

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

*Université de Jijel*



*Faculté des sciences et de la technologie  
Département de génie électrique*

*Mémoire de fin d'études*

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

*En électrotechnique*

*Option : Machines électriques*

Thème

---

---

*Détection des défauts d'excentricité dans une machine synchrone à aimants permanents*

---

---

*Présenté par :*

*Bouabdellah Ahmed*

*Proposé et dirigé par :*

*Mr. Ali .Rezig*

*Année universitaire : 2017/2018*

---

---



## *Remerciement*

*Je remercie dieu de nous avoir donné la force  
Pour accomplir ce travail.*

*Je remercie mon encadreur  
Mr. Ali .Rezig pour son aide, son encouragement  
Et sa patience.*

*Et je n'oublie pas tous les enseignants du  
Département de génie électrique.*



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail,*

*A mes très chers parents qui ont sacrifié leur vie pour  
ma réussite, et pour leurs encouragements. Que dieu*

*les garde éternellement heureux.*

*A toute ma famille,*

*A tout mes amis et mes collègues, et à tous ceux qui  
m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.*

*Bouabdellah Ahmed*

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| <i>Introduction générale</i> .....  | 1                                  |
| <br><b>Chapitre I : Défauts mécaniques dans les machines synchrones à aimants</b> |                                    |
| Introduction .....  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.1 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....             | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.2 Rotors de la machine synchrones à aimants permanents .....                    | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.2.1 Aimants en surface.....   | 4                                  |
| I.2.2 Aimants insérés .....   | 4                                  |
| I.2.3 Aimants enterrés .....  | 4                                  |
| I.2.4 Aimants à concentration de flux .....                                       | 4                                  |
| I.3 Défauts dans les machines électriques .....                                   | 5                                  |
| I.3.1 Désalignement d'arbres .....  | 6                                  |
| I.3.1.1 Détection d'un défaut d'alignement .....                                  | 7                                  |
| I.3.1.2 Les types de désalignement dans les moteurs.....                          | 8                                  |
| I.3.1.3 Conséquences du désalignement.....  | 8                                  |
| I.3.4 Défauts des roulements .....  | 9                                  |
| I.3.4.1 Causes principale des défauts .....                                       | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.3.5 Défaut d'excentricité.....  | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.3.5.1 Causes de l'excentricité statique .....                                   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.3.5.2 Causes de l'excentricité dynamique.....                                   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.3.5.4 Indicateurs d'excentricité.....   | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| I.4 Etude statistique sur les défauts dans les machines électriques .             | <b>Erreur ! Signet non défini.</b> |
| Conclusion .....  | 16                                 |

## ***Chapitre II : Modèle électromagnétique de la MSAP en tenant compte de l'excentricité du rotor***

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 17 |
| II.1 Effet d'un défaut d'excentricité sur la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer..... | 17 |
| II.2 Modèle Electromagnétique de la Machine Synchrone à Aimants Permanents.....                          | 21 |
| II.3 Induction magnétique produite par le rotor à aimants dans l'entrefer de la MSAP.....                | 22 |
| II.4 Induction magnétique produite par les enroulements statoriques .....                                | 26 |
| II.5 Expression de la perméance de l'entrefer .....  | 28 |
| II.6 FEM induit dans une phase du stator.....  | 30 |
| Conclusion.....  | 30 |

## ***Chapitre III : Modèle électromagnétique de la MSAP en tenant compte de l'excentricité du rotor***

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 31 |
| III.1 Machine utilisée dans les simulations .....   | 31 |
| III.2 Résultats de simulation .....   | 33 |
| III.2.1 Induction magnétique créée par le rotor à aimants dans l'entrefer de la machine dans l'état sain.....                       | 33 |
| III.2.2 Induction magnétique créée par le rotor à aimants dans l'entrefer de la machine en présence d'un défaut d'excentricité..... | 36 |
| III.3 FEM induite dans les phases du stator.....  | 40 |

|  |    |
|--|----|
| III.3.1 Dans l'état sain du rotor (0% excentricité).....                 | 40 |
| III.3.2 Dans l'état deffectueux du rotor (excentricité de 0% à 30%)..... | 41 |
| Conclusion.....  | 43 |
| Conclusion général .....   | 44 |

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'utilisation des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) dans le domaine de transport et particulièrement dans les roues des véhicules électriques a connu un développement important dans les dernières années. Cela est dû aux avantages multiples des MSAP comme la puissance massique élevée, absence de contacts glissants, un bon rendement, possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage [1]. Dans un autre côté, le progrès réalisé dans le domaine de l'électronique de puissance et la commande des machines électriques a permis aux MSAP de devenir un véritable concurrent dans le domaine de l'entraînement à vitesse variable.

Malheureusement les défauts qui apparaissent dans ces machines influent sur leurs utilisations. Parmi ces défauts on trouve le défaut d'excentricité qui provoque des vibrations et bruit important au bord des véhicules électriques.

Les défauts d'excentricités est provoqué soit par un mauvais montage du rotor (décalage entre l'axe du stator et l'axe du rotor) soit par une asymétrie au niveau de la construction mécanique du rotor.

Dans ce travail on s'intéresse à la modélisation analytique de la MSAP pour la détection et le diagnostic d'un défaut d'excentricité.

La détection et le diagnostic des défauts doivent être effectués par des grandeurs mesurables et accessibles. Dans notre cas, nous avons utilisé le taux de distorsion harmonique de la FEM pour différents niveaux d'excentricité statique. Cela permet de détecter le niveau d'excentricité et la position de l'entrefer minimal en connaissant la distribution du bobinage statorique.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Dans le premier chapitre et après une brève description de la MSAP, nous avons abordé les différents défauts qui peuvent être survenus dans une MSAP avec une attention particulière aux défauts d'origine mécanique.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du modèle analytique de la MSAP. Ce modèle permet le calcul de l'induction magnétique dans l'entrefer de la MSAP, le Flux qui traverse les bobines statoriques et la FEM induite par phase.

Le modèle développé est implémenté dans le troisième et dernier chapitre de ce mémoire. L'objectif est la détection d'un défaut d'excentricité statique par analyse de la FEM induite par phase.

Ce travail terminera par une conclusion générale et des perspectives.



## Introduction

Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont devenues de plus en plus répandues dans une large gamme d'applications grâce au progrès accru dans le domaine des matériaux magnétiques à base de terres rares, comme les Sm-Co et Nd-Fe-B. [2]. Toutefois, les exigences liées à la sûreté de fonctionnement de ce type de machines prennent une large part dans les contraintes de leur mise en disposition. Ainsi, l'intégration des modules de surveillances de diagnostic dans de telles applications est un point essentiel afin d'alerter les utilisateurs et même les concepteurs en cas d'un dysfonctionnement, dès son apparition, dans le but de garantir la sécurité et l'intégrité du système. Ce chapitre a comme objectif de présenter cette machine, son principe de fonctionnement et sa composition ensuite, nous présentons les différents types de défauts qui peuvent apparaître au cours d'exploitation de la machine avec une attention particulière sur les défauts d'origine mécanique.

### I.1 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

Comme toute machine électrique, la MSAP est composée de deux parties :

- **stator** : ou l'induit est la partie fixe de la machine, il se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de  $120^\circ$  dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe.

- **rotor** : ou inducteur est la partie mobile de la machine se compose d'aimants permanents. Ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. [3]



La figure I.1 Structure d'une machine synchrone à aimants permanents

## **I.2 Rotors de la machine synchrone à aimants permanents**

Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs configurations rotoriques. Leur classification globale en termes de placement des aimants est la suivante:

- Aimants en surface (Surface magnet type)
- Aimants insérés (Inset magnet type)
- Aimants enterrés (Interior magnet type)
- Aimants à concentration de flux (Burned magnet type)

### **I.2.1 Aimants en surface**

Pour ces types de machines, les aimants sont placés sur la surface du rotor [4]; ils sont aimantés radialement, comme montré sur la figure (I.2 a). Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est sa simplicité donc faible coût de fabrication par rapport à d'autres machines à aimant. L'inconvénient est l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants permanents de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe-q et l'axe-d sont pratiquement les mêmes. [5]

### **I.2.2 Aimants insérés**

Comme des machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer, comme montré sur la figure (I.2 b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple réactant en plus du couple des aimants.

La réactance synchrone de l'axe-q est légèrement supérieure à celle dans l'axe-d. [5]

### **I.2.3 Aimants enterrés**

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor Figure (I.2c) et aimantés radialement. Du fait que la surface du pôle 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. [5]

#### I.2. 4 Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantes dans le sens de la circonférence figure (I.2d). Les pôles magnétiques se ferment alors au niveau des parties ferromagnétiques du rotor par concentration de 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 protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe-q est plus grande que celle de l'axe-d. [5]

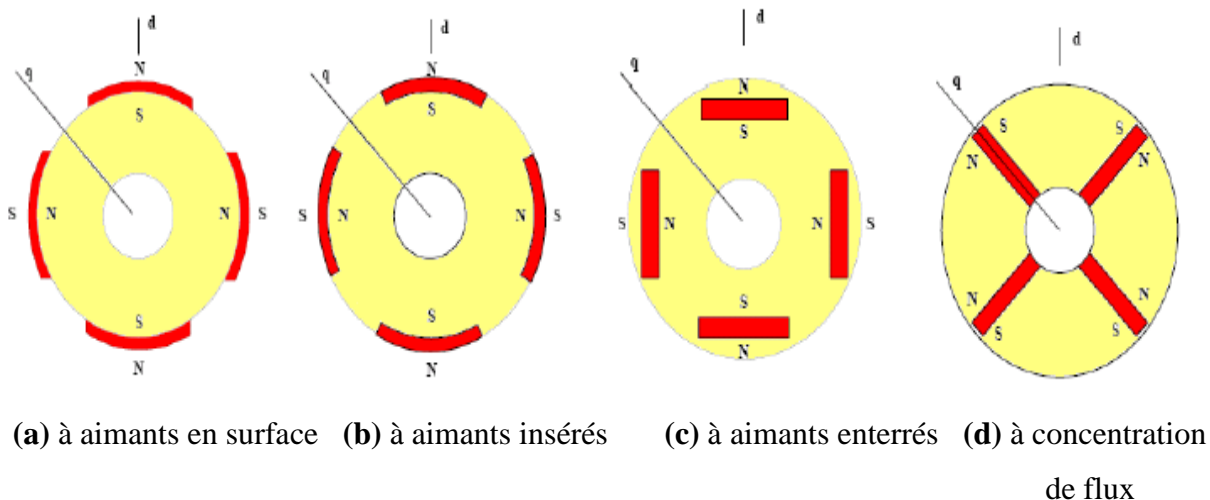


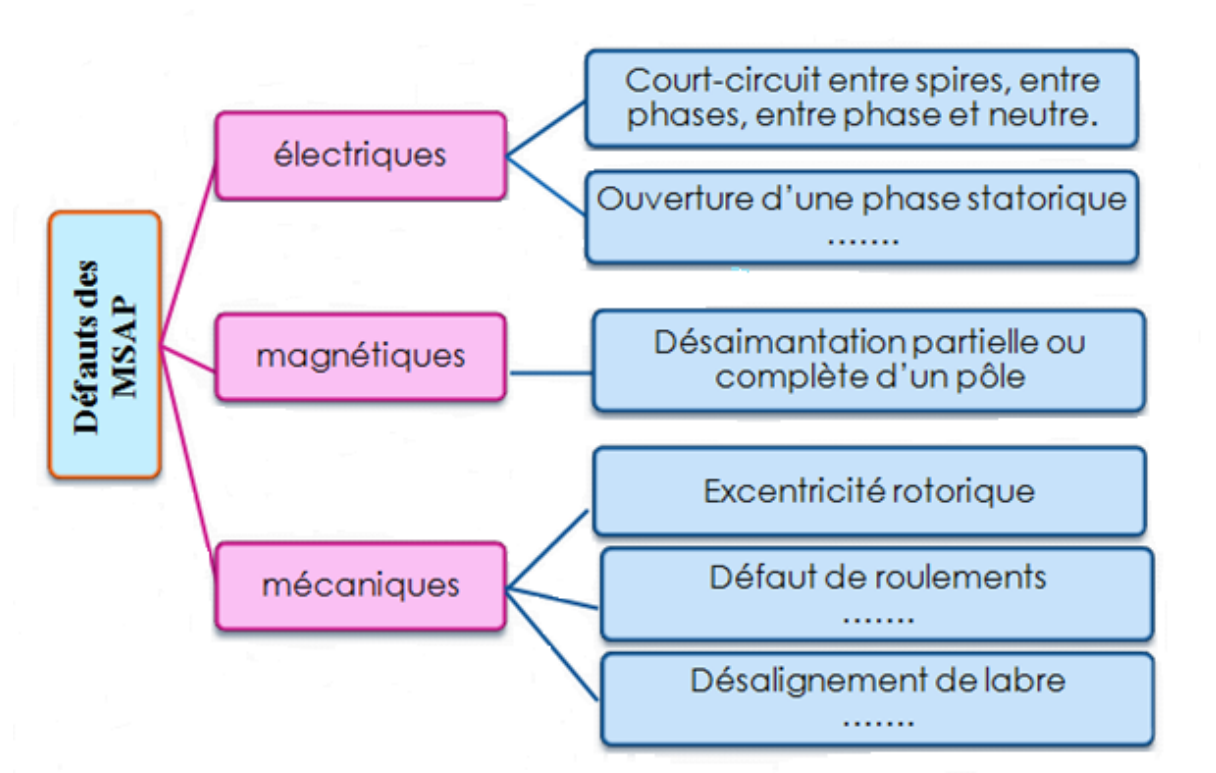
Figure I.2 Différents structures des rotors des MSAP

#### I.3 Défauts dans les machines électriques

Les défauts dans les machines électriques peuvent être d'origine mécanique (excentricité du rotor, défaut sur les accouplements, usure des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres ou d'anneaux,...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques), figure(I.3). Les variables mesurables telles que les courants, les tensions, la vitesse ou bien encore la température peuvent fournir des

informations significatives sur ces défauts et ainsi servir à déterminer un ensemble de paramètres représentant les signatures de défauts du moteur. [6]

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. [7]



**Figure I.3** Les différents types de défauts dans les machines MSAP

Presque toutes les machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine. [5].

Dans ce travail, on s'intéresse beaucoup plus aux défauts d'origine mécanique.

### I.3.1 Désalignement d'arbres

L'alignement d'arbre est l'opération par laquelle deux machines ou plus (par exemple un moteur et une pompe) sont positionnées de telle sorte qu'au niveau du point de transfert des forces d'un arbre à un autre, les axes de rotation des deux arbres soient colinéaires quand la machine fonctionne dans des conditions normales. [8]

Le défaut d'alignement est une des causes principales de réduction de la durée de vie des équipements. Il crée des efforts importants très destructeurs aux niveaux du système d'accouplement et des paliers. [9] Il peut être provoqué par un arbre courbé ou mal positionné dans ses paliers, ce défaut peut être dû à un mauvais montage ou à des efforts très importants subis par le châssis de la machine; il peut également être provoqué par un défaut de concentricité dans le cas d'arbres parallèles.

### **I.3 .1.1 Détection d'un défaut d'alignement**

Plusieurs symptômes permettent de déceler un désalignement. Vous pouvez les détecter à l'œil nu, sans besoin d'équipement spécial.

- Défaillance prématurée des paliers, joints, arbres et accouplements
- Niveaux de vibrations axiale et radiale élevés
- Températures élevées dans les corps de palier et/ou à proximité, comme des températures d'huile élevées
- Fuite excessive provenant des joints de palier et/ou des bagues
- L'accouplement est chaud en cours de fonctionnement et immédiatement après l'arrêt de l'unité. Vérifier s'il y a des traces de poudre de caoutchouc à l'intérieur de l'accouplement
- Boulons d'ancrage desserrés
- Boulons d'accouplement desserrés ou endommagés
- Quantité excessive de graisse à l'intérieur du carter de protection
- Des composants identiques semblent présenter des phénomènes vibratoires variés ou une durée de vie utile plus ou moins longue
- Les arbres se cassent (ou se fissurent) au niveau ou à proximité des paliers ou des noyaux d'accouplement incidence de la qualité de la fondation et des variations thermiques Même si vous alignez vos machines correctement, elles risquent néanmoins de tomber en panne en raison de défauts d'alignement. Si la fondation sur laquelle repose la machine est déformée, vous pouvez vous retrouver avec un problème de pied boiteux, à savoir que l'un des pieds de la machine n'est pas en contact avec le sol. Il est essentiel que ce problème soit corrigé avant d'effectuer l'alignement. Si l'alignement est effectué lorsque les machines sont froides, et qu'aucune compensation de dilatation thermique n'a été prise en compte, les machines seront probablement fortement désalignées à leur température de fonctionnement. Les différences de température peuvent entraîner un grave défaut d'alignement dû au fait que les capotages de machines et les tuyaux se dilatent en fonction de la variation de la température. [8]

### I.3.1.2 Types de désalignement dans les moteurs

Il existe trois types de désalignement du moteur:

- Un désalignement angulaire se produit lorsque le moteur est incliné par rapport au moteur équipement. Si les axes du moteur et les arbres de l'équipement entraîné étendus, ils se croisent, plutôt que de se superposer ou de courir une ligne centrale commune. Le «trou» ou la différence de pente de l'arbre du moteur lorsque par rapport à la pente de l'arbre de la machine fixe peut avoir désalignement horizontale, désalignement vertical, ou les deux. Désalignement angulaire, en particulier peut causer de graves dommages à l'équipement entraîné et au moteur.
- Un désalignement parallèle se produit lorsque les deux axes de l'arbre sont parallèles, mais pas dans la même ligne. Il y a deux plans de désalignement parallèle car les arbres peuvent être décalés horizontalement (déplacé vers la gauche ou la droite), verticalement (positionné à différentes altitudes), ou les deux.
- Le désalignement de combinaison se produit lorsque l'arbre du moteur souffre d'angle désalignement en plus du désalignement parallèle. (Voir la figure (4))[10]



Figure I.4 Types de désalignement

### I.3.1.3 Conséquences du désalignement

Les conséquences d'un défaut de désalignement sont multiples, on peut citer :

- Niveau important de vibration et bruit :
- Articles produits de faible qualité (lorsque la machine est utilisée dans une chaîne de production)
- Augmente le coût de maintenance de la machine et réduire sa durée de vie.

- La température du fonctionnement des roulements dépassera les valeurs acceptables ce qui accélère leur vieillissement. [11]

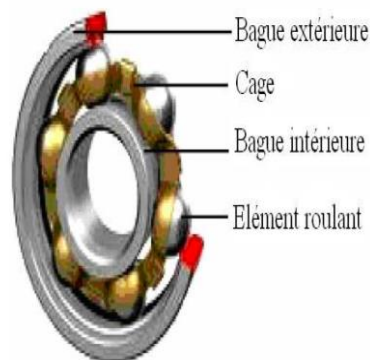
### I.3.4 Défauts des roulements

Les roulements à billes jouent le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. La plupart des défauts survenant dans les roulements des moteurs à induction ainsi que les raisons de leur vieillissement. [12]

On appelle roulement, une pièce mécanique composé de plusieurs éléments entre deux organes, un mobile et l'autre immobile, le roulement est destiné à remplir un glissement par roulement.

De manière générale, les roulements sont constitués de quatre composants essentiels:

- 1-La bague extérieure.
- 2-La bague intérieure.
- 3- La cage.
- 4- Les éléments roulants. [13]



**Figure I.5** Différentes composantes d'un roulement

**1/ Bague extérieure** C'est l'élément qui limite les dimensions extérieures du roulement.

Elle sera montée dans un logement fixe (bague extérieure fixe) ou dans un moyeu tournant (Bague extérieure tournante).

**2/ Bague intérieure** : Elle est montée sur un arbre fixe ou mobile. C'est-à-dire, elle est fixe si la bague extérieure est mobile, et contraire

**3/ Gage** : elle a pour rôle de maintenir le même écartement entre les éléments roulants, à fin de préserver la même zone de charge du roulement, elle ne supporte aucune charge.

**4/ Eléments roulants** : Ils s'agissent des billes, rouleaux et des aiguilles .ce sont les éléments des roulements qui assurent la transmission de la charge entre les deux bagues déroulement, ils sont responsables de la rotation relative d'une bague par rapport à l'autre . [13]

#### **I.3.4.1 Causes principale des défauts**

Les roulements peuvent être endommagés par des causes externes comme:

- Contamination du roulement par des particules extérieures : poussière, grains de sable ...
- Corrosion engendrée par la pénétration d'eau, d'acides.....
- Lubrification inadéquate qui peut causer un échauffement et l'usure du roulement.
- Mauvais alignement du rotor.
- Courant qui traverse le roulement et qui cause des arcs électriques [13]

Dans une machine électrique, les roulements jouent le rôle d'interface mécanique entre le rotor et le stator. En effet, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine assurant une bonne rotation du rotor [12]. Les roulements à billes, illustrés dans la figure I.9, sont les plus utilisés dans la majorité des machines électriques en raison de leurs meilleurs rapports performance-prix [6].

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

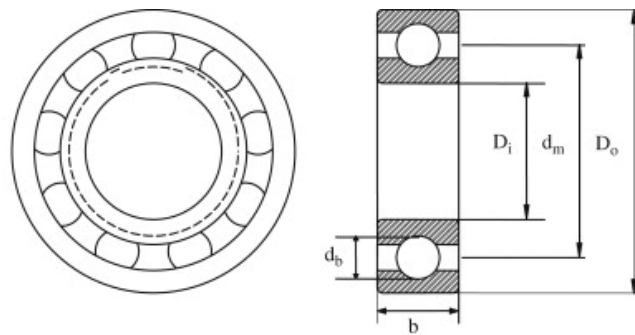
- Défaut de bague externe,
- Défaut de bague interne,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage. [14]

Le défaut de roulement est le plus fréquent sur les machines de fortes puissances. Il est généralement lié à l'usure des roulements et plus précisément une dégradation des billes, ou de la bande de roulement. Ses causes possibles sont l'usure due au vieillissement, une température de fonctionnement élevée, la perte de lubrification, l'huile contaminée (par des paillettes métalliques issues de la dégradation des billes ou de la bande de roulement). [12]



Les roulements sont des éléments communs dans toutes les machines électriques. Ils sont employés pour permettre le mouvement de rotation de l'arbre. En fait, les roulements sont la cause principale des défaillances de machines. Un roulement à billes se présente sous la forme de deux bagues coaxiales, une bague intérieure et une autre extérieure. Entre ces bagues sont placées des billes, légèrement lubrifiées, et maintenues espacées par une cage. [9]

La contrainte continue sur les roulements provoque des pannes, souvent sur les bagues, que ce soit intérieure ou extérieure. Des petits morceaux se détachent du roulement, appelé écaillage. Ce défaut entraîne un fonctionnement irrégulier des roulements qui génère des vibrations détectables et des niveaux de bruit plus élevés. Ce processus est encouragé par d'autres sources externes, y compris la contamination, la corrosion, la lubrification inadéquate, et la mauvaise installation [15].



**Figure I.6** Dimensions géométriques du roulement qui interviennent dans le calcul des fréquences caractéristique

Les déplacements mécaniques résultants du roulement endommagé provoquent l'entrefer de la machine à faire varier d'une manière qui peut être décrite par une combinaison d'excentricités de déplacement en rotation dans les deux sens. Grâce aux excentricités de rotation, la vibration génère des courants statoriques à une fréquence donnée par [15] :

$$f_{bearing} = |f_1 \pm m \cdot f_{i,o}| \quad (I.1)$$

Avec  $m=1, 2, 4, \dots$  et  $f_{i,o}$  une des fréquences caractéristiques et qui dépend des dimensions géométriques du roulement montrées sur la figure (6)

$$f_{i,o} = \frac{N_b}{2} f_r \left( 1 \pm \frac{d_b}{D_0} \cos \alpha \right) \quad (\text{I.2})$$

Où,  $f_{i,o}$  la fréquence caractéristique qui correspond à un défaut sur le bague intérieure et extérieure respectivement.  $N_b$  nombre de billes,  $f_r$  vitesse de rotation en tr/s,  $d_b$  diamètre des billes,  $D_0$  diamètre moyen des roulements et  $\alpha$  l'angle de contact.

### I.3.5 Défaut d'excentricité

L'excentricité de la machine est définie comme une asymétrie dans l'entrefer à vide qui existe entre le stator et le rotor. La présence d'un certain niveau d'excentricité est normale dans les machines électriques. Des fabricants et utilisateurs spécifient un niveau admissible maximum de 5%, tandis que dans d'autres cas, un niveau maximum de 10% de la largeur d'entrefer est permis par d'autre utilisateur. Cependant, les fabricants essayent d'avoir un niveau d'excentricité très faible afin de réduire les vibrations et le bruit et de minimiser les forces radiales résultantes qui peuvent créer une bande de frottement entre le stator et le rotor qui endommage la machine. Par conception, l'entrefer d'une machine à induction est considérablement plus petit que dans d'autres types de machines ayant les mêmes grandeurs et performances, la machine synchrone sera la plus sensible aux excentricités. [6].

On distingue deux principaux types d'excentricité qui peuvent apparaître dans les machines tournantes. [16]

- L'excentricité statique : peut-être causée par l'ovalité de la partie intérieure du stator, ou par un mauvais positionnement du rotor ou du stator durant la phase de construction. Si l'assemblage arbre-rotor est suffisamment rigide, le niveau d'excentricité statique ne change pas.

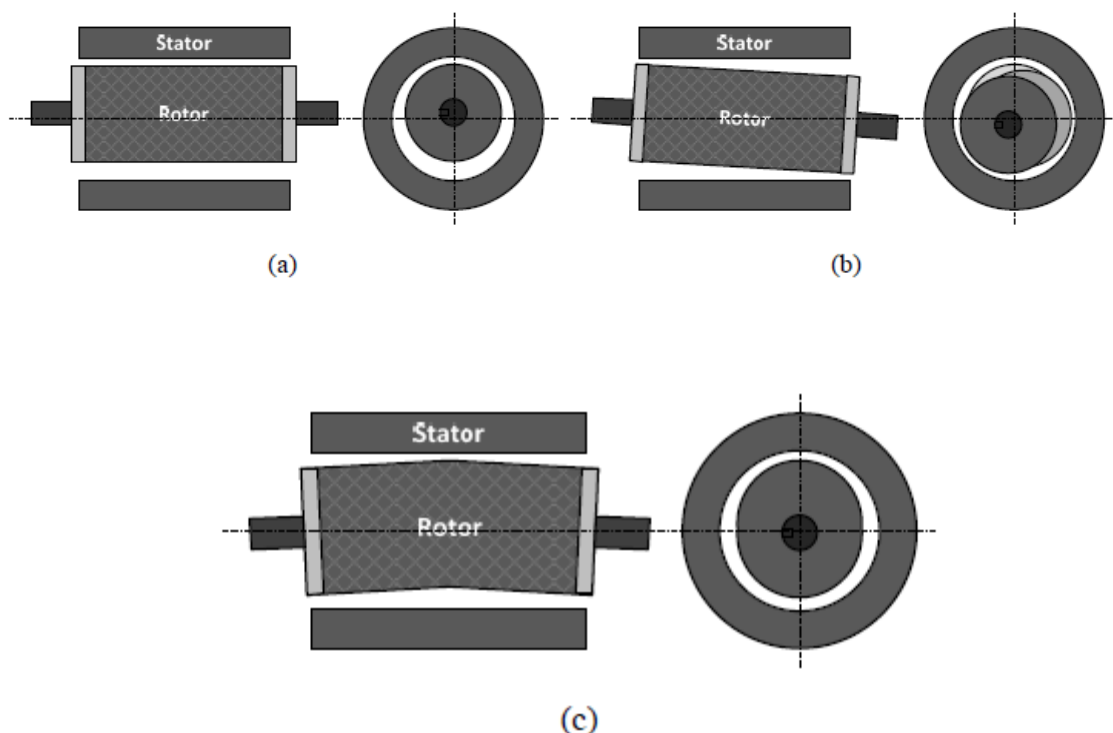
- L'excentricité dynamique : est due à une déformation ou un désalignement du rotor ou à un desserrage de barres rotoriques. Dans le cas de l'excentricité dynamique, le centre du rotor n'est pas confondu avec son centre de rotation. Et par conséquent, la position de l'entrefer minimale change avec la position du rotor. Ce qui fait que l'excentricité dynamique dépend du temps et de l'espace, alors que l'excentricité statique dépend seulement de l'espace.

L'excentricité dynamique peut être provoquée par la flexion de l'arbre, l'usure des roulements, les défauts d'alignement entre le rotor et la charge, la résonance mécanique à la vitesse critique,.....etc.

On cite aussi dans la littérature l'excentricité axiale, ou plus généralement, à une non uniformité axiale de l'entrefer.

En réalité les excentricités statiques et dynamiques ont tendance à coexister. Même à l'état sain, la machine présente toujours un certain degré d'excentricité statique résiduelle dû aux inévitables erreurs de fabrication. [16]

Ce défaut modifie les comportements magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur l'armature statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibre le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements. [12]



**Figure I.7** Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

### **I.3.5.1 Causes de l'excentricité statique**

L'excentricité statique résulte soit d'une imperfection dans l'alésage du stator, soit d'un mauvais positionnement du rotor et/ou du stator à l'assemblage. Supposant que l'arbre du rotor est suffisamment raide, le niveau de l'excentricité statique ne change pas. [6]

### **I.3.5.2 Causes de l'excentricité dynamique**

L'excentricité dynamique peut être provoquée par plusieurs facteurs, tels que des tolérances de fabrication, usure des roulements, désalignement, résonance mécanique à la vitesse critique, ou aussi à des pièces endommagés à la fabrication. [6]

### **I.3.5.3 Concept de défaut d'excentricité statique dans le moteur électrique**

Normalement, le rotor qui est centré sur l'alésage du stator d'un moteur sain entraîne un entrefer identique entre le stator et le rotor. En conséquence, les forces magnétiques sont équilibrées dans les directions opposées, mais lorsque l'excentricité émerge, cet entrefer diminue d'un côté alors qu'il augmente de l'autre côté à tout angle de giration qui entraîne une force d'absorption plus élevée dans l'intervalle le plus court. [17]

### **I.3.5.4 Indicateurs d'excentricité**

Si un certain niveau d'excentricité entre le rotor et le stator se produit dans un moteur électrique, quelle que soit son origine, il fait apparaître de nouvelles harmoniques dans l'entrefer et/ou une augmentation dans l'amplitude des harmoniques existants auparavant. Ensuite, il produit un effet global qui stimule le développement d'effets secondaires suivants

- Efforts d'attraction magnétiques non compensés (Unbalanced Magnetic Pull UMP),
- Distorsion du couple,
- Intensification de vibrations et de bruit,
- Réduction de la vitesse du rotor,
- Passage du courant électrique à travers les roulements

De nombreux systèmes de surveillance déterminent le spectre de Fourier du courant d'une phase afin de surveiller l'état du moteur. Ces systèmes estiment les harmoniques spécifiques de défaut additionnel qui sont dues au désalignement du rotor. Les fréquences de ces harmoniques sont calculées à partir du nombre de barres du rotor et du glissement définit les composantes fréquentielles à surveiller dans le spectre du courant statorique pour la détection

d'excentricité statique ou dynamique en rappelant que toute excentricité dans l'entrefer perturbe la densité du flux électromagnétique. Les fréquences d'intérêt sont données par

$$f_{exc} = f_s \left[ 1 + k \left( \frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (I.3)$$

( $f_s$  : fréquence d'alimentation du stator)

où  $k = 1, 2, 3, \dots$

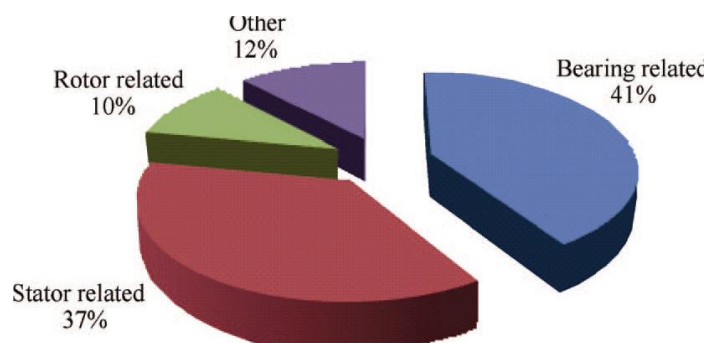
Les déséquilibres mécaniques provoquent deux harmoniques du premier ordre du courant. En raison de l'interaction des courants et des tensions, ces deux harmoniques du courant se traduisent par une seule composante harmonique dans le spectre de la puissance électrique. Montrent que la composante sur la puissance est plus facile à localiser que celle sur le courant.

Les signaux spécifiques aux excentricités sont également présents dans le flux électromagnétique, qui peut être mesuré par des bobines exploratrices "search coils" qui captent le flux axial de fuite et le flux électromagnétique de l'entrefer]. D'autres méthodes analysent les vibrations mécaniques ou acoustiques provoquées par des déséquilibres mécaniques, analyse du couple, et les forces radiales. [6]

Les défauts d'excentricité dans les machines synchrones à aimants permanents font objet du travail de ce mémoire de Master.

#### I.4 Etude statistique sur les défauts dans les machines électriques

Plusieurs études statistiques ont été effectuées sur la fiabilité des machines électriques. La plus importante est celle présenté sur le diagramme ci-dessous [II.8]



**Figure I.8** Statistique sur les défauts dans les machines électriques

On remarque bien que les défauts rotoriques sont dominants par rapport aux autres. [18] Cela justifié l'importance des études concernant la détection et le diagnostic de ces défauts.

### **Conclusion**

Ce chapitre présente une étude bibliographique concernant les défauts dans les machines synchrones à aimants permanents particulièrement les défauts mécaniques.

## Introduction

Les modèles analytiques décrivent le fonctionnement des machines électriques en termes de grandeurs globales telles que courants, tensions, flux, vitesse de rotation...

Le but de ce chapitre, la présentation du modèle électromagnétique qui permet le calcul des grandeurs électromagnétiques (induction magnétique et FEM induite) de la MSAP en tenant compte d'un défaut d'excentricité. L'excentricité du rotor qui est traduite par un entrefer variable est introduite par le biais de l'expression de la perméance.

### II.1 Effet d'un défaut d'excentricité sur la distribution de l'induction magnétique de l'entrefer

Les efforts radiaux qui sont à l'origine des phénomènes de vibrations et bruit sont fortement liés à la distribution de l'induction dans l'entrefer de la machine [19] [20]. Une perturbation de cette distribution donnera naissance à d'autres harmoniques, qui peuvent créer des ondes de forces avec des modes faibles. Ces derniers sont très efficaces du point de vue vibroacoustique. Parmi les défauts qui conduisent à une modification de la distribution de l'induction magnétique radiale il y a le défaut d'excentricité. [9]

Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator, donc l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe de révolution.

L'excentricité dans une machine est définie comme un entrefer non uniforme entre le stator et le rotor. Malgré les précautions prises dans la phase du montage, chaque machine électrique comporte un certain degré d'excentricité.

L'effet de l'excentricité est pris en compte à travers la perméance de l'entrefer.

En présence d'une excentricité, la variation de l'entrefer autour de la périphérie du circuit magnétique et avec le temps est donnée par cette expression :

$$g(\theta_s, t) = R - r - e \cos(\theta_s - W_\epsilon t) = g[1 - \epsilon \cos(\theta_s - W_\epsilon t)] \quad (\text{II.1})$$

Où  $g = R - r$ ,  $R$  et  $r$  sont respectivement, le rayon interne du stator et externe du rotor.

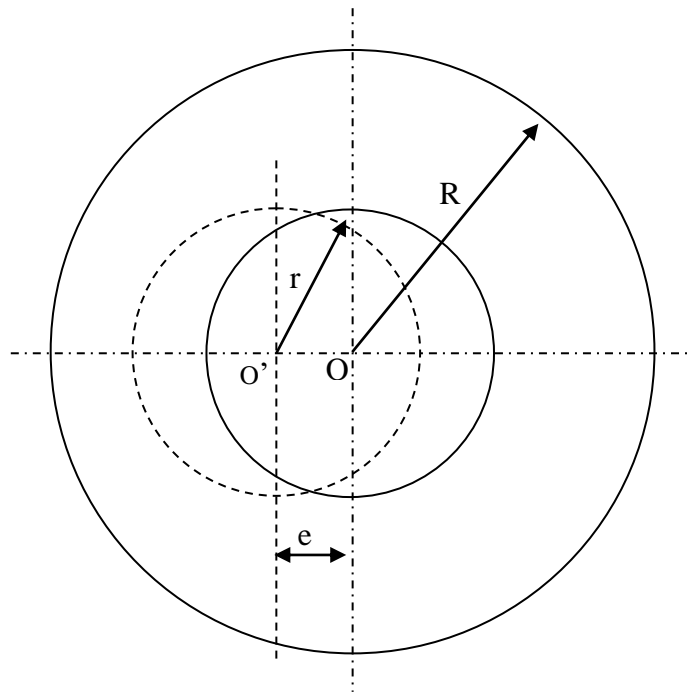


Figure II.1 Circuit magnétique dans une machine qui comporte une excentricité.

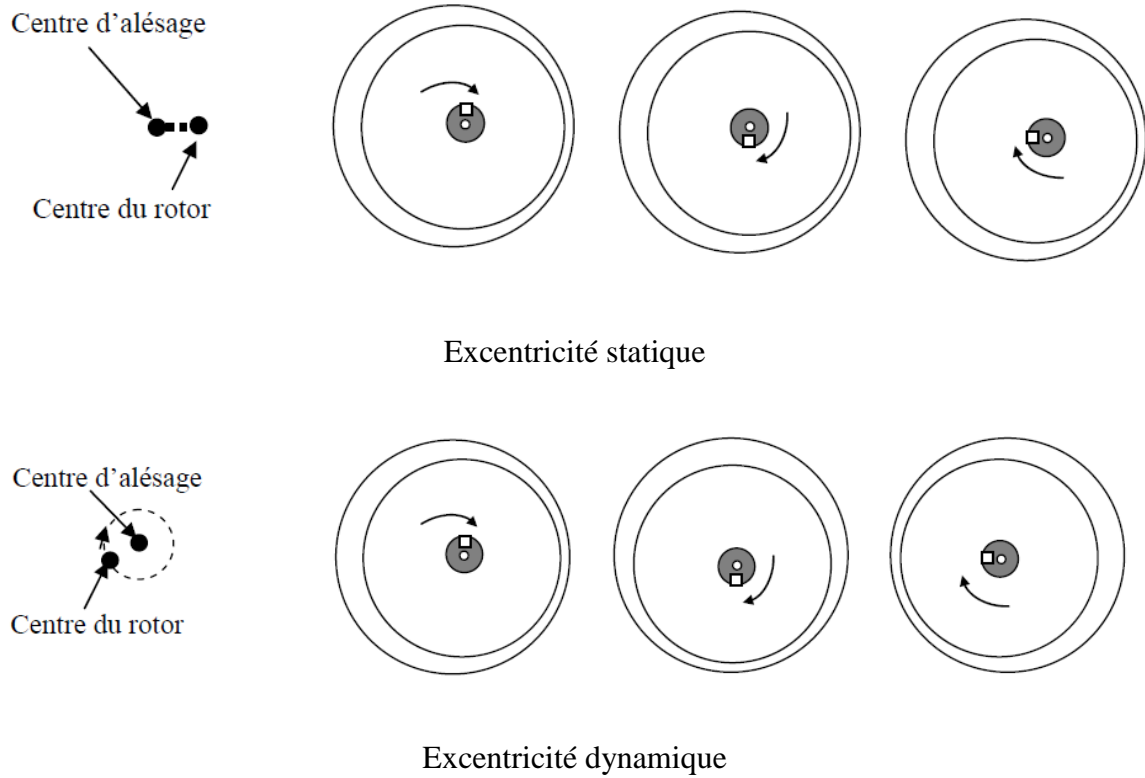


Figure II.2 Illustration des deux types d'excentricité, statique et dynamique.



L'excentricité relative est définie par :

$$\varepsilon = \frac{e}{g} \quad (\text{II.2})$$

Où  $e$  est l'excentricité du rotor (ou de l'arbre) et  $g$  l'épaisseur de l'entrefer pour  $e=0$ .

- Dans le cas de l'excentricité statique

$$W_e = 0 \quad (\text{II.3})$$

- Dans le cas de l'excentricité dynamique :

• Pour les machines asynchrones

$$W_\varepsilon = W_r(1-S) = \frac{W}{P}(1-S) = 2\pi \frac{f}{p}(1-S) \quad (\text{II.4})$$

• Pour les machines synchrones

$$W_\varepsilon = W_r = \frac{W}{P} = 2\pi \frac{f}{p} \quad (\text{II.5})$$

Par conséquent, la perméance de l'entrefer peut être écrite sous la forme :

$$\Lambda_{ecs,d}(\theta_s, t) = \frac{u_0}{g(\theta_s, t)} = \frac{u_0}{g[1 - \varepsilon \cos(\theta_s - W_\varepsilon t - \varphi_\varepsilon)]} \quad (\text{II.6})$$

L'expression (II.5) peut être décomposée en séries de Fourier comme suit :

$$\Lambda_{ecs,d}(\theta_s, t) = \frac{u_0}{g[1 - \epsilon \cos(\theta_s - W_e t - \varphi_\epsilon)]} = \frac{u_0}{g} \lambda_{ecs,d}(\theta_s, t) \quad (\text{II.7})$$

$$= \lambda_{0,es} + \sum_k \lambda_{ck} [\cos(\theta_s - W_e t - k\theta_s) + \lambda_{ck} \sin(W_e t - k\theta_s)]$$

Avec :

$$\lambda_{0,es} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{1 - \cos(\theta_s)} d\theta_s = \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} \quad (\text{II.8})$$

$$\lambda_{c1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\cos(\theta_s)}{1 - \epsilon \cos(\theta_s)} d\theta_s \approx 2 \frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon^2}}{\epsilon \sqrt{1 - \epsilon^2}} \quad (\text{II.9})$$

Donc de façon générale :

$$\Lambda_{ecs,d}(\theta_s, t) = \frac{\mu_0}{g} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \epsilon^2}} + \sum_k 2 \left( \frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon^2}}{\epsilon \sqrt{1 - \epsilon^2}} \right)^k \cos k(w_e t - \theta_s) \right] \quad (\text{II.10})$$

Finalement, en présence d'une excentricité, la perméance de l'entrefer (équation (II.12)) prendra la forme suivante :

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 + \Lambda_1(\theta_s) + \Lambda_2(\theta_s, t) + \Lambda_{1,2}(\theta_s, t) + \Lambda_{ecs,d}(\theta_s, t) \quad (\text{II.11})$$

Où  $\Lambda_1$  est le deuxième terme de l'équation (II.12)

$$\Lambda(\alpha^s, \theta_d) = \Lambda_0 + \sum_{ks=1}^{+\infty} \Lambda_{ks} \cos[ksZ^s \theta_s] + \sum_{kr=1}^{+\infty} \Lambda_{kr} \cos[krZ^r \theta_s - krZ^r \theta_d] \\ + \frac{1}{2} \sum_{ks=1}^{+\infty} \sum_{kr=1}^{+\infty} \Lambda_{kskr} \left\{ \cos[(ksZ^s + krZ^r) \theta_s - krZ^r \theta_d] + \cos[(ksZ^s - krZ^r) \theta_s + krZ^r \theta_d] \right\} \quad (\text{II.12})$$

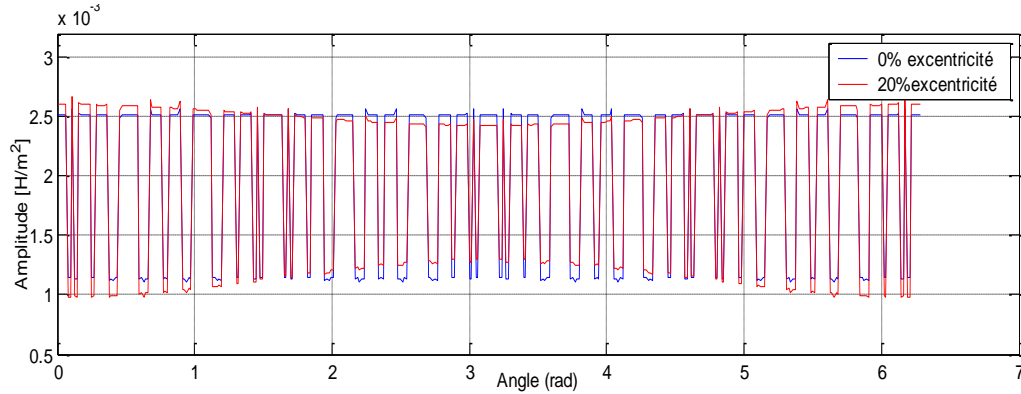
il traduit l'effet de la denture du stator.

$\Lambda_2$  Est le troisième terme de l'équation (II.12) il représente l'effet de la denture rotorique.

$\Lambda_{1,2}$  Est le dernier terme de l'équation (II.12), il représente l'effet combiné de la denture statorique et rotorique.

$\Lambda_{ecs,d}$  Représente l'effet de l'excentricité statique et/ou dynamique.

Figure (II.3) montre la variation spatiale de la perméance de l'entrefer en absence et en présence d'une excentricité statique. On remarque sur la figure (II.3). la déformation due à l'effet de l'excentricité.



**Figure II.3** Variation spatiale de la perméance de l'entrefer en absence et en présence d'une excentricité

## II.2 Modèle Electromagnétique de la Machine Synchrone à Aimants Permanents

Le modèle électromagnétique de la machine synchrone à aimants permanents, est similaire à celui de la machine asynchrone, avec quelques particularités liées d'un côté à la nature de la source, qui est dans ce cas là des aimants permanents et pas des courants et d'un autre côté, à la différence dans la configuration géométrique, puisque la MSAP est considérée comme une machine à rotor lisse avec correction de l'épaisseur de l'entrefer pour tenir compte de l'effet de la hauteur des aimants [9].

En supposant que le fer du stator et du rotor possède une perméabilité infinie, l'étude de la variation de l'induction magnétique dans l'entrefer de la MSAP, peut être ramenée à un modèle linéaire. L'induction sous n'importe quelle condition de charge étant obtenue par la superposition de la composante de l'induction créée par le rotor à aimants et la réaction du stator. Pour tenir compte de l'effet de la denture du stator les deux composantes doivent être modulées par la perméance relative de l'entrefer.

$$B(\theta, t) = [B_m(\theta, t) + B_s(\theta, t)]\lambda(\theta) \quad (\text{II.13})$$

Où :

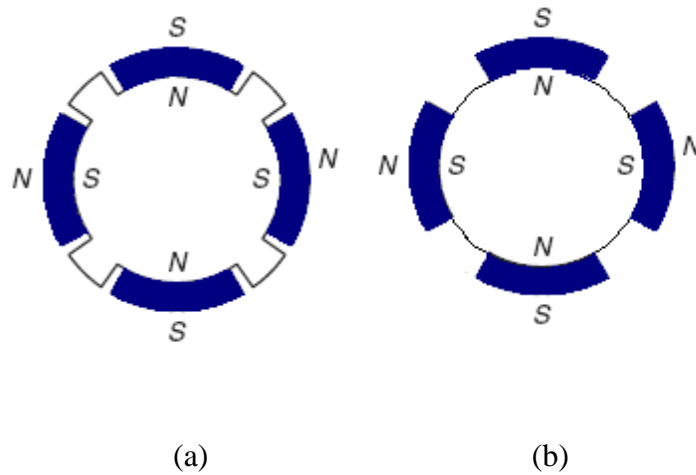
$B_m(\theta, t)$  L'induction créée par le rotor à aimants en cas d'un stator lisse.

$B_s(\theta, t)$  L'induction créée le bobinage du stator de la MSAP.

$\lambda(\theta)$  : La perméance relative de l'entrefer, qui permet de tenir compte de l'effet de l'encoche statorique.

### II.3 Induction magnétique produite par le rotor à aimants dans l'entrefer de la MSAP

Le modèle de calcul de l'induction magnétique des aimants dans l'entrefer est basé sur la résolution analytique des équations de Maxwell dans les différentes parties de la MSAP. Il est général et il peut être adapté pour la majorité des structures du rotor de la machine. Il permet même de tenir compte de l'asymétrie de l'aimantation des aimants. Ce phénomène qui se produit particulièrement dans les machines à aimants a un effet grave sur le comportement vibratoire de la MSAP.[9]



**Figure (II-4)** Configurations du rotor à aimant (a) : aimants insérés. (b) aimants en surface

Dans cette étude nous avons adoptés les hypothèses simplificatrices suivantes :

- a- l'effet des encoches est négligé (il sera considéré plus tard).
- b- la perméabilité du fer du stator et du rotor est considérée infinie.
- c- Les aimants permanents ont une désaimantation linéaire, et ils sont complètement aimantés dans la direction radiale.

Sur la figure (II-4):

$R_s$  : le rayon interne du stator ;  $R_r$  : le rayon interne du rotor ;  $R_m$  : le rayon externe du rotor ;  $g$  : l'épaisseur de l'entrefer ;  $h_m$  : la hauteur des aimants.

Le domaine d'étude est subdivisé en trois sous régions I, II, et III, cependant pour simplifier l'étude les deux sous régions II et III ont été intégrés en supposant que l'espace entre l'aimant

et l'inter aimants est occupé par un aimant à savoir  $\mu_{III} = \mu_{II}$ , mais l'aimant est complètement aimanté dans la sous-région II et désaimanté dans la sous-région III [9].

La distribution du champ magnétique en terme du potentiel scalaire magnétique est donnée par :

$$\text{Dans la région de l'entrefer : } \nabla^2 \varphi_I = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Dans la région des aimants : } \nabla^2 \varphi_{II} = \frac{\text{div}M}{\mu_r} = \frac{M_r}{r\mu_r} \quad (\text{II.15})$$

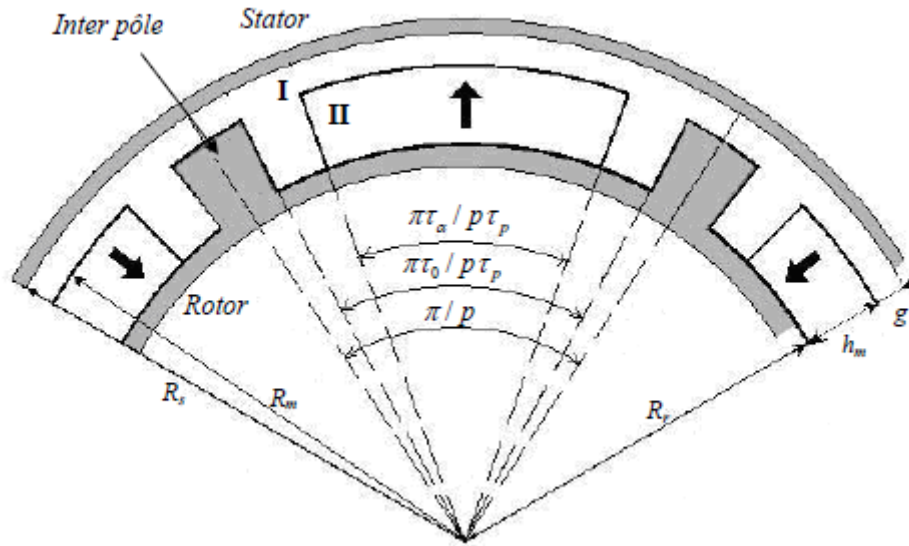


Figure (II-5) Modèle géométrique général de la MSAP

Le distribution de l'aimantation est montrée sur la figure (II-5).

Sur un pas polaire, l'aimantation peut être décomposée en séries de Fourier comme suit :

$$M_r = \sum_{j=1,3,5,\dots} M_j \cos\left(jp \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) \quad (\text{II.16})$$

Où :

$$M_j = 4 \frac{B_r}{\mu_0} \left(\frac{1}{j\pi}\right) \sin\left(\frac{j\pi\alpha_p}{2}\right) \alpha_p = \frac{\tau_\alpha}{\tau_0} \quad (\text{II.17})$$

L'hypothèse de la perméabilité infinie du stator et du rotor permet de supposer que la composante tangentielle du champ magnétique est nulle sur leurs surfaces :

$$H_{\theta| r=R_s} = 0 \quad (\text{II.18})$$

$$H_{\theta| r=R_r} = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$H_{\theta| \theta=\pm \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p}} = 0 \quad (\text{II.20})$$

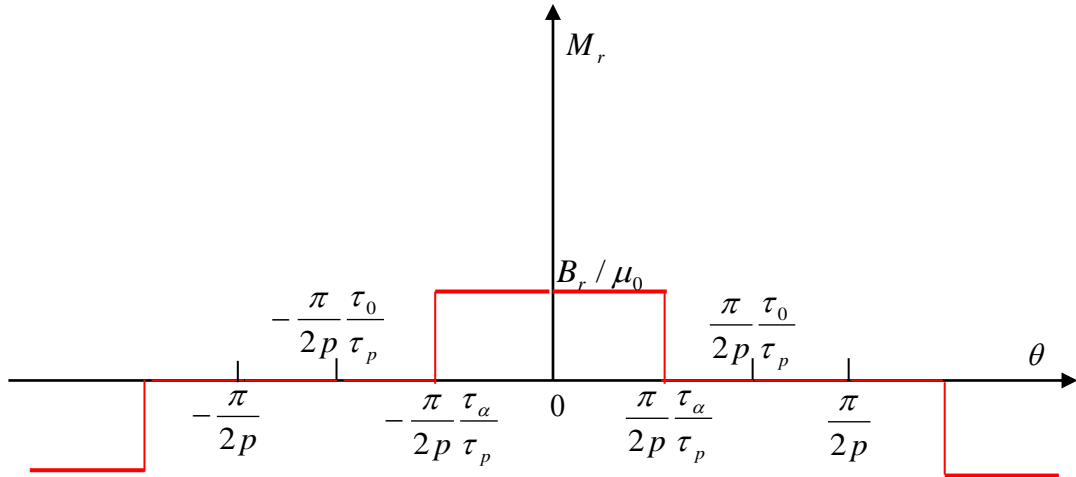


Figure II.6 Distribution spatiale de l'aimantation

Encore, en raison de la symétrie et la périodicité on a :

$$\varphi_{1\theta=\frac{\pi}{2p}} = -\varphi_{1\theta=-\frac{\pi}{2p}} \quad (\text{II.21})$$

Le champ magnétique est continu à la surface  $r = R_m$ , donc :

$$H_{\theta} = \begin{cases} H_{\theta} & |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \\ 0 & \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \leq |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

$$B_{rI} = B_{rII} , \text{ pour } |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \quad (\text{II.23})$$

A savoir :

$$\frac{\partial \varphi_I}{\partial \theta} = \begin{cases} \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial \theta} & |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \\ 0 & \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \leq |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{\partial \varphi_I}{\partial r} = \mu_r \frac{\partial \varphi_{II}}{\partial r} - M_r, \text{ pour } |\theta| \leq \frac{\pi}{2p} \frac{\tau_0}{\tau_p} \quad (\text{II.25})$$

Dans un système de coordonnées polaires, la solution générale de l'équation II.14) et (II.15), dans les sous régions I et II est qui satisfait les conditions aux limites (II.22) et (II.24) est :

$$\varphi_I = \sum_{n=1,3,5,\dots} r A_{nI} \left[ \left( \frac{r}{R_s} \right)^{np-1} \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} - \left( \frac{R_m}{r} \right)^{np+1} \right] \cos(np\theta) \quad (\text{II.26})$$

Pour  $jp \neq 1$

$$\begin{aligned} \varphi_{II} = & \sum_{j=1,3,5,\dots} r A_{jII} \left[ \left( \frac{r}{R_m} \right)^{jp-1} - \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{jp-1} \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} \right] \cos\left(jp \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) + \dots \\ & + \sum_{j=1,3,5,\dots} \frac{r M_j}{\mu_r [(jp)^2 - 1]} \left[ \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} - 1 \right] \cos\left(jp \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

Pour  $jp = 1$

$$\varphi_{II} = A_{1II} (r - R_r^2 r^{-1}) \cos\left(\frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) + \frac{1}{2} \frac{M_1}{\mu_r} [r \ln r - R_r^2 r^{-1} \ln R_r] \cos\left(\frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) \quad (\text{II.28})$$

On obtient alors pour les composantes de l'induction magnétique :

$$B_{rI} = -\mu_0 \sum_{1,3,5,\dots} A_{nI} (np) \left[ \left( \frac{r}{R_s} \right)^{np-1} \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} - \left( \frac{R_m}{r} \right)^{np+1} \right] \cos(np\theta) \quad (\text{II.29})$$

$$B_{\theta I} = \mu_0 \sum_{1,3,5,\dots} A_{nI} (np) \left[ \left( \frac{r}{R_s} \right)^{np-1} \left( \frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} + \left( \frac{R_m}{r} \right)^{np+1} \right] \sin(np\theta) \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{aligned} B_{rII} = & -\mu_0 \mu_r \sum_{j=1,3,5,\dots} A_{jII} (jp) \left[ \left( \frac{r}{R_m} \right)^{jp-1} + \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{jp-1} \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} \right] \cos\left(jp \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) + \dots \\ & + \mu_0 \sum_{j=1,3,5,\dots} \frac{r M_j}{[(jp)^2 - 1]} (jp) \left[ \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} + jp \right] \cos\left(jp \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta\right) \end{aligned} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{aligned}
 B_{\theta II} = & \mu_0 \mu_r \sum_{j=1,3,5,\dots} A_{jII} \left( j p \frac{\tau_p}{\tau_0} \right) \left[ \left( \frac{r}{R_m} \right)^{jp-1} + \left( \frac{R_r}{R_m} \right)^{jp-1} \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} \right] \sin \left( j p \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) + \dots \\
 & + \mu_0 \sum_{j=1,3,5,\dots} \frac{M_j}{\mu_r [(jp)^2 - 1]} \left( j p \frac{\tau_p}{\tau_0} \right) \left[ \left( \frac{R_r}{r} \right)^{jp+1} - 1 \right] \sin \left( j p \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) \quad (II.32)
 \end{aligned}$$

Lorsque  $jp = 1$

$$B_{rII} = -\mu_0 \mu_r A_{1II} \left[ 1 + \left( \frac{R_r}{r} \right)^2 \right] \cos \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) + \frac{\mu_0}{2} M_1 \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{r} \right)^2 \ln R_r - \ln r \right] \cos \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) \quad (II.33)$$

$$B_{\theta II} = \mu_0 \mu_r A_{1II} \left[ 1 - \left( \frac{R_r}{r} \right)^2 \right] \sin \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) + \frac{\mu_0}{2} M_1 \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \right) \left[ \ln r - \left( \frac{R_r}{r} \right)^2 \ln R_r \right] \cos \left( \frac{\tau_p}{\tau_0} \theta \right) \quad (II.34)$$

On peut facilement adapter le modèle pour le rotor à aimant en surface en supposant dans les équations précédentes que  $\tau_0 = \tau_p$ .

Le détermination des constantes d'intégration  $A_{nl}$ ,  $A_{nl}$ ,  $A_{jl}$  et  $A_{jll}$ , se fait en appliquant les relations de continuité entre les sous régions et l'analyse par les séries de Fourier. Cette démarche est présentée dans l'annexe B.

#### II.4 Induction magnétique produite par les enroulements statoriques

Le calcul de l'induction créée par le bobinage triphasé du stator nécessite la détermination du courant qui circule dans les phases. Cela passe par la modélisation de la commande de l'onduleur de tension qui alimente la machine. La structure de l'onduleur et les éléments constituant cette alimentation sont présentés sur la figure (II.7).

Une expression analytique de l'induction créée par un enroulement triphasé ondulé, dans les sous régions entrefer/aimant a été présentée par [9]. Elle est déduite à partir d'un modèle bidimensionnel en coordonnées polaires, dans lequel les courants des conducteurs ont été remplacés par des nappes de courant situées à l'ouverture de l'encoche. Le modèle a été aussi étendu pour le cas du bobinage imbriqué.



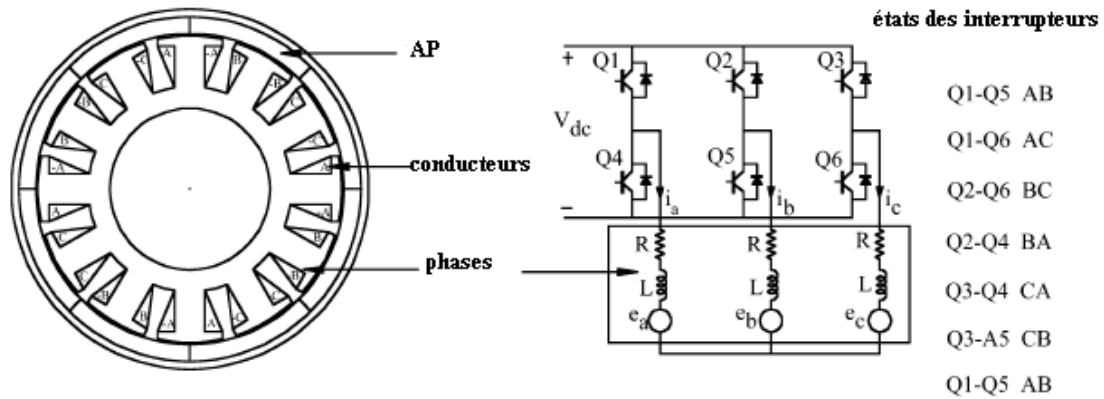


Figure II.7 Alimentation de la MSAP à travers un onduleur de tension

L'induction créée par le bobinage triphasé du stator est donnée par l'expression générale suivante :

$$B_w(\theta, t) = \mu_0 \frac{3W}{\pi g} \sum_u I_u \sum_{v=pk} \frac{1}{v} K_{sov} K_{dpv} F_v(r) \sin(upw_r t \pm v\theta + \theta_u) \quad (II.35)$$

Où :  $v = pk = p(6c - \{\pm\}u)$  , pour un bobinage ondulé.

$v = pk = p(3c - \{\pm\}u)$  , pour un bobinage imbriqué.

$c = 0; \pm 1, \pm 2, \dots$

$$F_v(r) = g \frac{v}{r} \left( \frac{r}{R_s} \right)^v \frac{1 + \left( \frac{R_r}{r} \right)^{2v}}{1 - \left( \frac{R_r}{r} \right)^{2v}} \quad (II.36)$$

$\theta = 0$  : correspond à l'axe de la phase A.

Dans les MSAP le courant de phase contient plusieurs harmoniques d'amplitude  $I_u$  et de phase  $\theta_u$ , la figure (II.8) montre le courant d'une phase pour machine qui possède 4 pôles et qui tourne à une vitesse de 3500 rpm (fréquence des courants statorique  $f_1=116.66$  Hz). Les fréquences  $f_1, 5f_1, 7f_1, 11f_1$  dominent le spectre du courant

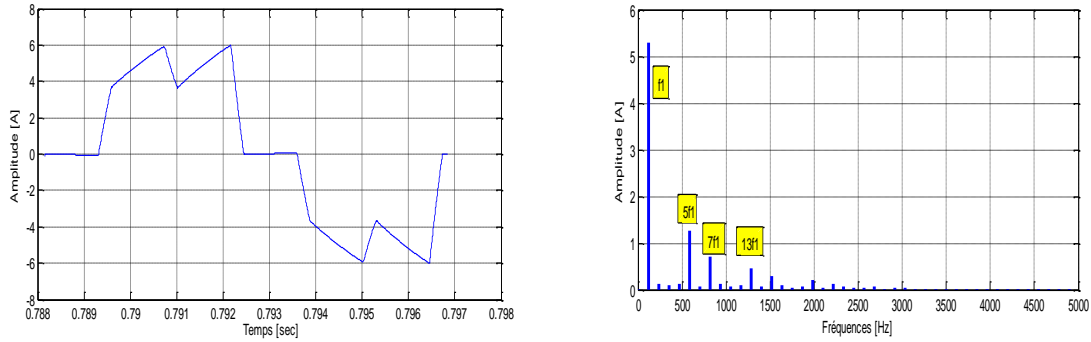


Figure II.8 Courant de phase et sa décomposition fréquentielle.

## II.5 Expression de la perméance de l'entrefer

La perméance de la région entrefer/aimant peut être calculée par la méthode de transformation conforme, en appliquant un potentiel magnétique égal à 1 entre les deux parties ferromagnétiques, en absence des aimants [21] et en supposant l'encoche du stator rectiligne et infiniment profonde (figure(II.9)). Puisque l'entrefer des machines à aimants est généralement large, une fonction de perméance 2d est introduite, à savoir :

$$\lambda(\alpha, r) = \begin{cases} \Lambda_0 [1 - \beta(r) - \beta(r) \cos \frac{\pi}{0.8\alpha_0} \alpha] & \text{si } 0 \leq \alpha \leq 0.8\alpha_0 \\ \Lambda_0 & \text{si } 0.8\alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_t \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$$\Lambda_0 = \frac{\mu_0}{g + h_m / r} \quad (\text{II.38})$$

$\alpha_0$ ,  $\alpha_t$  sont respectivement l'ouverture et le pas d'encoche en radian.

La fonction  $\beta(r)$  est définie à l'axe de l'encoche statorique et dépend de la position radiale, cette fonction peut être aussi déterminée par une transformation conforme :

$$\beta(r) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_0}{2g'}\right)^2 (1 + v^2)}} \right] \quad (\text{II.39})$$

$v$  est déterminé à partir de l'équation :

$$y \frac{\pi}{b_0} = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\sqrt{a^2 + v^2} + v}{\sqrt{a^2 + v^2} - v} \right] + \frac{2g'}{b_0} \arctan \frac{2g'}{b_0} \frac{v}{\sqrt{a^2 + v^2}} \quad (\text{II.40})$$

$$a^2 = 1 + \left( \frac{2g'}{b_0} \right)^2 \quad (\text{II.41})$$

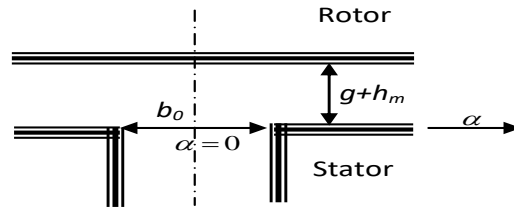
Avec :

- Pour les machines à aimant intérieur :

$$y = r - (R_s - g - h_m) \quad (\text{II.42})$$

Pour les machines à aimant extérieur :

$$y = (R_s + g + h_m) - r \quad (\text{II.43})$$



**Figure II.9** Modèle de calcul de la perméance

La fonction de la perméance relative est alors calculée comme suit :

$$\tilde{\lambda}(\alpha, t) = \frac{\lambda(\alpha, t)}{A_0} = \frac{\lambda(\alpha, t)}{\mu_0 / g'} \quad (\text{II.42})$$

Cette dernière peut être exprimée en série de Fourier :

$$\tilde{\lambda}(\alpha, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k(r) \cos(ks_1\alpha) \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$$A_k(r) = \frac{2}{\alpha_t} \int_{-\alpha_t/2}^{\alpha_t/2} \tilde{\lambda}(\alpha, t) \cos(ks_1\alpha) d\alpha =$$

$$\frac{4}{\alpha_t} \left\{ \int_0^{0.8\alpha_0} \left( \Lambda_0 [1 - \beta(r) - \beta(r) \cos \frac{\pi}{0.8\alpha_0} \alpha] \right) \cos \frac{2\pi}{\alpha_t} k\alpha + \int_{0.8\alpha_0}^{0.5\alpha_t} \cos \frac{2\pi}{\alpha_t} k\alpha d\alpha \right\}$$

$$= -\beta(r) \frac{4}{k\pi} \left[ 0.5 + \frac{\left( k \frac{b_0}{\tau_t} \right)^2}{0.78125 - 2 \left( k \frac{b_0}{\tau_t} \right)^2} \right] \sin \left( 1.6\pi k \frac{b_0}{\tau_t} \right) \quad (\text{II.44})$$

Avec :  $b_0$  et  $\tau_t$  sont respectivement l'ouverture d'encoche et le pas d'encoche en mètre.

## II.6 FEM induit dans une phase du stator

Le flux magnétique qui traverse les bobines et en tenant compte de l'excentricité est calculé calculée par :

$$\Psi_i = R_s \int_{\alpha_i}^{\alpha_i} B_m d\alpha \quad (\text{II.45})$$

$$\Psi_{phas} = \sum_i^{\alpha_i} \Psi_i = e = \frac{d\Psi_i}{dt} \quad (\text{II.46})$$

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle analytique de la MSAP. Ce modèle permet la prise en compte des défauts d'excentricité. Ce défaut mécanique traduit par un entrefer variable dans l'espace et dans le temps est introduit à travers l'expression de la perméance. Pour détecter ce défaut par une grandeur externe mesurable, nous avons calculé la FEM induite par phase. Ce modèle complet sera appliqué sur une machine dan le prototype réel existe dan le prochaine.

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre du modèle électromagnétique de la MSAP développé dans le chapitre précédent, le modèle est appliqué sur une machine réelle, la FEM induite dans chaque phase de la machine sera calculée en tenant compte de l'effet d'un défaut d'excentricité.

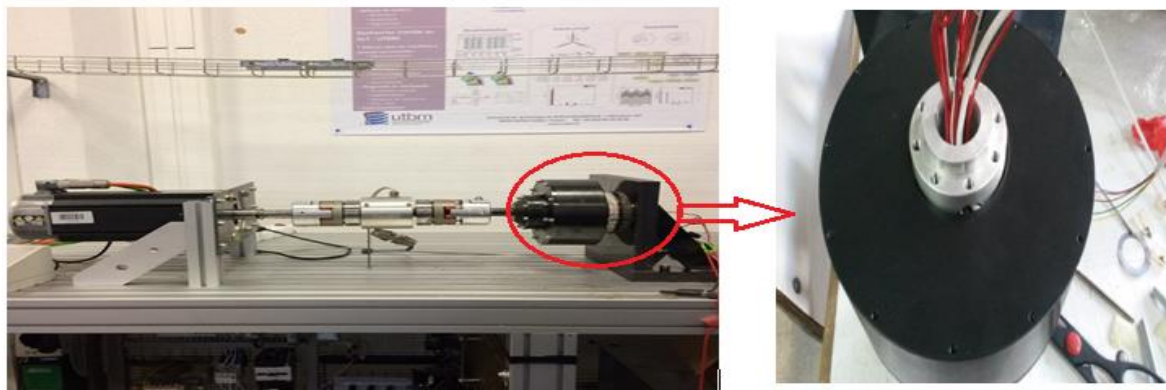
### III.1 Machine utilisée dans les simulations

Le modèle développé est appliqué à une machine réelle disponible au niveau du laboratoire Femto-ST de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard en France (voir figure (III-1)). Il s'agit d'une MSAP à aimants extérieur utilisée comme roue dans un véhicule électrique. Les paramètres physiques et géométriques de la machine sont montrés sur le tableau suivant :

Table III-1 Paramètres de la machine utilisée :

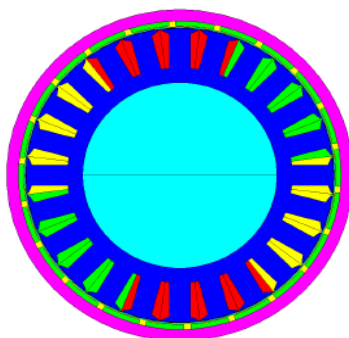
| <b>Stator</b>                        |             |               |
|--------------------------------------|-------------|---------------|
| <b>Diamètre extérieur</b>            | <b>[mm]</b> | <b>177.27</b> |
| <b>Diamètre intérieur</b>            | <b>[mm]</b> | <b>112</b>    |
| <b>Profondeur</b>                    | <b>[mm]</b> | <b>72</b>     |
| <b>Largeur de la dent</b>            | <b>[mm]</b> | <b>12</b>     |
| <b>Hauteur de l'encoche</b>          | <b>[mm]</b> | <b>47.67</b>  |
| <b>Rotor</b>                         |             |               |
| <b>Diamètre intérieur</b>            | <b>[mm]</b> | <b>183</b>    |
| <b>Diamètre extérieur</b>            | <b>[mm]</b> | <b>186</b>    |
| <b>Induction magnétique rémanent</b> | <b>[T]</b>  | <b>1.28</b>   |

**Tableau III.1** Paramètres du stator et rotor

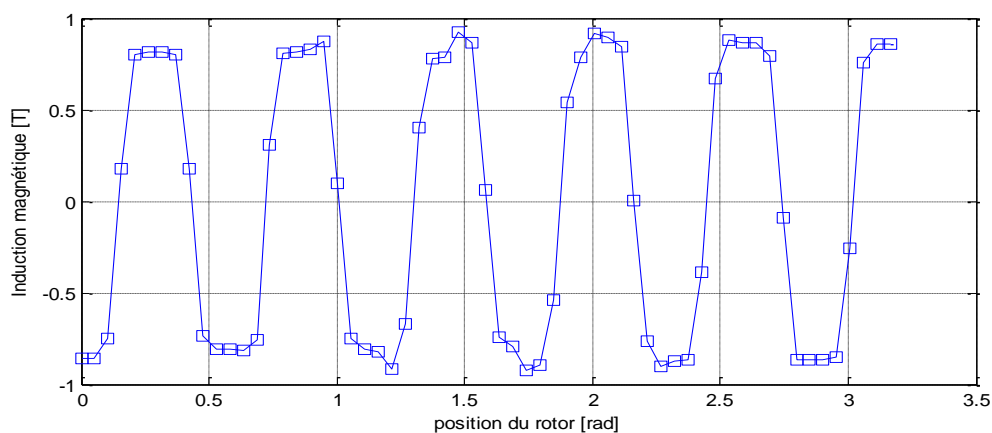


**Figure III.1** MSAP à aimants extérieur utilisée comme roue dans un véhicule électrique

Afin de valider le modèle analytique de deuxième chapitre, une modélisation par éléments finis en utilisant le logiciel FLUX a été effectuée. La figure suivante montre la géométrie de la MSAP.

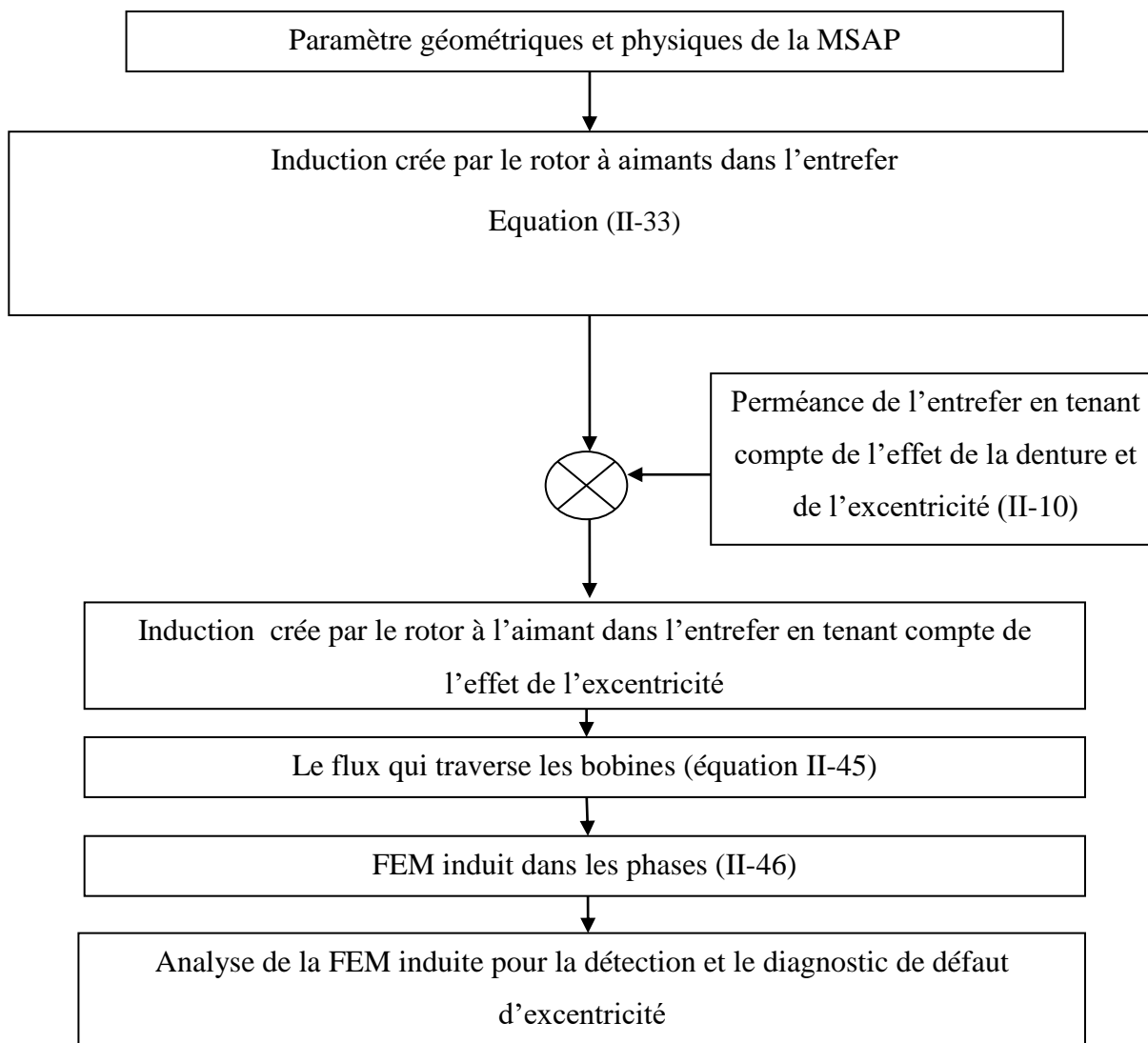


**Figure III.2** Géométrie de la MSAP modélisée par FLUX



**Figure III.3** Induction magnétique dans l'entrefer calculée par la MEF

Le diagramme suivant résume les étapes de calcul du modèle implémenté dans MATLAB. Le diagnostic est possible par une grandeur mesurable. Dans notre cas cette grandeur est la FEM induite par phase.



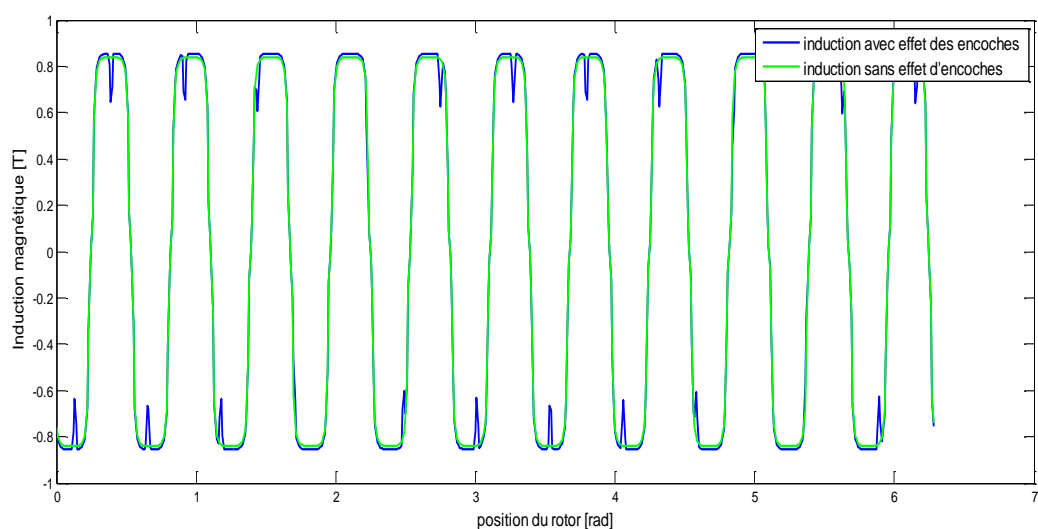
**Figure II.4** Les différentes parties du modèle analytique

## III.2 Résultats de simulation

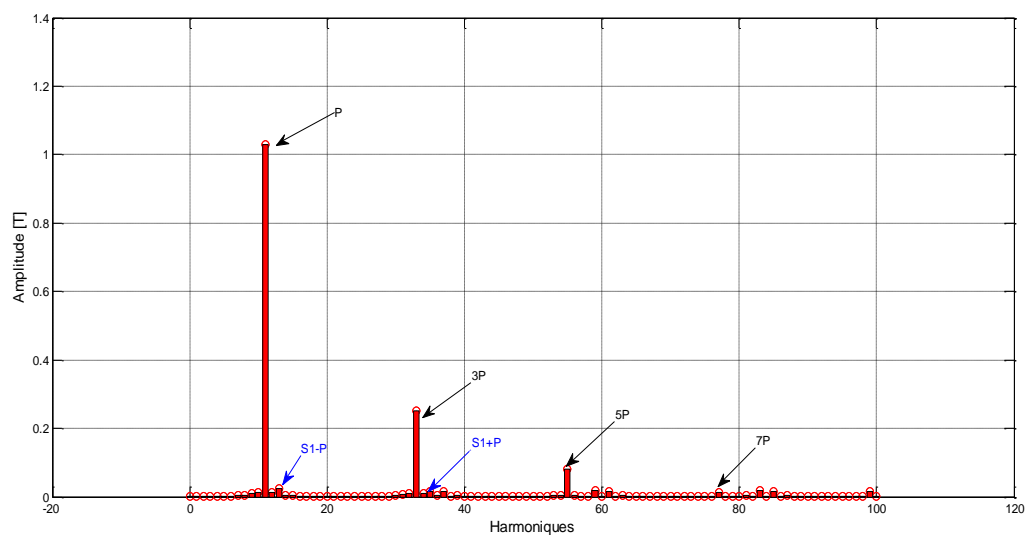
### III.2.1 Induction magnétique créée par le rotor à aimants dans l'entrefer de la machine dans l'état sain

Dans cette partie nous présentons les résultats de simulation de fonctionnement de la machine dans l'état sain. La figure (III.5) présente le profil de l'induction magnétique dans

l'entrefer de la machine et sa décomposition en harmoniques d'espace. On remarque la présence de l'effet des encoches. Cet effet n'est pas symétrique sur tous les pôles puisque le nombre d'encoches par pôle est un nombre fractionnaire. On remarque dans le spectre harmonique la présence d'harmonique multiple impair du nombre de pôles ainsi que des harmoniques liées au nombre d'encoches ( $s_1 \mp 1$ ).



(a)

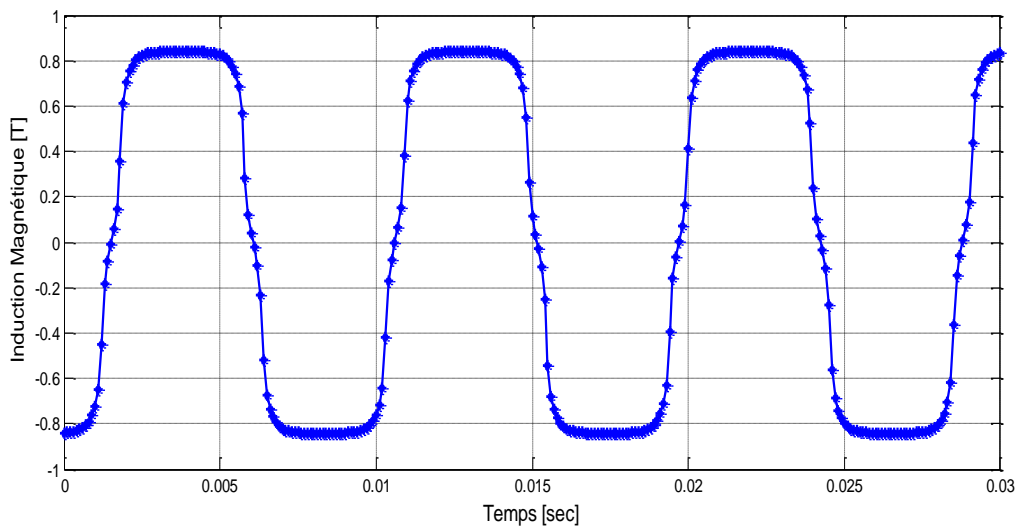


(b)

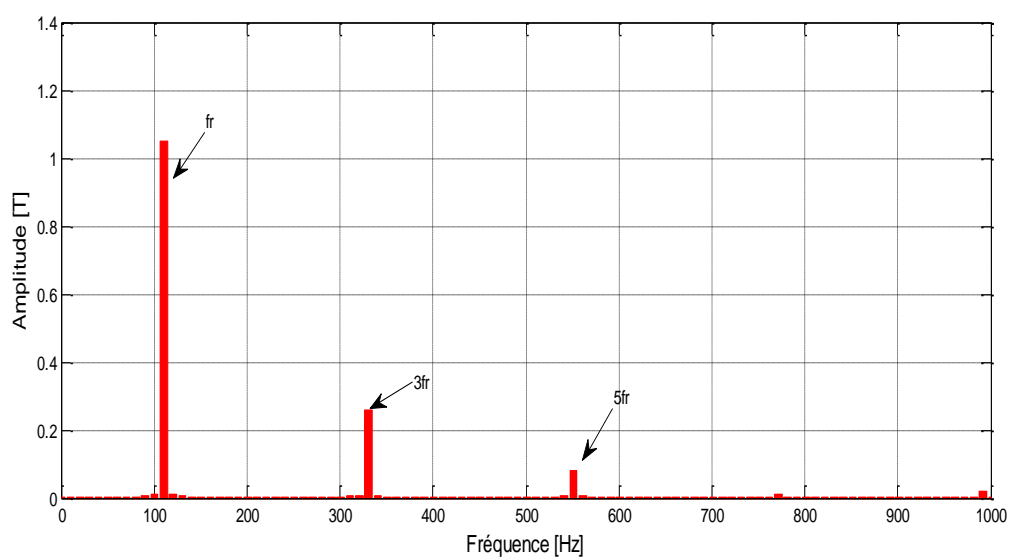
**Figure III.5** Variation spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine (a) (sans et avec effet des encoches) et sa décomposition de l'induction en harmoniques d'espace (b)



Nous avons aussi la variation temporelle de l'induction dans l'entrefer. On remarque la présence sur le spectre des harmoniques des présences multiples impair de la fréquence de rotation ( $f_r=110$  Hz).



(a)



(b)

**Figure III.6** Variation temporelle de l'induction créée par le rotor (a), et sa décomposition Fréquentielle (b)

### III.2.2 Induction magnétique créée par le rotor à aimants dans l'entrefer de la machine en présence d'un défaut d'excentricité

Dans cette partie nous introduisons un défaut d'excentricité statique du rotor. Le profil de l'induction dans l'entrefer de la MSAP en présence d'un défaut d'excentricité est montré sur la figure (III.7.a).

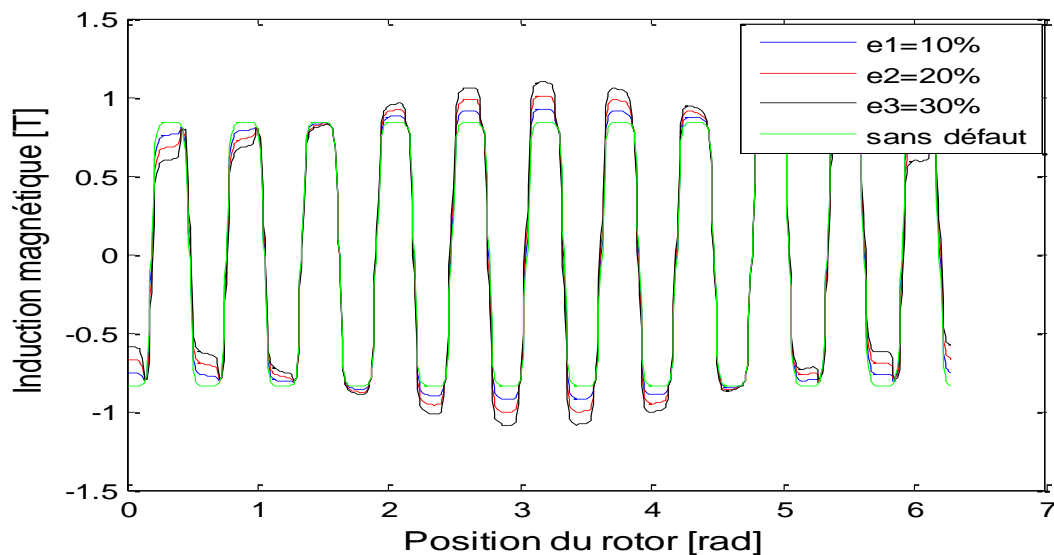


Figure III.7.a Variation spatiale de l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine pour différents niveaux d'excentricités (0%,10%,20% et 30 %)

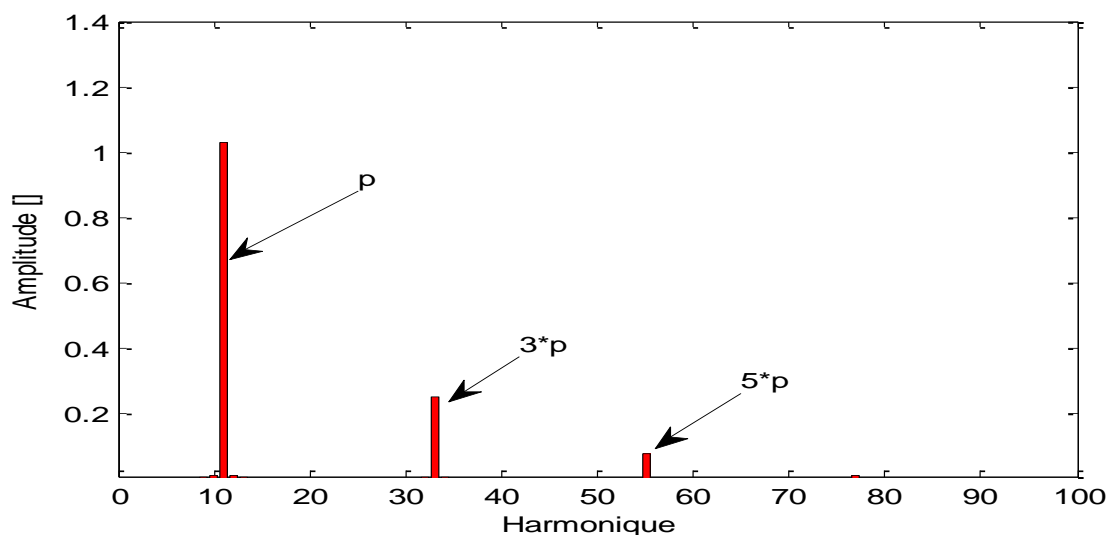
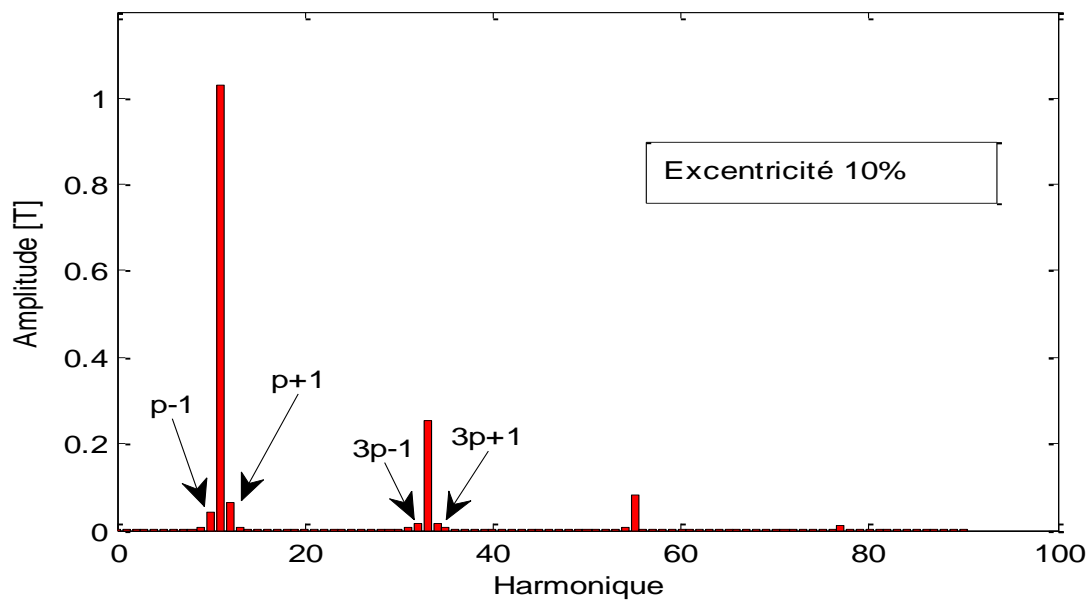
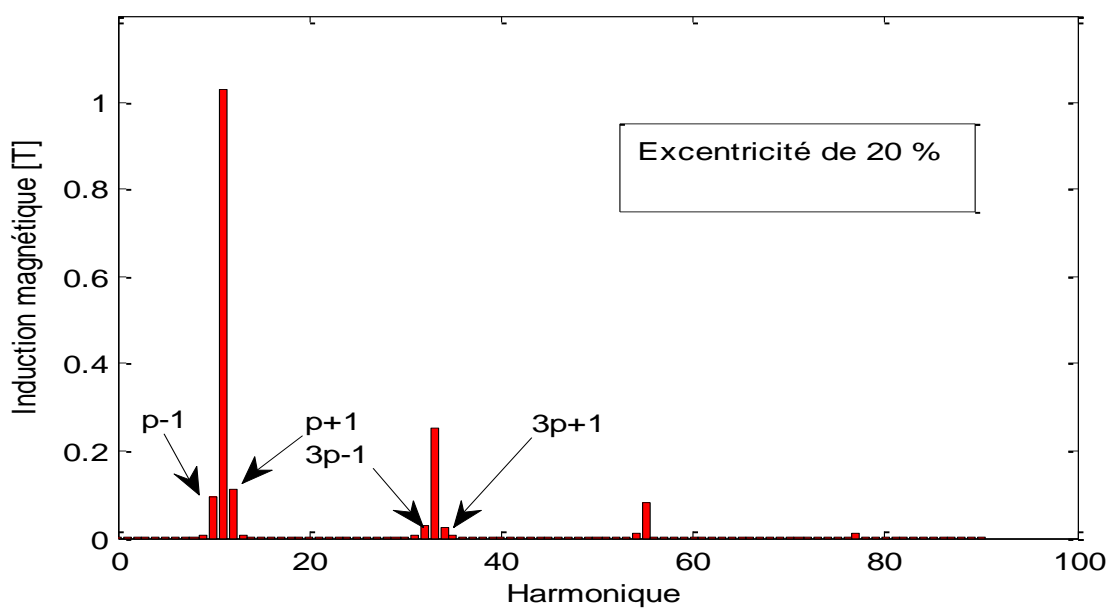


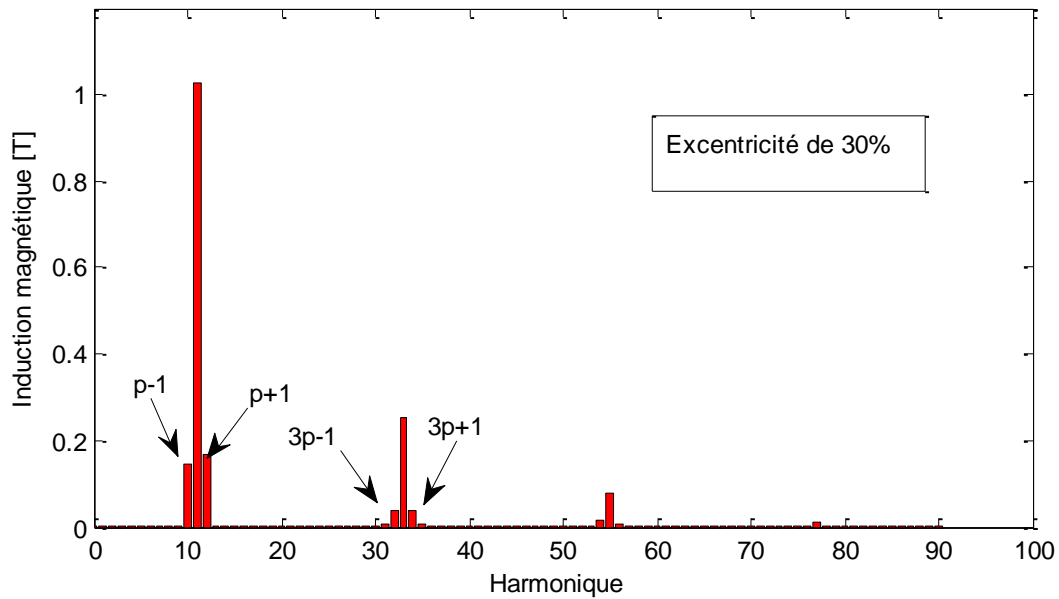
Figure III.7.b Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 0%)



**Figure III.8** Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 10%)



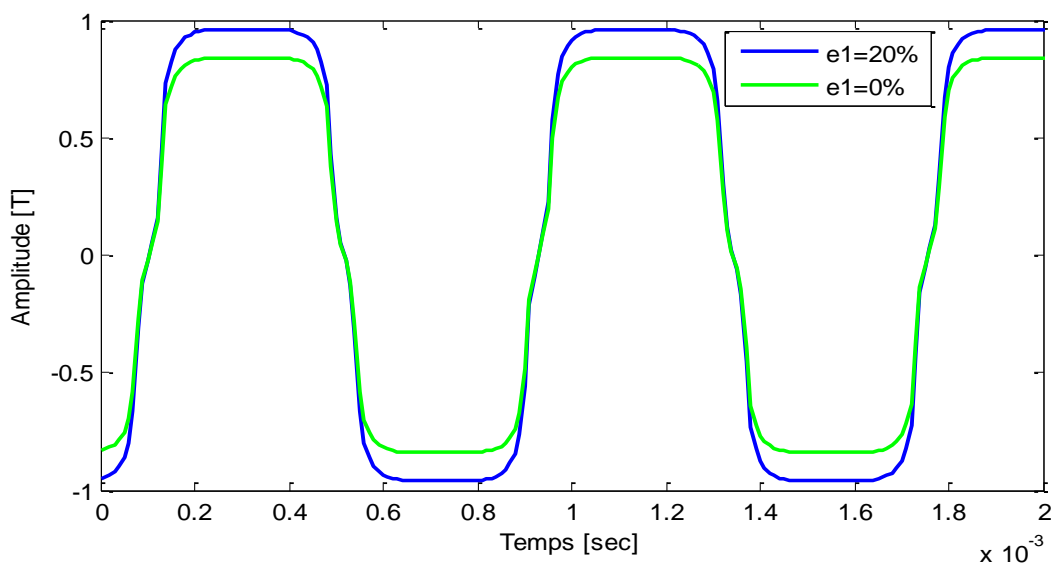
**Figure III.9** Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 20%)



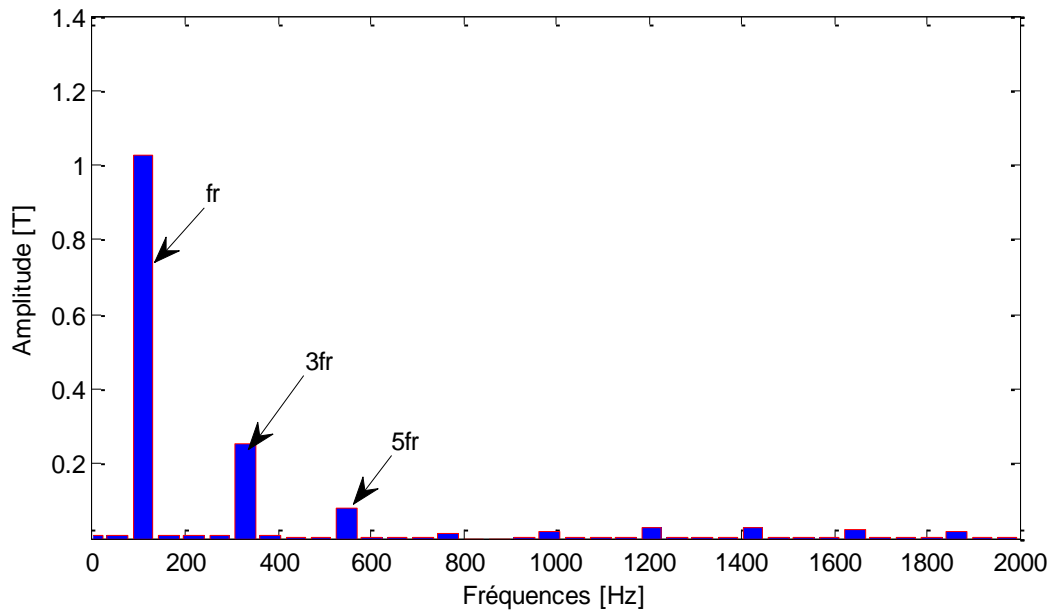
**Figure III.10** Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 30%)

On remarque que la présence d'un défaut d'excentricité statique est caractérisé par l'imergence de nouveaux harmoniques par rapport à l'état sain. Ces harmoniques sont  $kp \pm 1$  et que l'amplitude de ces harmoniques augmente avec l'augmentation de sévérité du défaut.

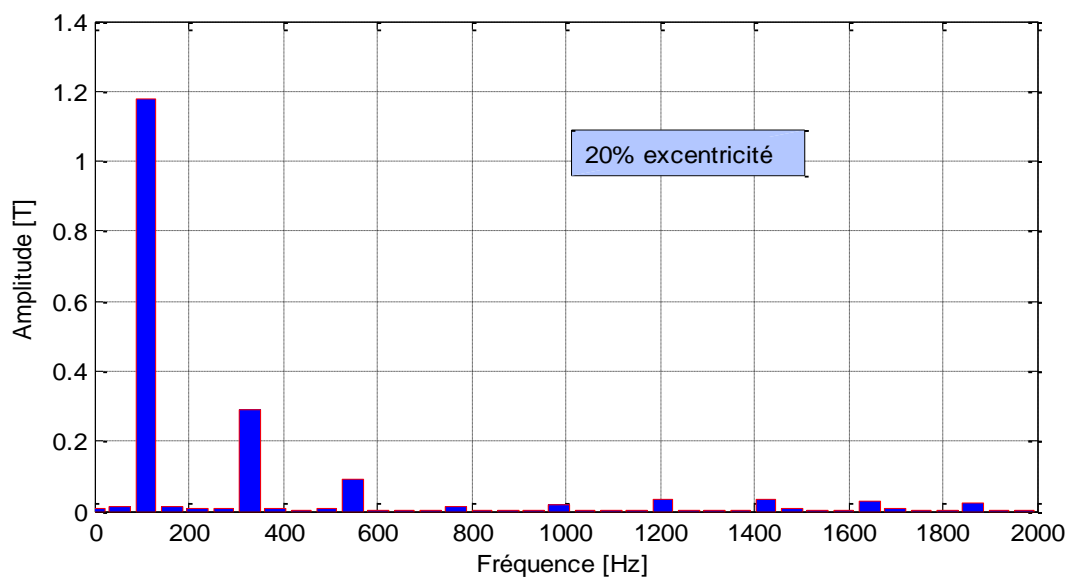
On s'intéresse maintenant à la variation temporelle de l'induction magnétique dans l'entrefer. Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous.



**Figure III.11** Variation temporelle de l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine dans l'état sain et la présence d'une excentricité



**Figure III.12** Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 0%)



**Figure III.13** Décomposition en harmoniques d'espace de l'induction magnétique (Excentricité 20%)

On remarque bien que le défaut d'excentricité statique ne provoque aucune signature fréquentielle au niveau de l'induction magnétique. Cela est dû au fait que dans le cas d'excentricité statique l'épaisseur de l'entrefer de la machine est variable dans l'espace et pas dans le temps. L'augmentation de la valeur de l'induction magnétique est expliquée par le fait que cette dernière est calculée dans un point où l'entrefer est réduit (voir équation II-1)

### III.3 FEM induite dans les phases du stator

Le diagnostic des défauts est simple lorsqu'il s'effectue avec des grandeurs accessibles et mesurables. Dans notre étude la détection d'un défaut d'excentricité est réalisée en inspectant l'allure de la FEM induite à vide (fonctionnement générateur).

#### III.3.1 Dans l'état sain du rotor (0% excentricité)

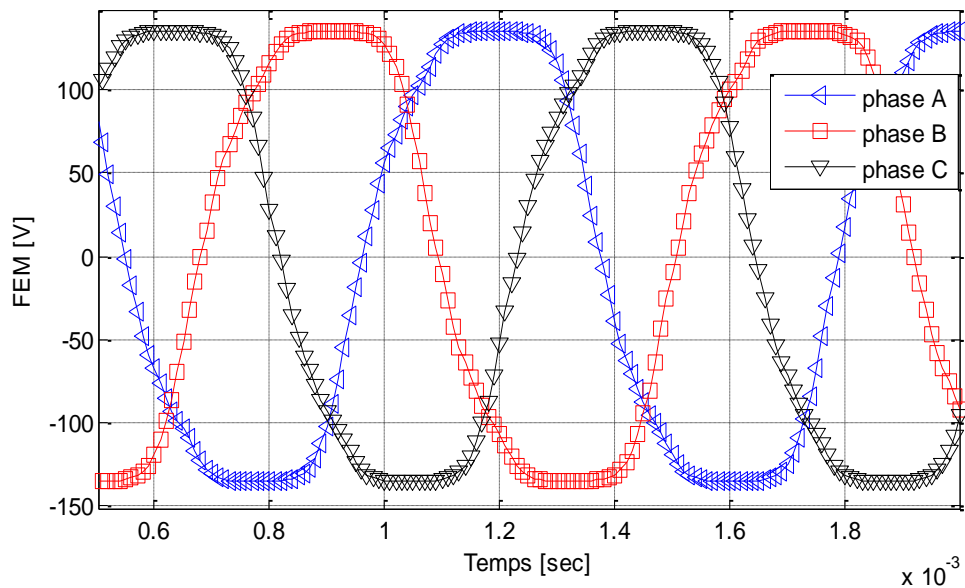


Figure III.14 FEM induite dans les phases de la MSAP

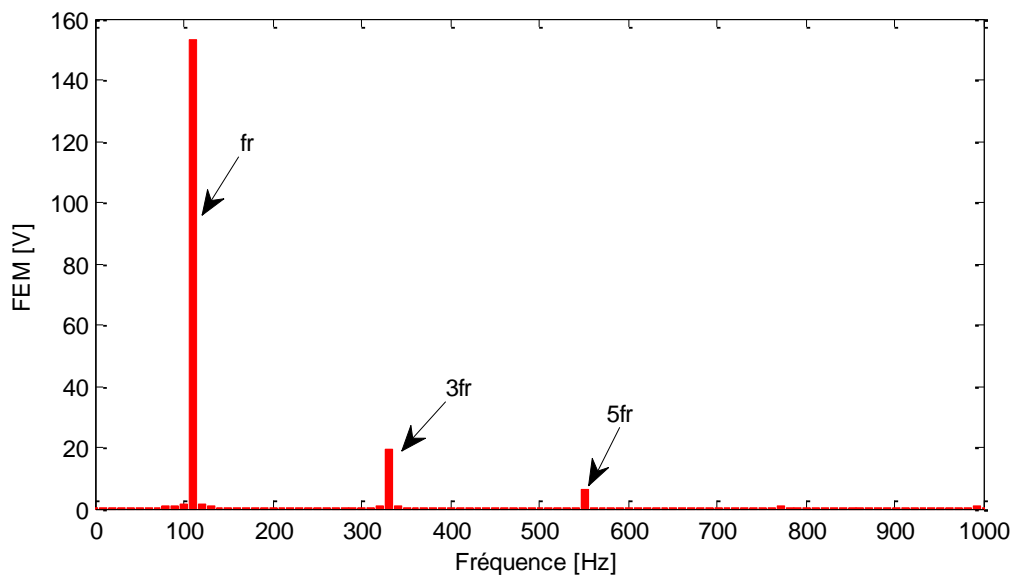
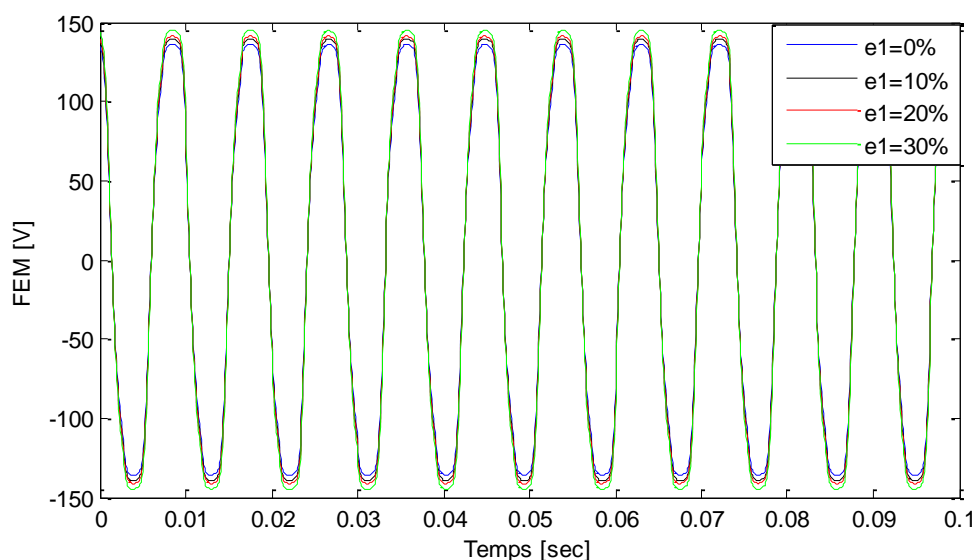


Figure III.15 Décomposition en harmoniques d'espaces de la FEM induite dans la phase A

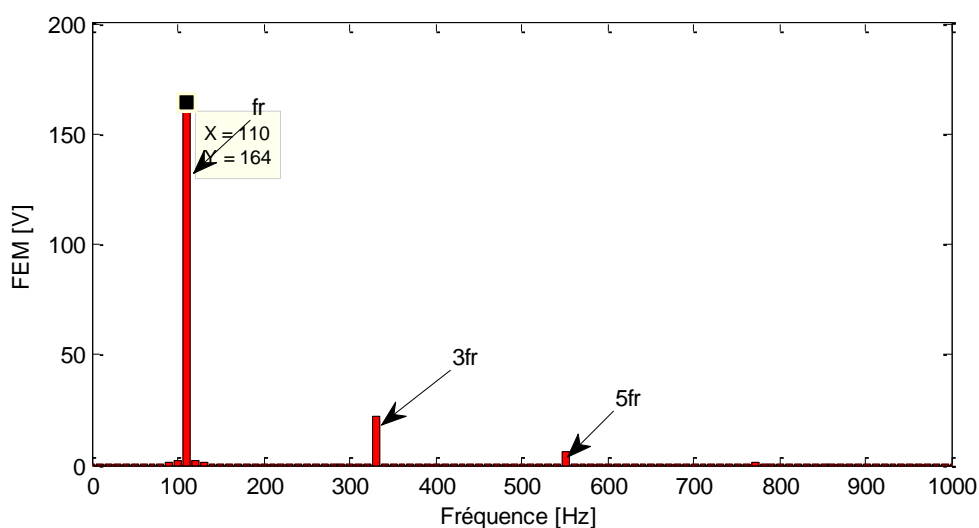
### III.3.2 Dans l'état defectueux du rotor (excentricité de 0% à 30 %)

Dans cette partie la FEM des phases est calculée pour différentes valeurs de l'excentricité (de 0% à 30%). Les résultats sont montrés sur la figure (III.16).



**Figure III.16** La FEM induite par phase pour différents niveaux d'excentricité statique

La décomposition en harmonique est présentée sur la figure (III.17)



**Figure III.17** Décomposition en harmonique de la FEM induite à 20% d'excentricité

Comme dans le cas de l'induction, la présence d'un défaut d'excentricité statique quelque soit son niveau ne conduit pas à la création d'harmoniques supplémentaires dans le spectre de la FEM. Par contre on remarque une augmentation de l'amplitude des harmoniques existantes dans l'état sain.

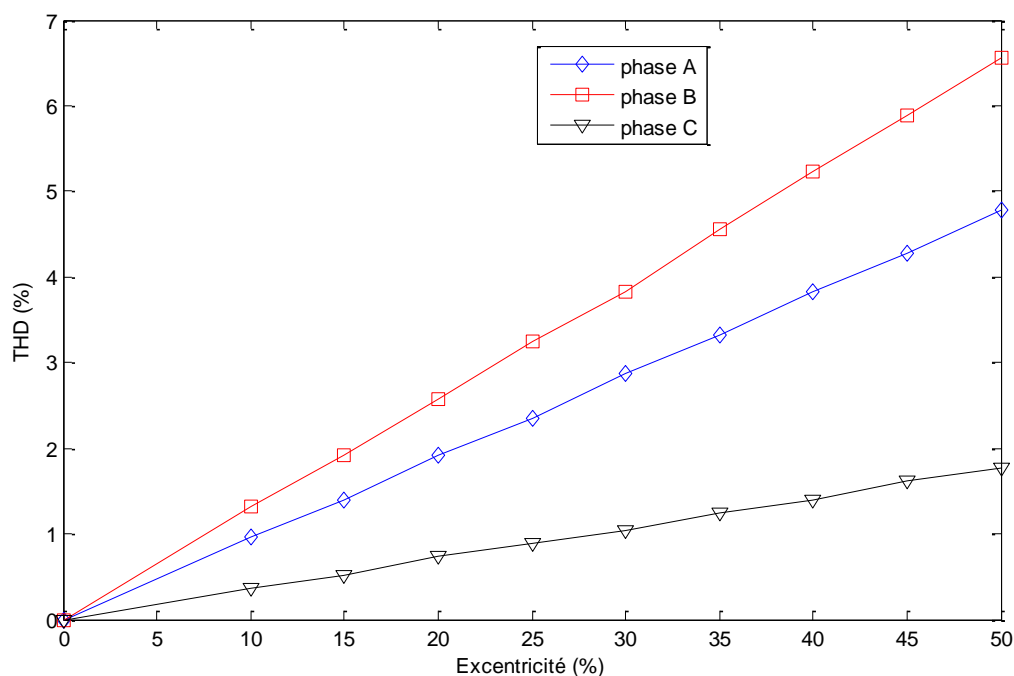
Pour détecter un défaut d'excentricité statique, nous avons utilisé un indicateur qui est le taux de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) calculé par cette expression :

$$THD = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

Avec  $V_h$  : l'amplitude des harmoniques

$V_1$  : l'amplitude du fondamental.

La variation du THD calculé pour le fondamental de la FEM pour plusieurs valeurs de l'excentricité du rotor est montré sur la figure (III.18)



**Figure III.18** Variation du THD en fonction de degré d'excentricité

A partir de la figure (Figure III.18), on peut tirer les remarques suivantes :



$THD_{B-\varepsilon}$  augmente rapidement par rapport à  $THD_{A-\varepsilon}$  et  $THD_{C-\varepsilon}$  par conséquent l'entrefer est étroit en face la phase A que en face la phase C. l'entrefer à proximité de la phase B est le plus étroit. Cela permet de localiser l'emplacement de l'entrefer minimal en connaissant la distribution du bobinage de la machine.

### Conclusion

Dans ce chapitre le modèle analytique dédié au diagnostic des défauts d'excentricité décrit dans le chapitre précédant à été mis en œuvre. L'analyse de l'induction magnétique créée dans l'entrefer permet de confirmer que l'excentricité statique dépend seulement de la variation spatiale de l'épaisseur de l'entrefer. Ce défaut est caractérisé par l'apparition d'harmoniques  $kp \pm 1$  dans le spectre de l'induction. Par contre aucune signature fréquentielle n'a été détectée. Puisque la détection et le diagnostic des défauts doivent être effectués par des grandeurs accessibles est mesurable, donc nous avons utilisée dans ce travail la FEM induite pour détecter le défaut. Comme pour l'induction magnétique, la présence d'un défaut d'excentricité statique ne conduit à aucune signature particulière au niveau du spectre de la FEM induite par phase. Par contre, nous avons remarqué que l'amplitude des harmoniques est affectée. Cela nous a encouragé à inspecter le taux de distorsion harmonique (THD) de la FEM. Ce qui permet de détecter le niveau d'excentricité et aussi l'emplacement de l'entrefer minimal.

## CONCLUSION GENERALE ET PRESPECTIVES

Dans ce travail nous avons abordé la détection et le diagnostic des défauts dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Nous sommes focalisés sur les défauts d'excentricité. Ce défaut qui est dû principalement à un mauvais positionnement de l'axe de rotation du rotor par rapport à celui du stator pendant le montage de la machine provoque des vibrations importantes et émission du bruit. Cela influe sur l'utilisation de ces machines dans des applications où le confort est exigé comme dans le cas des véhicules électriques.

Après définition de la MSAP et son principe de fonctionnement, nous avons abordé les différents défauts dans les machines électriques. L'accent a été mis beaucoup plus sur les défauts d'origine mécanique et particulièrement les défauts d'excentricité du rotor.

Un modèle analytique qui tient en compte des défauts d'excentricité est développé dans ce travail. Le défaut est introduit à travers l'expression de la perméance de l'entrefer. Ce modèle permet de calculer l'induction magnétique dans l'entrefer de la machine ainsi que le flux qui traverse les bobines du stator et la FEM induite par phase. Cette dernière qui est une grandeur mesurable et utilisée pour la détection des défauts d'excentricité.

Le modèle développé est appliqué sur une machine réelle disponible au niveau de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard est validé par une modélisation par MEF en utilisant le logiciel FLUX.

Nous avons remarqué que la décomposition en harmoniques de la FEM induite en présence de défaut quelque soit son degré ne contient aucune signature fréquentielle particulière malgré les variations au niveau de l'amplitude des harmoniques existantes. Nous avons calculée donc pour la détection du défaut, le taux de distorsion harmonique (THD). Nous avons remarqué que ce dernier augmente en fonction de degré d'excentricité et que cette augmentation est rapide pour certaines phases par rapport à d'autres. Cela permet de détecter le niveau d'excentricité et localiser la position de l'entrefer minimal.

En perspective, nous espérons dans les futurs travaux introduire la FEM induite en cas de défaut dans un modèle dynamique de la machine pour une détection en temps réelle du défaut.

- [1] **M.D. Bidart**. « Commande Coopérative Des Systèmes Mono convertisseurs Multimachines Synchrones », Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011.
- [2] **T. Zidelmal**. «Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : application dans aérogénérateurs », mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université du Québec, Avril 2015.
- [3] **N. Senhadij, A.Chalabi** «Commande du moteur synchrone à aimants permanent par Backstepping» mémoire de master, université abou bekr belkaid, 14 juin 2015.
- [4] **M.Bardadi bendaha** «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel», Magistère, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 04 février 2015.
- [5] **J.A Farooq**, « Etude de problème inverse en électromagnétique, en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanent», Thèse de Doctorat, Université de Technologies Belfort Montbéliard, France, 5 décembre 2008.
- [6] **Ali Ibrahim**, « Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée», thèse de Doctorat, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2009.
- [7] **A .CEBAN** « Méthode globale de diagnostic des machines électriques», thèse de doctorat, Université Lille, 2 février 2012.
- [8] Le guide de l'alignement d'arbres, [www .pruftechnik.com](http://www.pruftechnik.com).
- [9] **A. Rezig**, «Analyse tridimensionnelle des phénomènes vibratoire dans les machines électriques», Thèse de Doctora en sciences université de Batna, 05 Mai 2011.
- [10] Advanced Manufacturing Office Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy Washington, [manufacturing.energy.gov](http://manufacturing.energy.gov).
- [11] **M.Karami, N.Mariun, M. Rezazadeh Mehrjou, M. Ab Kadir, Norhisam Mison, Mohd Amran Mohd Radzi** «Static Eccentricity Fault Recognition in Three-Phase Line Start

Permanent Magnet Synchronous Motor Using Finite Element Method» Université Putra Malaysia, Published 24 November 2014.

[12] **B.VASEGHI** «Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre -spires», thèse de Doctora, L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 3 décembre 2009.

[13] **A.Chaib, B. Azeddine** «Détection et caractérisation des roulements par l'analyse spectrale», Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2015.

[14] **K.Alameh** «Contribution au diagnostic et à l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Doctora, l'Université de Rouen Normandie, 20 Décembre 2017.

[15] **T.Harris**, *Bearing analysis*, 4th edition, Wiley Intersciences, New York 2001.

[16] **Z.Sara** « Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées», Magister, Université, Biskra, 2015.

[17] **G.Mehta, B. Singh, M. Manna**, Electrical Engineering Department, M-Tech Student, International Journal of Research in Computer and Communication Technology, May-2013.

[18] **N. JERANCE** «Réseaux de reluctances et diagnostic des machines électriques», Thèses de Doctorat, l'institut National Polytechnique De Grenoble, le 14 Novembre 2002.

[19] **A.Rezig, M.R.Mékideche, N.Ikhlef**, Effect of Rotor Eccentricity on Magnetic noise in Induction Motors. Journal of Electrical Engineering, Vol 8, No1, 2008.

[20] **A.Rezig,,J.A.Farooq, M.R.Mekideche,A.Djerdir and A.Miraoui**, Modeling and Detection of Eccentricity Fault by Radial Force and Vibration Behavior in a Permanent Magnet Synchronous Machine, in Series : Studies in applied electromagnetic and mechanics, Vol 34, 2010, edited by IOASpress, Netherlands.

[21] **Z.Q. Zhu and D. Howe**, Analytical Prediction of the Cogging Torque in Radial-Field Permanent Magnet Brushless Motors, IEEE Transaction onMagnetics, Vol. 28, N0.2, March 1992.



