,NP,Fe);
pow=displayPowerAtFrequencies1(F,P,[75 125]);
classDefautn('baseData.mat',pow');
```

classDefautn.m

```
function classDefautn(TrainD,TestD)
load(char(TrainD),'cc','prop')

X = cc(1:length(cc),1:2);
Y=prop;
t = templateSVM('Standardize',true,'KernelFunction','gaussian');
Mdl = fitcecoc(X,Y,'Learners',t,'FitPosterior',true,...
   'ClassNames',{'Excentricité','Démagnetisat'});

if ischar(TestD)
    load(char(TestD),'test')
    newpoint=test(:,1:2);
    %classing the fault
    [classe,~,PBScore] = predict(Mdl,newpoint,'BinaryLoss','linear');
    table([Y(1:26,1:length('Excentricité')); ...
    Y(27:50,1:length('Démagnetisat')); ...
 Y],classe(1:length(classe),:), ...
     PBScore(1:length(classe),:),'VariableNames', ...
     {'TrueLabel','PredictedLabel','PBScore'});
     h=plot(PBScore);
```

```
    h(1).DisplayName=char(Mdl.ClassNames(1));
    h(2).DisplayName=char(Mdl.ClassNames(2));
    %h(3).DisplayName=char(Mdl.ClassNames(3));
    legend(h,'Location','Best')
    title('Score de Classification du Défaut')
    xlabel('Test Number')
    ylabel('Positive Score')
    axis tight
    N=length(classe);
    A=string([Y(1:26,:);Y(27:50,:)]);
    B=string(classe(1:N,:));
    c=(B~=A);
    n=0;
    for i=1:length(c)
    if(c(i)==1) n=n+1;
    end
    end

    err=n/N;
elseif isnumeric(TestD)
      newpoint=TestD(1,1:2);
      classe=predict(Mdl,newpoint);
      xMax = max(X);
      xMin = min(X);

      x1Pts = linspace(xMin(1),xMax(1));
      x2Pts = linspace(xMin(2),xMax(2));
      [x1Grid,x2Grid] = meshgrid(x1Pts,x2Pts);

      [~,~,~,PosteriorRegion] = predict(Mdl,[x1Grid(:),x2Grid(:)]);

      contourf(x1Grid,x2Grid,...
      reshape(max(PosteriorRegion,[],2),size(x1Grid,1),size(x1Grid,2)));
      h = colorbar;
      h.YLabel.String = 'Maximum posterior';
      h.YLabel.FontSize = 15;

      hold on
      gh = gscatter(X(:,1),X(:,2),Y,'krk','*+o',8);
      gh(2).LineWidth = 1;
     % gh(3).LineWidth = 1;
      h=plot(newpoint(1,1),newpoint(1,2),'kx','MarkerSize',14);
      h.DisplayName=char(classe);
      title('Classification du défaut Via SVM')
```

```
        xlabel('Puissance Gauche (dB)')
        ylabel('Puissance Droite (dB)')
        axis auto
        legend([gh;h],'Location','Best')
end
hold off
```

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la détection et la séparation de deux défauts majeurs affectant les moteurs synchrones : la démagnétisation et l'excentricité. Après une analyse approfondie du fonctionnement des moteurs synchrones et des mécanismes physiques liés à ces défauts, nous avons étudié les méthodes d'analyse spectrale haute résolution, notamment ROOT-MUSIC, pour identifier les signatures fréquentielles caractéristiques de chaque anomalie.

Les résultats obtenus à travers cette méthode ont montré une **précision remarquable** dans la localisation des composantes spectrales associées à chaque défaut, surclassant les performances de la FFT dans des situations où la résolution fréquentielle est déterminante. Toutefois, afin de surmonter les limites liées à la séparation des défauts lorsque leurs effets se superposent, l'intégration d'une méthode d'intelligence artificielle s'est imposée.

L'introduction des **machines à vecteurs de support (SVM)** dans ce contexte a permis d'aller plus loin dans le diagnostic, en offrant une **capacité fiable de classification automatique** entre les défauts étudiés. Les expérimentations menées ont confirmé que la combinaison de ROOT-MUSIC pour l'extraction de caractéristiques, et de SVM pour la classification, permettait une **séparation nette et robuste** des défauts, avec un taux de précision élevé.

Ainsi, il ressort de ce mémoire que l'alliance entre les techniques d'analyse fréquentielle avancée et les approches d'apprentissage supervisé constitue une **solution efficace, reproductible et prometteuse** pour le diagnostic intelligent des moteurs électriques. Les résultats obtenus démontrent que ces méthodes sont non seulement **adaptées au contexte académique**, mais aussi **potentiellement exploitable dans le milieu industriel**, dans une optique de maintenance prédictive et d'amélioration de la fiabilité des systèmes.

À l'avenir, cette approche pourra être étendue à d'autres types de défauts ou à d'autres machines tournantes, et intégrée dans des systèmes embarqués pour un diagnostic en temps réel, consolidant ainsi la transition vers l'industrie 4.0.

Liste des références

[1] AL.Aouicha, A.Mazouz et A.Cherifi « Modélisation électromagnétique par éléments finis 2D des machines à aimants permanents », mémoire de fin d'études, UMMTO,2011.

[2] Mr Bertran NOGAREDE, « Machines tournantes principes et constitution » Technique de l'ingénieur D3411.

[3] Annane Adel ,«Analyse du comportement du moteur Synchrone dans les entraînements électrique sà vitesse variable »,mémoire de Magister en électrotechnique ,Université Badji Mokhtar Annaba,Facultédessciencesdel'ingénieur,Départementd'électromécanique.2010

[4]J.A.Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, UTBM,2008.

[5] T.Wildil et G.Sybille, « Electrotechnique »,4eme édition de Boeck, 2005.

[6] P.Salminenen, « fractional-slot permanent magnet synchronous motors for low speed application », Thése de doctorat, leppeenranta university of téchnology, Finlande, 2005.

[7] R.Lateb, « Modélisation des machines asynchrones et synchrones a aimants avec prise en compte des harmoniques d'espace et de temps : application à la propulsion marine par POD», Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, France, 2006.

[8] M.Khov, « Surveillance et diagnostic des machines synchrones à aimants permanents : Détection des courts-circuits par suivi paramétrique », Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.

[9] Mr Jean Yves VOYANT, « Calcul des performances d'une machine synchrones à pole saillants », thèse de doctorat, Institut National polytechnique de Grenoble, 1997

[10] M. Kadjoudj "Contribution à la Commande d'une MSAP ", Thèse De Doctorat D'état Université De Batna, 2003.

[11] Yasser.ALHASSOUN "Etude et mise en œuvre de machines à aimantation induite à haute vitesse" PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.

[12]Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat présentée par Mr. GHERABI Zakaria, « Technique de la séparation appliquées au diagnostic des défauts dans le moteur synchrone à aimant permanent » 2019/2020

[13] M.BRICE AUBERT, « Détection des courts-circuits inter-spires dans les générateurs synchrones a aimants permanents : méthodes basées modelés et filtre de KALMAN ETANDU », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2014.

[14] Mr Audrian CEBAN, « Méthode Globale de diagnostic des machines électriques », thèse doctorat, Université Lille, 2012.

[15] B. Vaseghi, "Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entrespires," Thèse de doctorat, GREEN - Groupe de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nancy, Nancy Université - Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

[16] ZOUZOU Sara, « Détection des défauts statoriques dans les machines synchrones a aimants permanents par les techniques avancées » , Mémoire de Magistère, option Machines électriques, université de Mouhemed Khider- Biskra,2015.

[17] F.Leprince-Ringuet, « aimant permanent, matériaux et applications », Technique de l'ingénieur, traité de génie électrique Doc D2100.

[18] G. M. Riche de Prony, "Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de 59 l'alcool à différentes températures," Journal de l'école polytechnique, vol. 1, no. 22, pp. 24-76, 1795.

[19] V. F. Pisarenko, "The retrieval of harmonics from a covariance function," Geophysical J. Royal Astron. Soc., vol. 33, pp. 347-366, 1973.

[20] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.

[21] A. J. Barabell, "Improving the resolution performance of eigenstructure-based directioninding algorithms," in Proc. of ICASSP'83, Boston, MA, USA, 1983, pp. 336-339, IEEE. .

[22] S.BEL. Diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. Thèse de Magister .Université Mohamed Boudiaf de Msila Algérie 2006.

[23] B.E. Boser, I.M. Guyon, and V.N. Vapnik. A training algorithm for optimal margin classifiers. In Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory, pages 144–152. ACM, 1992.

[24] I. Guyon, B. Boser, and V. Vapnik. Automatic capacity tuning of very large vc-dimension classifiers. In Advances in neural information processing systems. Citeseer, 1993.

[25] A.Borji, et M. Ha.midi. Support Vector Machines for Persian Font recognition. In: International Conference on Computer, Electrical, Systems Science, and Engineering (CESSE 2007).

[26] S. B. Kotsiantis, "Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques Informatica 31 (2001} 2001.

[27] Ali. Mcheih. Mémoire doctorat. Modélisation statistique du Speckle en OCT : application à la segmentation d'images de la peau. INP TOULOUSE. 2010.

[28] H. Majdoulayne. Thèse doctorat. Extraction de caractéristiques de texture pour la classification d'images satellites. Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2009.

[29] G.J. Balm, mémoire doctorat, An introduction to optical character reader considerations. Université Helsinki de Technologie. 1997.

[30] M.HASAN & F.BORIS. SVM : Machines à Vecteurs de Support ou Séparateurs à Vastes Marges. Versailles St Quentin, France, 16 janvier 2006.

[31] N.E. Ayat, mémoire doctorat, Sélection de modèles automatiques des machines à vecteur de support : application à la reconnaissance d'image de chiffres manuscrits ; Ecole de technologie supérieur, Université du Québec. 2004.