

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique

Université de Jijel



Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

**Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique**

Option: Electrotechnique Industrielle

Thème

***Modélisation et diagnostic des
défaillances d'une MAS par analyse de
ses grandeurs électromagnétiques***

Encadré par:

Dr: N.Hacib-Ferkha

Réalisé par:

Safia Ferkha

Zineb Belkhelfa

Année universitaire 2017/2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a éclairé le bon chemin.

*Nous tenons à remercier très vivement Notre encadreur
Dr N-Hacib-Ferkha qui est un potentiel infini pour les conseils
avisés et l'encouragement constant.*

*Nos vifs remerciements s'adressent aussi à toutes les promotions
2ième année Master du département d'électrotechnique.*

*Enfin Nous associons nos remerciements à toute personne d'étant
montré coopérant de près ou de loin à la réalisation de ce
mémoire de fin d'études.*

*Ainsi qu'à tous les enseignants qui ont contribué à notre
formation.*



Safia et Zineb

Dédicace

*De tous nos cœurs, nous dédions ce
modeste travail:*

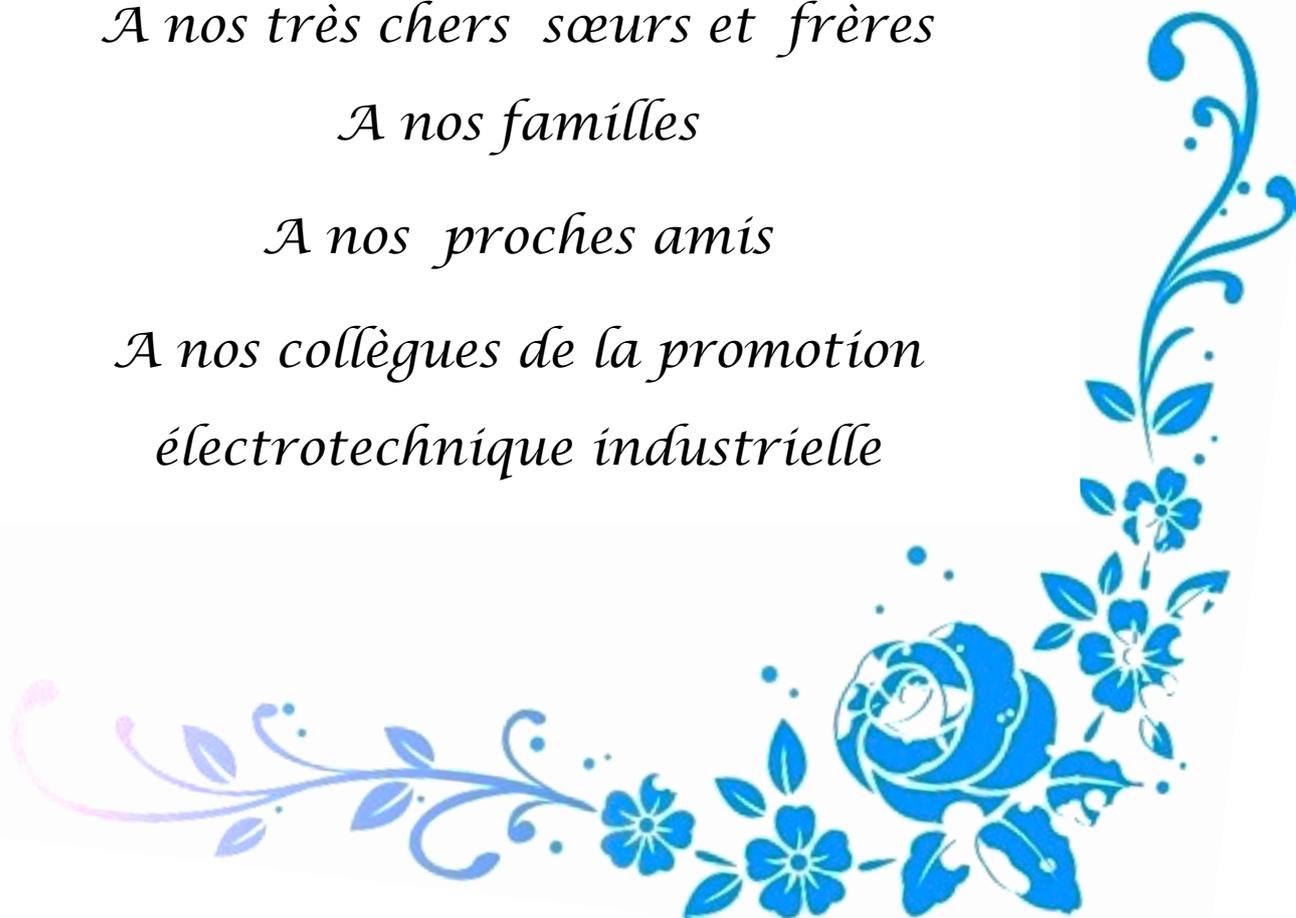
*A nos très chères mères sources de
tendresse*

*A nos très chers pères, qui nous
encouragent*

*A nos très chers sœurs et frères
A nos familles*

A nos proches amis

*A nos collègues de la promotion
électrotechnique industrielle*



Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I

Défaillances des machines asynchrones

Introduction..... 3

I.1. C'est quoi une machine asynchrone..... 3

I.2. Constitutions et principe de fonctionnement d'une MAS..... 4

 I. 2.1. Constitution d'une MAS.....4

 I.2.1.1. Description du stator..... 4

 I.2.1.2. Description du rotor..... 5

 I.2.1.3. Roulements..... 6

 I.2.2. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....7

I.3. Défaillances des machines asynchrones..... 8

 I.3.1. Statistiques des défaillances dans les MAS..... 8

 I.3.2. Classification des défaillances dans les machines électriques..... 9

 I.3.3. Origines et causes des défaillances dans les MAS.....10

 I.3.3.1. Défaillances dues au réseau d'alimentation..... 10

 I.3.3.2. Défaillances d'ordre mécanique..... 10

 I.3.3.3. Défaillances d'ordre électrique..... 12

 I.3.3.4. Défaillances d'autres origines..... 18

Conclusion.....20

Chapitre II

Modélisation électromagnétique

Introduction..... 21

II.1.Intérêt du calcul du champ électromagnétique..... 21

II.2.Calcul du champ électromagnétique..... 22

 II.2.1. Equations de Maxwell..... 22

 II.2.2. Lois de comportement des milieux..... 23

 II.2.2.1. Relation magnétique..... 23

 II.2.2.2. Milieu conducteur: Loi d'ohm..... 24

 II.2.2.3. Comportement diélectrique..... 24

 II.2.3. Conditions de passage entre deux milieux différents..... 25

 II.2.4. Hypothèses simplificatrices..... 26

II.2.5. Problème électromagnétique.....	26
II.2.6. Formulations électromagnétiques.....	27
II.2.6.1. formulation magnétodynamique.....	27
II.3. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles.....	31
II.3.1. Méthodes analytiques.....	31
II.3.2. Méthodes semi-analytiques.....	31
II.3.2.1. Méthode des intégrales des frontières (MIF).....	31
II.3.2.2. Méthode des circuits couplés (MCC).....	31
II.3.3. Méthodes numériques.....	32
II.3.3.1. Méthode des différences finies (MDF).....	32
II.3.3.2. Méthode des volumes finis (MVF).....	32
II.3.3.3. Méthode des éléments finis (MEF).....	32
Conclusion.....	35

Chapitre III

Diagnostic de la machine asynchrone

Introduction.....	36
III.1. Diagnostic appliqué aux systèmes industriels.....	36
III.2. Diagnostic appliqué aux machines électriques.....	38
III.2.1. Recherche indispensable des symptômes.....	38
III.3. Méthodes de diagnostic des machines électriques.....	39
III.3.1. Méthodes de connaissances.....	40
III.3.2. Méthodes de redondances analytiques.....	40
III.3.3. Méthodes par modélisation de signaux.....	40
III.4. Types de grandeurs à analyser.....	41
III.5. Techniques de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones.....	41
III.5.1. Techniques mécaniques.....	42
III.5.1.1. Diagnostic par mesure des vibrations.....	42
III.5.1.2. Diagnostic par mesure de température.....	43
III.5.2. Diagnostic chimiques.....	44
III.5.2.1. Diagnostic par l'analyse des lubrifiants.....	44
III.5.3. Techniques magnétiques et électriques.....	45
III.5.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial.....	45

III.5.3.2. Diagnostic par l'analyse du courant statorique.....	47
III.6. Techniques de traitement du signal.....	48
III.6.1. Analyse temporelle.....	48
III.6.2. Analyse fréquentielle.....	48
III.6.3. Analyse temps-fréquence.....	48
III.6. Quelques fréquences caractéristiques de quelques défauts.....	49
III.6.1. Défauts du stator.....	49
III.6.2. Défauts du rotor.....	49
III.6.2.1. Détection d'une barre cassée.....	49
III.6.2.2. Indicateurs d'excentricité.....	49
III.6.3. Défauts de roulements.....	49
Conclusion.....	51

Chapitre IV

Diagnostic des défauts d'une MAS à cage d'écureuil

Introduction.....	52
VI.1. Objectif de l'étude.....	52
VI. 2. Description de la machine étudiée.....	52
IV.2.1. caractéristiques géométrique.....	53
IV.2.2. Caractéristique physiques.....	54
IV.3. Modélisation de la MAS à pas raccourci.....	55
IV.3.1. Discussion et interprétation des résultats.....	58
IV.4. Diagnostic des défaillances de la MAS.....	61
IV.4.1. Diagnostic par analyse du flux magnétique.....	61
IV.4.1.1. Défaut de rupture des barres rotoriques.....	62
IV.4.1.2. Défaut d'excentricité.....	65
IV.4.1.3. Défaut de court-circuit.....	69
IV.4.2. Diagnostic par analyse des courants de barres rotoriques.....	70
Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72

Liste des figures

Figure I.1. Machine asynchrone.....	3
Figure I.2. Construction d'une machine asynchrone.....	4
Figure I.3. Stator du moteur asynchrone.....	5
Figure I.4. Rotor bobiné.....	6
Figure I.5. Rotor à cage d'écureuil.....	6
Figure I.6. Roulements à billes.....	7
Figure I.7. Pourcentage des défauts dans les parties de la MAS.....	8
Figure I.8. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances et dans les machines de fortes puissances.....	9
Figure I.9. Roulements sains et défectueux	11
Figure I.10. Défauts des enroulements statoriques.....	14
Figure I.11. Différents défauts au niveau du stator de la machine asynchrone.....	15
Figure I.12. Défaut de rupture des barres.....	16
Figure I.13. Rupture d'anneau de court-circuit.....	17
Figure I.14. Défauts d'excentricité.....	18
Figure I.15. Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant.....	20
Figure II.1. Domaine d'étude avec deux milieux différents M1 et M2.....	25
Figure II.2. Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique.....	27
Figure II.3. Diagramme de Toni.....	28
Figure II.4. Domaine d'étude borné.....	30
Figure II.5. Éléments classiques en une et deux dimensions.....	33
Figure III.1. Les différentes grandeurs de diagnostic dans une machine.....	22
Figure III.2. MAS avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique.....	23
Figure III.3. Capteur de température dans une plaque à bornes.....	24
Figure III.4. Image colorée infrarouge thermique.....	25
Figure III.5. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial.....	26
Figure III.6. Flux de dispersion.....	27
Figure III.7. Champs radial et axial dans la MAS.....	28
Figure III.8. Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique.....	29
Figure IV.1. Vue éclatée de la MAS à étudier.....	53

Figure IV.2. Différentes régions constituant la MAS à étudier.....	54
Figure IV.3. Bobinage de la MAS à étudier.....	55
Figure IV.4. Courbe caractéristique B(H) du matériau M800-65A constituant les circuits magnétiques statorique et rotorique.....	55
Figure IV.5. Organigramme du code de calcul électromagnétique développé.....	56
Figure IV.6. Configuration géométrique de la machine étudiée.....	57
Figure IV.7. Maillage éléments finis adopté à cette étude.....	57
Figure IV.8. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique A.....	58
Figure IV.9. Evolution du potentiel vecteur et des composantes de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer.....	59
Figure IV.10. Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer.....	60
Figure IV.11. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer.....	60
Figure IV.12. Procédure du diagnostic des défauts dans une MAS par analyse du flux Magnétique.....	61
Figure IV.13. Géométrie de la MAS avec rupture d'une seule barre.....	62
Figure IV.14. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer avec rupture d'une seule barre.....	62
Figure IV.15. Contenu spectral du flux dans l'entrefer avec rupture d'une seule barre.....	63
Figure IV.16. Géométrie de la MAS avec rupture de neuf barres.....	63
Figure IV.17. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer avec rupture de neuf barres.....	64
Figure IV.18. Contenu spectral du flux magnétique, avec rupture de neuf barres.....	64
Figure IV.19. Excentricité statique.....	65
Figure IV.20. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer en présence d'une excentricité statique.....	66
Figure IV.21. Contenu spectral du flux en présence d'une excentricité statique.....	66
Figure IV.22. Positions du rotor par rapport au stator pour trois temps différents.....	67
Figure IV.23. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer en présence d'une excentricité dynamique.....	68
Figure IV.24. Contenu spectral du flux magnétique en présence d'une excentricité dynamique...	69
Figure IV.25. Spectres fréquentiels du flux magnétique dans les deux cas: court-circuit entre phases et court-circuit entre spires d'une même phase.....	69

Liste des tableaux

Tableau I.1. Défaillances des machines électriques.....	9
Tableau III.1. Pannes types observées sur un moteur.....	39
Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine à étudier.....	53
Tableau IV.2. Courants dans les barres en présence d'une excentricité dynamique.....	70
Tableau IV.3. Courants dans les barres en présence d'un court-circuit.....	70

Introduction Générale

Introduction générale

La machine asynchrone (MAS), connue également sous le terme «anglo-saxon» de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Son invention est attribuée à Nicolas Tesla en 1887. En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé et à cage d'écureuil, construit industriellement à partir de 1891 [1].

Les machines asynchrones couvrent actuellement l'essentiel des besoins de transformation d'énergie électrique en énergie mécanique et le progrès technique dans certains secteurs consiste à évoluer des technologies de machines à courant continu et synchrones vers celles des machines asynchrones [2]. Dans les pays industrialisés, plus de soixante pour cent de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs asynchrones [3].

Actuellement, les machines asynchrones sont considérées comme l'outil de conversion électromécanique le plus utilisé dans le milieu industriel. Cet engouement pour ce type de machine est justifié par sa simplicité de construction, son faible coût d'achat et sa robustesse mécanique. Des applications de la machine asynchrone à vitesses variables, ont vu le jour dans divers domaines en l'occurrence l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision. Toutefois, cette machine peut être affectée par des défauts potentiels qui se répercutent sur la sécurité de la production, la qualité du service et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des systèmes de diagnostic pour détecter de manière anticipée les défauts pouvant surgir dans ce type de machines [4].

L'apparition d'un défaut conduit, le plus souvent, à un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone entraînant, en conséquence, un coût de réparation non négligeable pour l'entreprise (cas des machines de fortes puissances) sans oublier la perte de production occasionnée. Dans le domaine nucléaire, par exemple, il est indispensable d'assurer la sécurité des personnes et du matériel car aucun système, qu'il soit simple ou complexe, n'est à l'abri d'un dysfonctionnement.

En effet, malgré sa robustesse légendaire, la machine asynchrone triphasée subit, au cours de sa durée de vie, un certain nombre de sollicitations externes et internes qui la rendent, potentiellement, défaillante. Malgré, l'augmentation croissante des exigences industrielles en

termes de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, il était important de disposer d'un certain nombre d'outils et de techniques permettant de diagnostiquer l'état de la machine. Ces outils de diagnostic sont basés sur la détection de la signature des défauts au niveau des grandeurs mesurables habituelles dans l'industrie (grandeurs électriques statoriques) soit, par le biais de l'analyse du contenu harmonique de ces grandeurs soit encore, par le biais de l'observation comportementale de la machine.

Dans ce travail de fin d'études, on va s'intéresser à la modélisation et au diagnostic d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Pour bien présenter cette étude, ce mémoire va être divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons passer en revue la notion principale d'une machine asynchrone ainsi que sa constitution et son principe de fonctionnement. De plus, on va présenter tous les défauts qui peuvent survenir dans ce type de machines.

Le deuxième chapitre va être consacré à la présentation des lois générales utilisées pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques dans les dispositifs électromagnétiques, ainsi qu'à la présentation des principales formulations mathématiques régissant ces dispositifs. De plus, une exposition des différentes méthodes de résolution de ces formulations va être effectuée. On va viser, plus particulièrement, la méthode des éléments finis, son principe et son emploi en électrotechnique pour la modélisation des dispositifs électromagnétiques.

Le troisième chapitre a pour objectif de présenter les techniques principales de diagnostic des machines asynchrones. De plus, on va donner un aperçu sur les techniques du traitement de signal employées dans ce domaine.

Dans le dernier chapitre, on va exploiter les modèles développés pour la modélisation et le diagnostic d'une MAS à cage d'écureuil, à pas raccourci. Les résultats obtenus vont être présentés dans les deux cas: machine saine et défectueuse.

Enfin, on va clôturer ce travail par une conclusion et des perspectives.

Chapitre I

Défaillances des Machines Asynchrones

Chapitre I

Défaillances des machines asynchrones

Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter, dans un premier temps, la machine asynchrone (MAS) par la voie de notions élémentaires liées à sa constitution et à son fonctionnement. Dans un second temps, on va s'intéresser à la présentation des différents défauts de la machine asynchrone ainsi que leur origine.

I.1. C'est quoi une machine asynchrone?

Une machine asynchrone (MAS) est une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui a 2 enroulements dont un seul (le primaire) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω , alors que la 2^{ième} (le secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques [5]. Généralement, ce type de machines est plus utilisé en moteur asynchrone (en triphasé).

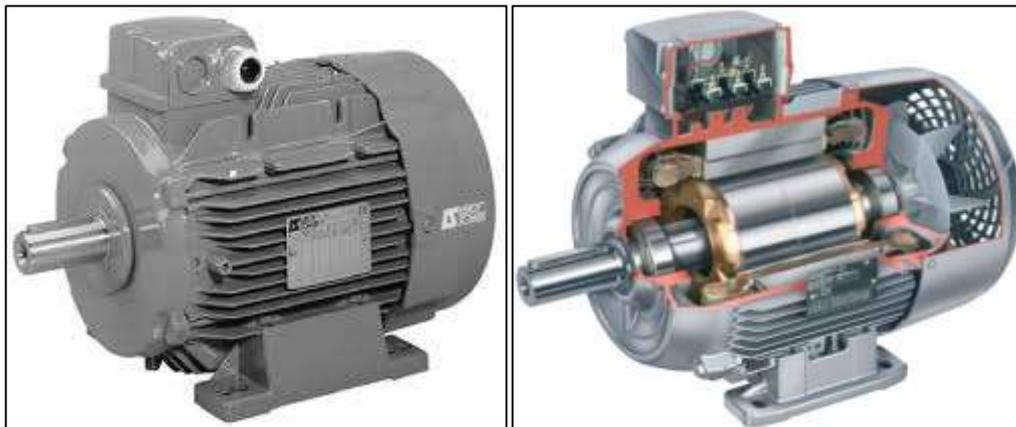


Figure I.1. Machine asynchrone

Cette machine est réversible et susceptible de se comporter, selon la source d'énergie, soit en « moteur » soit en « générateur », dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

I.2. Constitution et principe de fonctionnement d'une MAS

On se propose, dans cette section, de rappeler brièvement la constitution ainsi que le principe de fonctionnement de la machine asynchrone. Cette description va nous permettre de mieux appréhender les défauts qui peuvent survenir dans ce type de machines.

I.2.1. Constitution d'une MAS

Les machines asynchrones peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes (figure I.2) [6]:

- Le stator: partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique,
- Le rotor: partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique,
- Les paliers: partie mécanique qui permet la mise en rotation de l'arbre du moteur.

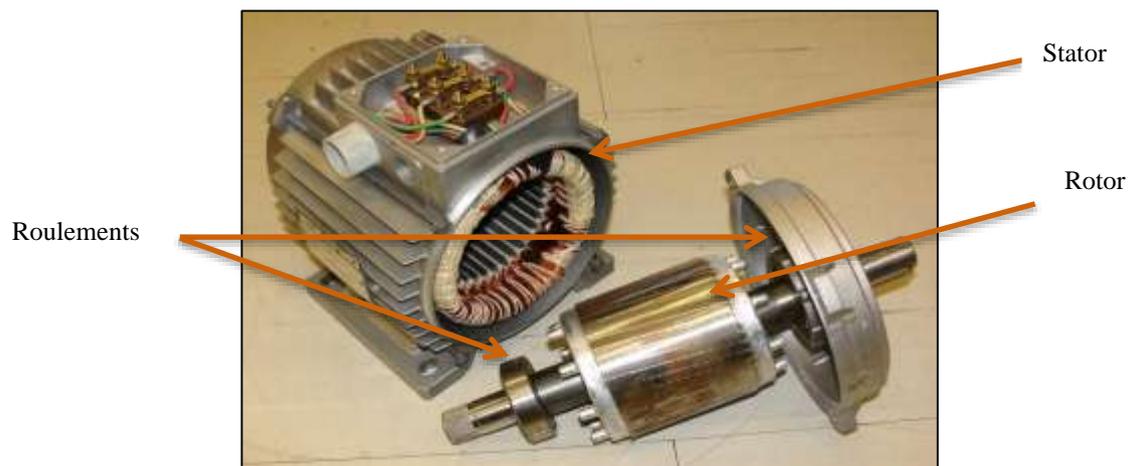


Figure I.2. Constitution d'une machine asynchrone

I.2.1.1. Description du stator

Les différents types de machines asynchrones ne se distinguent que par le rotor; dans tous les cas le stator reste, au moins dans son principe, le même. Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles ferromagnétiques dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine. Une vue éclatée du stator est donnée par la figure ci-dessous.

Le stator d'une machine asynchrone, appelé aussi primaire, est composé de $3p$ bobines alimentées par un système de tensions triphasées de fréquence f [7]. Ces $3p$ bobines créent, dans l'entrefer, un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme Ω_s qui est donnée par l'expression ci-dessous:

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{I.1})$$

Avec:

Ω_s : vitesse de synchronisme en rad/s,

ω : pulsation des tensions triphasées (des courants triphasés) en rad/s,

p : nombre de paires de pôles,

f : fréquence des tensions triphasées (des courants triphasés) en Hz.

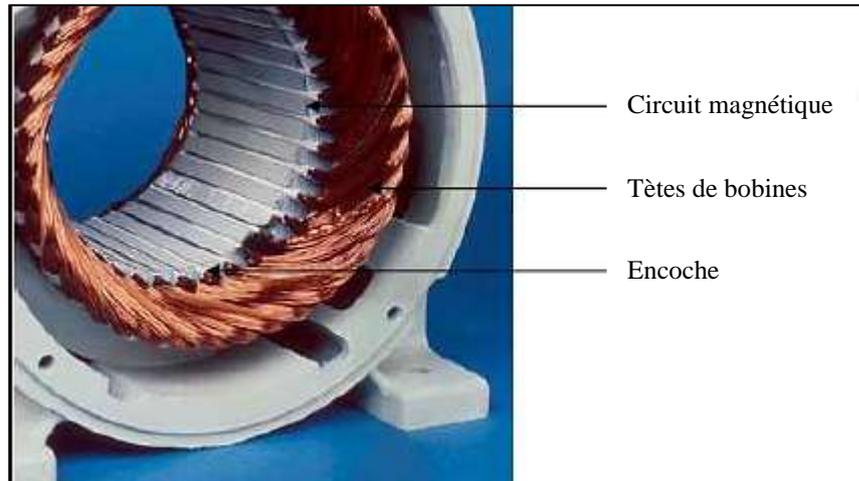


Figure I.3. Stator du moteur asynchrone

I.2.1.2. Description du rotor

Même chose que pour le stator, le rotor comporte un circuit magnétique constitué d'un empilage de tôles ferromagnétiques et dans lequel sont logées soit des bobines soit des barres. Dans une machine asynchrone on peut distinguer deux types de rotor: le rotor bobiné (à bagues) et le rotor à cage d'écureuil.

A. Rotor bobiné

Dans le cas du rotor bobiné, aussi appelé rotor à bagues, l'enroulement triphasé, relié en étoile ou en triangle, est connecté à trois bagues qui le rendent accessible de l'extérieur par l'intermédiaire de balais. On peut ainsi le court-circuiter. Comme cela se produit en marche normale, on doit insérer des résistances dans le circuit lors du démarrage. Ceci pour limiter les courants de démarrage.

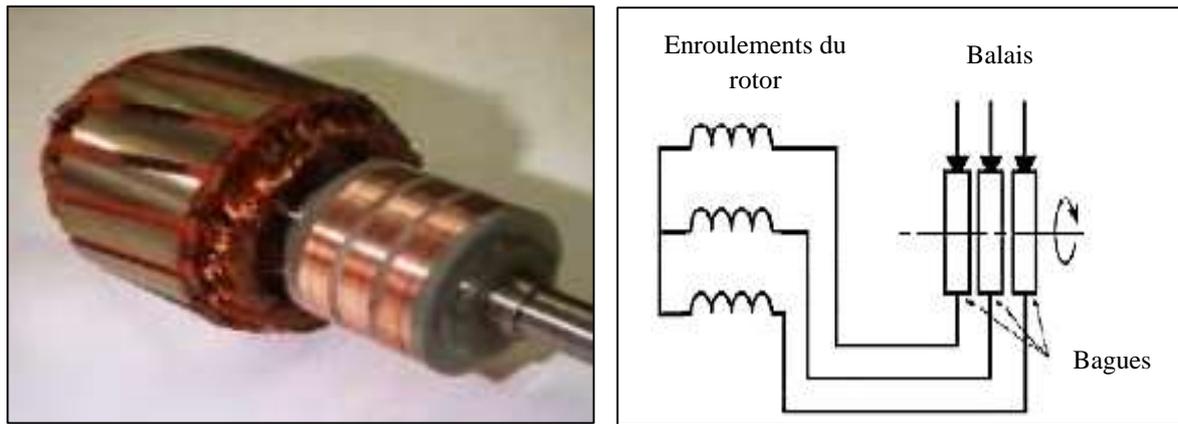


Figure I.4. Rotor bobiné

B. Rotor à cage d'écureuil

Le circuit de ce type de rotors est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui de la machine à rotor bobiné. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

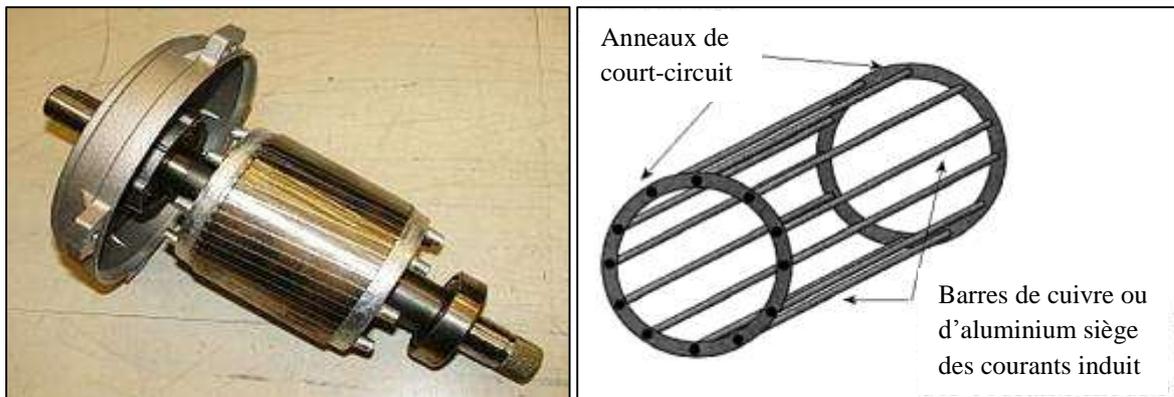


Figure I.5. Rotor à cage d'écureuil

I.2.1.3. Roulements

Les paliers sont constitués de roulements à billes et de flasques. Les roulements à billes sont insérés à chaud sur l'arbre, permettant ainsi d'assurer son guidage en rotation. Les flasques, moulés en alliage de fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage, comme le montre la figure ci-dessous [8].



Figure I.6. Roulements à billes

I.2.2. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

En alimentant les trois enroulements statoriques avec un système de courants triphasés il va y avoir création d'un champ magnétique tournant dans l'entrefer. Sa vitesse de rotation s'appelle vitesse de synchronisme. Cette vitesse de synchronisme est nommée Ω_s en rad/s ou n_s en tours/s. Sa valeur en tours par secondes vaut la fréquence du réseau qui alimente les bobines divisée par le nombre de paires de pôles [9]. On a alors:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{I.2})$$

Le circuit rotorique étant court-circuité, il sera le siège d'un système de courants induits. Ces derniers vont créer à leur tour un champ tournant dans l'entrefer.

L'interaction entre les deux champs tournants statorique et rotorique va engendrer une force qui va faire tourner le rotor à une vitesse légèrement inférieure à celle de synchronisme. On dit que le rotor glisse par rapport au champ magnétique tournant. On parle alors du glissement qui dépend de la charge.

Le glissement exprime l'écart relatif entre la vitesse de synchronisme Ω_s (n_s) et la vitesse de rotation de l'arbre du moteur Ω_r (n_r). Il est défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (\text{I.3})$$

Ou

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (\text{I.4})$$

Avec : Ω_s et Ω_r en rad/s, n_s et n_r en tr/s

I.3. Défaillances des machines asynchrones

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se déclarent dans les différentes parties de la machine en commençant par la connexion des phases statoriques et en finissant par l'accouplement mécanique du rotor à la charge. Ces défaillances peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

I.3.1. Statistiques des défaillances dans les MAS

Statistiquement, il est difficile de donner une répartition exacte des défaillances des machines électriques, puisque le recensement des pannes et défauts n'est pas automatique dans l'ensemble des parcs d'exploitation et des ateliers de maintenance.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels, sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats présentés dans la figure ci-dessous.

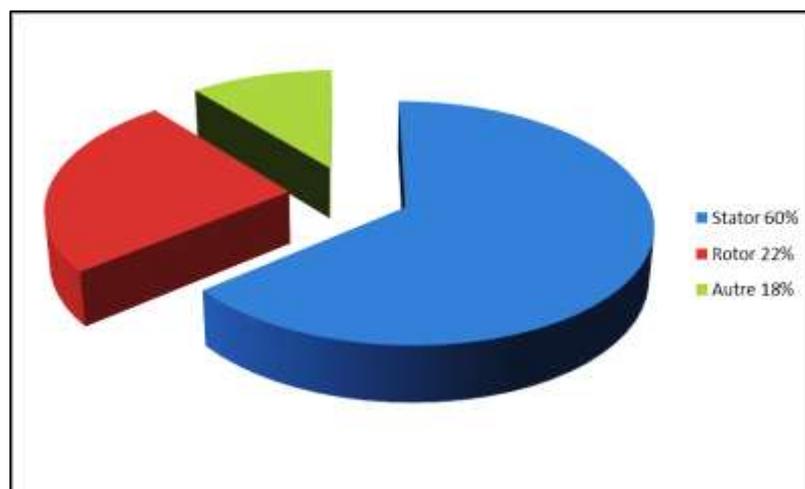


Figure I.7. Pourcentage des défauts dans les parties de la MAS

Une autre étude statistique faite sur des machines asynchrones de grandes puissances (de 100 kW à 1 MW) a donné les résultats présentés dans la figure I.8.

On peut constater un taux élevé des pannes dues aux roulements, dans les machines de fortes puissances. Ceci s'explique par le fait que les contraintes mécaniques sont plus importantes dans ces types de machines [10].

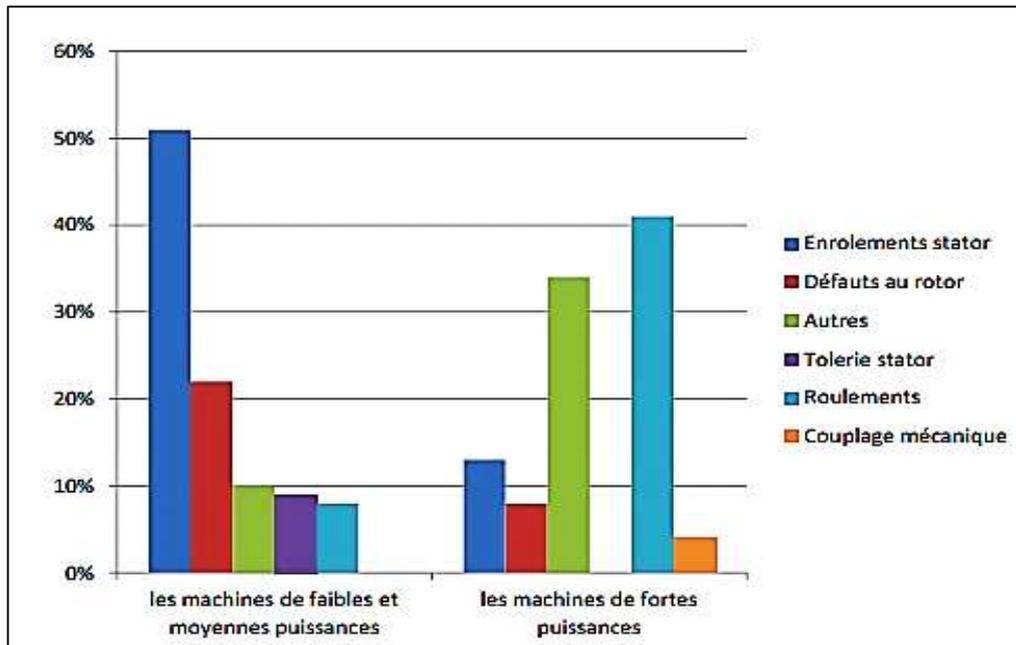


Figure I.8. Répartition des pannes dans les machines de faibles et moyennes puissances et dans les machines de fortes puissances

I.3.2. Classification des défaillances dans les machines électriques

Les défauts des machines électriques peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories: interne et externe (Tableau I.1) [11]. 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.

Tableau I.1. Défaillances des machines électriques

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

I.3.3. Origines et causes des défaillances dans les MAS

Les défaillances dans les machines asynchrones peuvent être d'origines diverses: électriques, mécaniques ou bien encore environnementale. Un simple problème à l'étape de fabrication peut être à l'origine d'un défaut tout comme une utilisation non conforme de la machine. De plus, des défauts peuvent survenir à cause du milieu dans lequel la machine est utilisée (milieux corrosifs et /ou chimiques, milieux humides...)

I.3.3.1. Défaillances dues au réseau d'alimentation

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont :

- Court-circuit entre les phases,
- Coupure de phase d'alimentation,
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature:

- Climatique (pluie, foudre...),
- D'environnement (branches d'arbres ...),
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par, soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus graves, cela provoque la coupure de longue durée [12].

I.3.3.2. Défaillances d'ordre mécanique

Plus de 40% de défauts de moteurs asynchrones sont des défauts mécaniques. Ces défauts peuvent être des défauts de roulements, des défauts d'excentricité, . . .

A. Défauts de Roulements

Tous les efforts dynamiques d'une ligne d'arbre sont soutenus et encaissés par les roulements. Ainsi ce sont les éléments les plus critiques d'une machine, donc les éléments à surveiller le plus.

Alors, les constructeurs de systèmes de contrôle rivalisent d'ingéniosité pour réaliser le moyen d'analyse le plus performant. Les roulements, sont sans doute les organes les plus sensibles d'un parc machine.

Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix du matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou fissuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Dans la plupart des cas, la dégradation par un écaillage d'une des pistes ou d'un élément roulant du roulement, produisant un choc à chaque passage. Les roulements défectueux génèrent des vibrations de fréquences égales aux vitesses de rotation de chaque pièce du roulement. Ils correspondent aux billes, des rouleaux ou de la cage et au passage des billes sur les bagues. Pour chaque type de roulement et en fonction de ses cotes de fabrication [13]. La figure ci-dessous présente les défauts de bague et de billes dans les roulements.



Figure 1.9. Roulements sains et défectueux

B. Défauts du Flaque

Les défauts créés par les flasques, de la machine asynchrone, sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine. Il est possible de détecter ce type de défaillances par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [14].

C. Défauts de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou long terme, cette fissure peut mener à une fracture nette de l'arbre provoquant ainsi un arrêt irrémédiable de la machine asynchrone. Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine.

I.3.3.3. Défaillances d'ordre électrique

Les défaillances d'origine électrique peuvent, dans certains cas, être la cause d'un arrêt de la machine. Ces défaillances peuvent être classées en deux catégories bien distinctes. Nous pouvons citer les défauts qui apparaissent au niveau des circuits électriques statoriques et celles qui apparaissent au niveau des circuits électriques rotoriques [15].

A. Au niveau du stator

Les défauts qui sont les plus récurrents, localisés au niveau du stator, peuvent être définis comme suit:

- Défaut d'isolant,
- Court-circuit entre spires,
- Court-circuit entre phases,
- Court-circuit phase/bâti,
- Défaut de circuit magnétique.

A.1. Défaut d'isolant dans un enroulement

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

- Dégradation de l'isolant à la fabrication,
- Tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation,

- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation,
- Vibrations mécaniques,
- Vieillessement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.

A.2. Court-circuit entre spires

Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent. Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné. Il entraîne une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée, une légère variation de l'amplitude sur les autres phases, modifie le facteur de puissance et amplifie les courants dans le circuit rotorique. Ceci a pour conséquence une augmentation de la température au niveau du bobinage et, de ce fait, une dégradation accélérée des isolants, pouvant provoquer ainsi, un défaut en chaîne (apparition d'un 2ème court-circuit). Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelles au défaut [15].

A.3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs. Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux vont augmenter lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [10].

A.4. Court-circuit phases/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le

bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels). En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas.

Cependant, le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut.

A.5. Défaut de circuit magnétique

Ces défauts aboutissent dans la plupart des cas à une dissymétrie au niveau du fonctionnement de la machine, qui à son tour peut accentuer le problème par des phénomènes de surchauffe, de surtension, d'élévation importante du courant, etc.

Les figures I.10 et I.11 présentent les différents défauts qui peuvent parvenir dans les enroulements du stator.

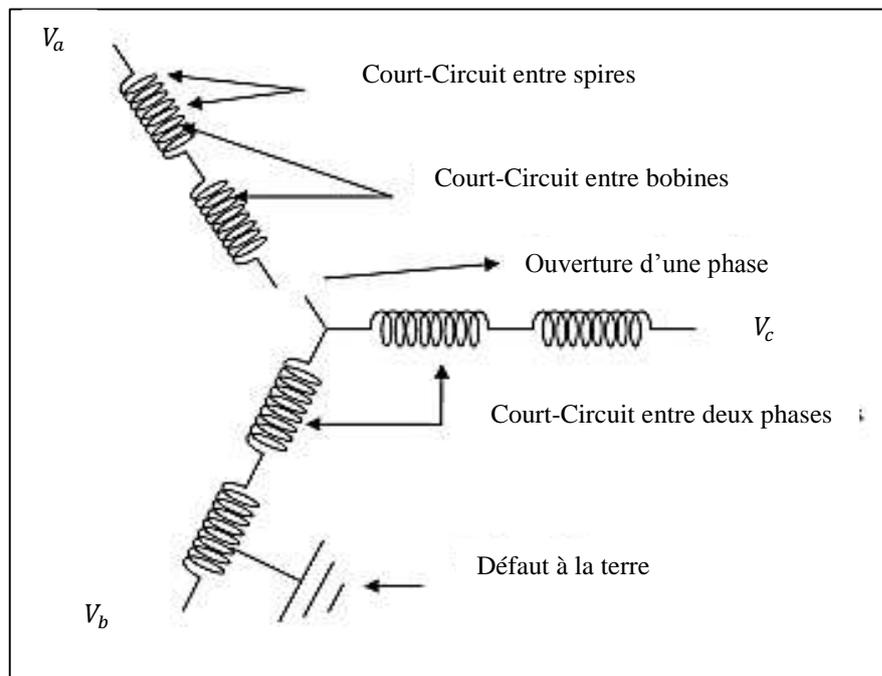
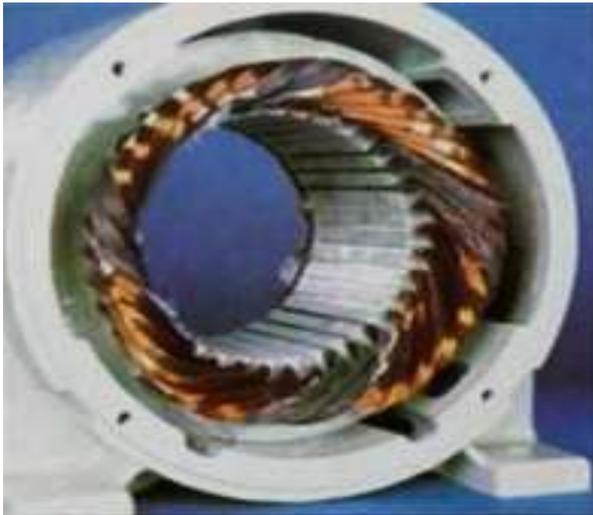


Figure I.10. Défauts des enroulements statoriques



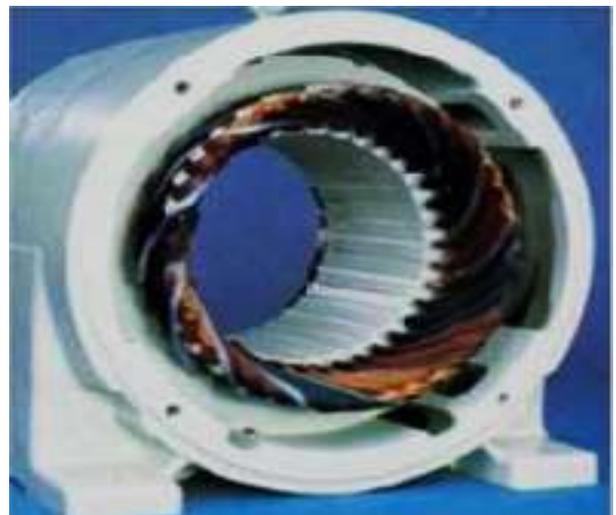
Ouverture d'une phase



Court-circuit entre spires



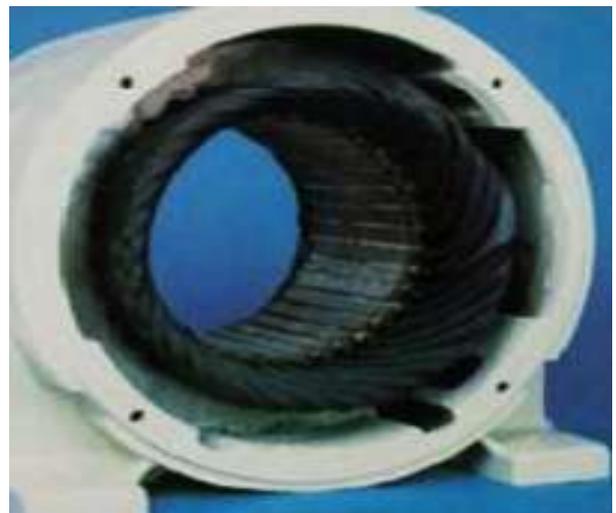
Dégradation causée par une surtension



Déséquilibre de l'alimentation



Masse dans l'encoche



Damage dû à la charge

Figure I.11. Différents défauts au niveau du stator de la machine asynchrone

B. Au niveau du rotor

Pour le rotor, les défaillances sont essentiellement dues à un problème [12]:

- Thermique (surcharge...),
- Electromagnétique,
- Résiduel (déformation,...),
- Dynamique,
- Environnemental.

Les défauts qui sont plus récurrents, localisés au niveau du rotor, peuvent être définis comme suit:

- Rupture de barres dans les machines asynchrones,
- Rupture d'une portion d'anneaux de court-circuit dans les machines asynchrones,
- Excentricités statique et dynamique.

B.1. Rupture de barres

La cassure ou rupture de barres est un des défauts les plus fréquents au rotor. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit (figure I.12). La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine [10] [16].

Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance.

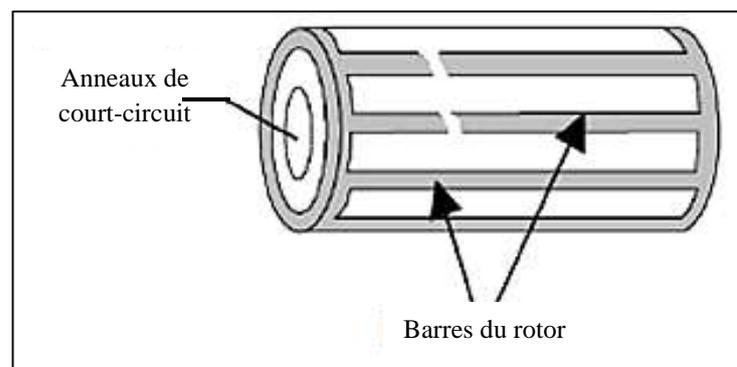


Figure I.12. Défaut de rupture des barres

B.2. Rupture d'anneaux

La rupture de portion d'anneau (figure I.13) est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure des barres. Ces ruptures peuvent être dues à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux [10].

Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voire confondu, avec la rupture de barres dans les études statique. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

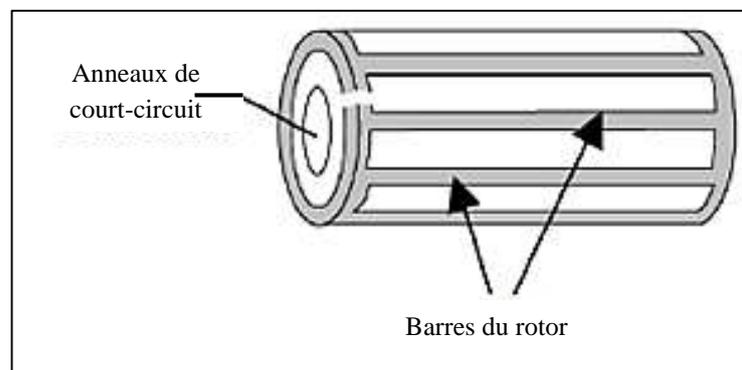


Figure I.13. Rupture d'anneau de court-circuit

La rupture d'une portion d'anneau déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques similaire à celui provoqué par la cassure de barres.

B.3. Défauts d'excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité statique, dynamique ou mixte (figure I.14) [17]:

- ✚ Le défaut d'excentricité statique est généralement dû à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator, dont la cause la plus fréquente est un défaut de centrage des flasques.
- ✚ Le défaut d'excentricité dynamique peut être cause par une déformation du cylindre rotorique, ou la détérioration des roulements à billes.

- ✚ L'excentricité mixte, la plus fréquente, est la combinaison d'une excentricité statique et d'une excentricité dynamique.

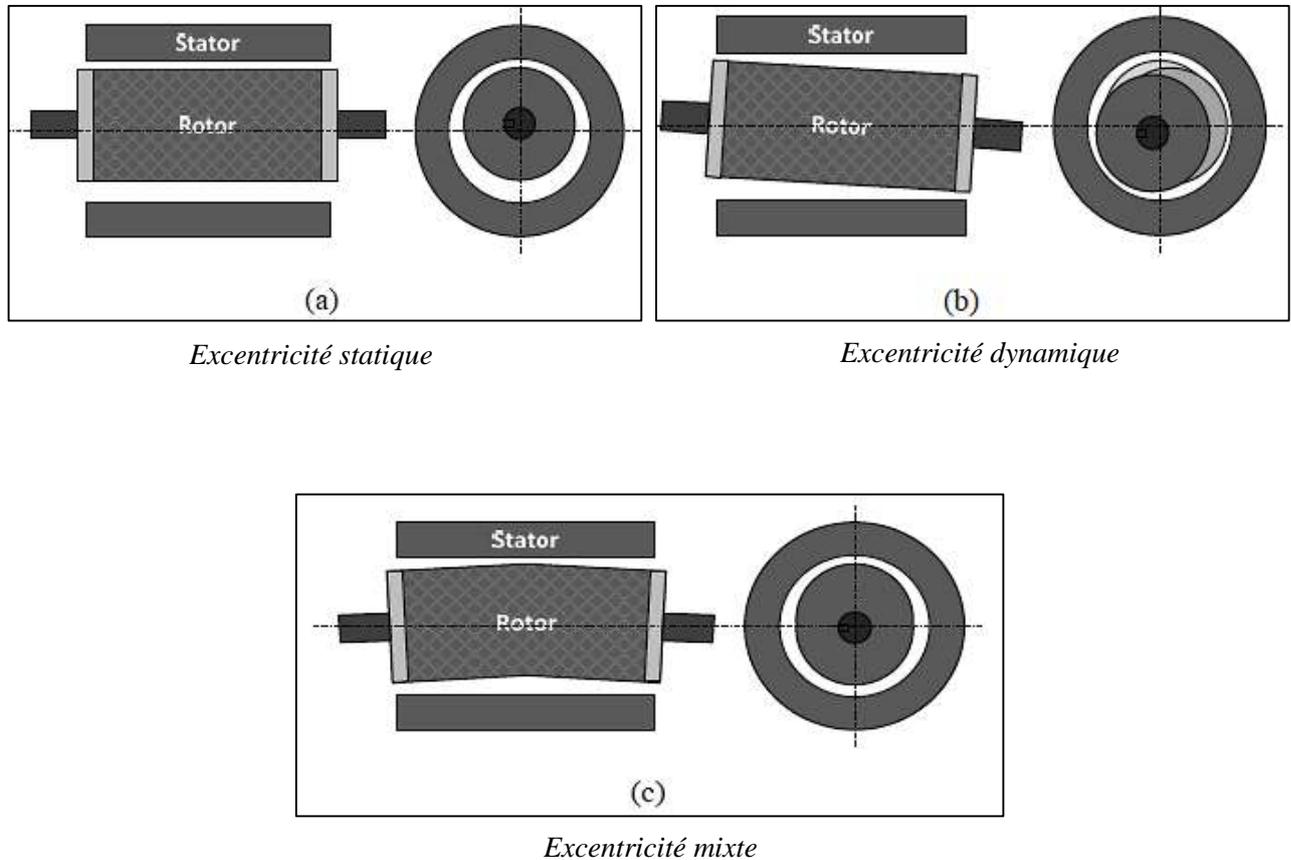


Figure I.14. Défauts d'excentricité

I.3.3.4. Défaillances d'autres origines

A. Défauts de la charge mécanique

Les travaux menés dans ce domaine ont surtout concerné l'influence de la dynamique de la charge sur la détection et le diagnostic d'autres défauts tels que la rupture d'une barre ou l'excentricité du rotor. Ces études ont montré que l'introduction de perturbations ou d'oscillations par la charge pouvait masquer l'apparition des défauts du moteur [18].

Pour maîtriser l'étude des défauts de la charge, une connaissance parfaite de cet élément s'avère nécessaire. Pour ce faire, on peut procéder tout d'abord à une classification des différents types de charges les plus rencontrés:

- Charge à couple constant: le couple n'est pas fonction de la vitesse (ex: convoyeur, tapis roulant,...),

- Charge à couple variable: le couple varie en fonction de la vitesse (ex: pompe centrifuge, ventilateur,...),
- Charge à puissance constante: tels que les broyeuses, les affûteuses, les bobineurs,....

La charge peut donc être le siège de mauvaises conditions de fonctionnement qui aboutissent à l'apparition de défauts tels que:

- surcouples accidentels,
- perturbations mécaniques dues aux vibrations et phénomènes de résonance mécanique liés à la construction de la machine ou introduites par l'environnement extérieur,
- désalignement des différents arbres mis en jeu pour assurer l'accouplement et la rotation,
- manque de lubrifiants,
- vitesse critique de rotation,
- rupture de la charge.

Tous ces défauts de la charge vont naturellement avoir une influence dégradante sur les grandeurs mécaniques mises en jeu au niveau de l'entraînement, à savoir le couple et la vitesse de rotation. En outre, et selon la stratégie de commande adoptée pour le pilotage de l'entraînement, les grandeurs électriques vont être aussi plus ou moins affectées [19].

B. Blocage du rotor du moteur

Le blocage d'un moteur, pour une cause mécanique, provoque une surintensité sensiblement égale au courant de démarrage. Mais l'échauffement qui en résulte est beaucoup plus important car les pertes dans le rotor sont maintenues à leur valeur maximale durant tout le blocage et la ventilation est supprimée si celle-ci est liée à la rotation du rotor. Les températures rotoriques peuvent devenir très importantes (350°C).

C. Surcharge d'un moteur

La surcharge d'un moteur (ralentissement ou survitesse) est provoquée par une augmentation du couple résistant ou par une baisse de la tension du réseau (>10% de la tension nominale U_n). L'augmentation du courant consommé par le moteur engendre un échauffement qui réduit sa durée de vie et peut lui être fatal à long terme [18].

D. Démarrage trop long et/ou trop fréquent du moteur

La phase de démarrage d'un moteur correspond à la durée qui lui est nécessaire pour atteindre sa vitesse de rotation nominale.

Compte tenu de ses caractéristiques intrinsèques, chaque moteur ne peut supporter qu'un nombre limité de démarrages, généralement précisé par son fabricant (nombre de démarrages par heure). De même, chaque moteur a un temps de démarrage fonction de son courant de démarrage (figure I.15).

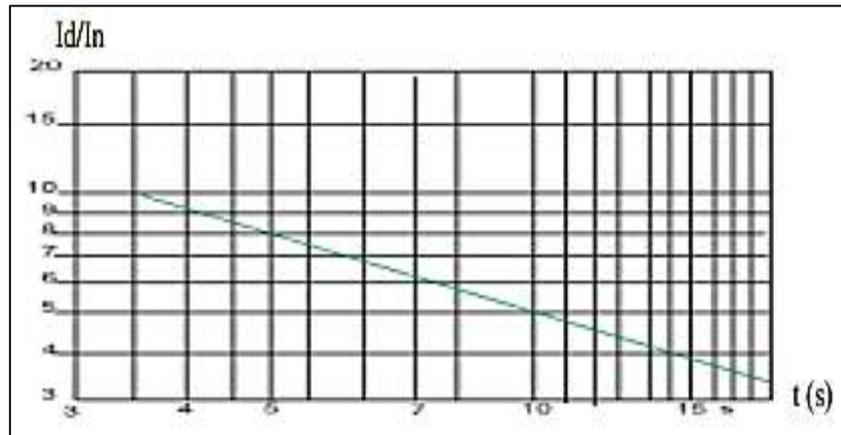


Figure I.15. Temps de démarrage admissible des moteurs en fonction du rapport courant

Conclusion

La protection des machines électriques est une fonction essentielle pour la continuité de leur fonctionnement. La recherche d'anomalies et la rapidité de remise en marche doit être fait avec rigueur [8].

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

Le diagnostic des défauts est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs. Ces symptômes peuvent être:

- Un déséquilibre des courants de ligne et des tensions,
- Une augmentation des oscillations du couple,
- Une diminution du couple moyen,
- Une augmentation des pertes et donc une réduction de l'efficacité énergétique,
- Un échauffement excessif et donc un vieillissement accéléré.

Chapitre II

Modélisation électromagnétique

Chapitre II

Modélisation électromagnétique

Introduction

Les phénomènes électromagnétiques sont à la base de tous les concepts électrotechniques, quels que soient. Il est par conséquent indispensable, avant de vouloir réaliser pratiquement un dispositif électromagnétique, de modéliser et simuler en utilisant les équations de Maxwell dans ce système [20].

Les phénomènes électromagnétiques étudiés dans un dispositif sont régis par les quatre équations de Maxwell et par les trois relations des milieux considérés. Ces équations décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques et s'adaptent à tout milieu électromagnétique. Le calcul du champ électromagnétique passe par la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles [21].

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu sur la procédure suivie lors de la modélisation d'un dispositif électromagnétique. On va présenter les différentes formulations ainsi que les méthodes de calcul du champ électromagnétique.

II.1. Intérêt du calcul du champ électromagnétique

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

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

De nos jours, grâce au développement de la technologie, l'utilisation d'ordinateur est devenue courante pour la modélisation du champ électromagnétique avec des temps de calcul considérablement réduits.

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

II.2. Calcul du champ électromagnétique

L'étude de n'importe quel dispositif électromagnétique nécessite la connaissance de la distribution du champ électromagnétique dans ce dispositif et donc les valeurs du flux, des forces magnétiques, etc. Le calcul du champ électromagnétique nécessite une résolution des formulations électromagnétiques qui sont élaborées à partir des équations de Maxwell.

II.2.1. Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations, présentées ci-dessous, sont généralement interdépendantes de façon que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [22].

Equation de Maxwell-Faraday

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

Equation de Maxwell-Ampère

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.2})$$

✚ Equation de conservation de flux magnétique

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

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

✚ Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Ce champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique, à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée, aux charges électriques tel que [23]:

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

Avec :

\vec{E} : Champ électrique [V/m],

\vec{B} : Induction magnétique [T],

\vec{H} : Champ magnétique [A/m],

\vec{J} : Densité de courant [A/m^2],

\vec{D} : Induction électrique [C/m^2],

ρ : Densité volumique de charge électrique [C/m^3],

$\frac{\partial D}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement [A/m^2].

II.2.2. Lois de comportement des matériaux

Dès lors que les champs vectoriels présentés précédemment sont fonction du milieu où ils règnent, il faut joindre aux équations de Maxwell des relations qui définissent le milieu, et ce, pour résoudre les problèmes électromagnétiques [24].

II.2.2.1. Relation magnétique

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

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

Tel que:

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

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide [H.m^{-1}],
 μ_r : Perméabilité magnétique relative du milieu,
 μ : Perméabilité magnétique absolue [H.m^{-1}].

II.2.2.2. Milieu conducteur: Loi d'ohm

On appelle conducteur tout milieu possédant des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique sous l'effet d'un champ électrique [25]. Quand un tel milieu est soumis à un champ électrique, les charges électriques (électrons libres dans les métaux) se mettent en mouvement, créant ainsi un courant électrique.

Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet que:

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

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

Si le milieu est anisotrope, on aura:

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

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

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

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

$$\vec{J} = \overrightarrow{J_{ext}} + \overrightarrow{J_{eddy}} \quad (\text{II.8})$$

Tel que:

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

$\overrightarrow{J_{ext}}$: Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation [A.m^{-2}],

$\overrightarrow{J_{eddy}}$: Densité de courants de Foucault [A.m^{-2}].

II.2.2.3. Comportement diélectrique

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

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$,

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

ε_r : Permittivité électrique relative du milieu,

ε : Permittivité électrique absolue [F/m].

II.2.3. Conditions de passage entre deux milieux différents

Sur une limite de séparation de deux milieux différents notés M1 et M2 (figure II.1), on peut trouver des conditions de continuité du type [21]:

➤ Relation de continuité de la composante normale de l'induction magnétique

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

➤ Relation de continuité de la composante tangentielle du vecteur champ électrique

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

➤ Relation de continuité de la composante normale de la densité de courant

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

➤ Relation de discontinuité de la composante tangentielle du champs magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent

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

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

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

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

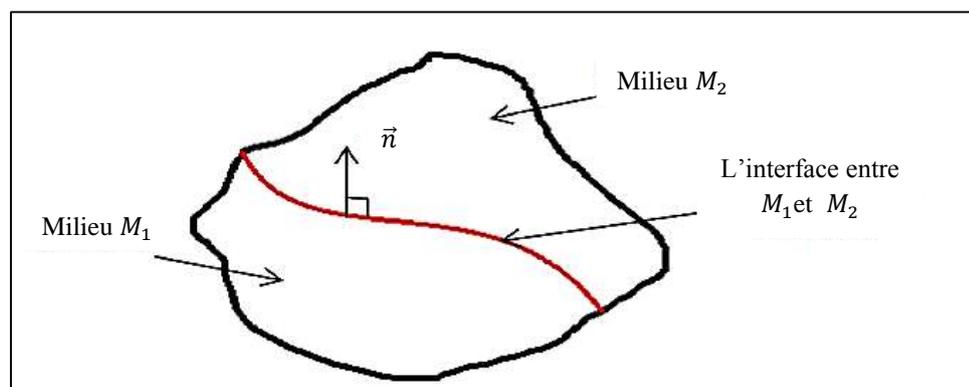


Figure II.1. Domaine d'étude avec deux milieux différents M1 et M2

II.2.4. Hypothèses simplificatrices

En pratique, il est généralement usuel de simplifier les équations de Maxwell précédentes en se basant sur les conditions de travail. L'une des plus importantes simplifications est celle de négliger la densité du courant de déplacement ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) dans le matériau conducteur. Ceci revient au fait que sa densité est très faible par rapport à celle de conduction, aux fréquences usuelles en électromagnétique (basse fréquence) qui permet de négliger tout aspect propagatif du champ électromagnétique [26].

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

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

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

$$\text{div} \vec{j} = 0 \quad (\text{II.16})$$

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.17})$$

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

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

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

II.2.5. Problème électromagnétique

Un problème électromagnétique est constitué de façon schématique, tel que le montre la figure II.2, par différents domaines physiques susceptibles d'être rencontrés dans un dispositif électromagnétique [27]. Alors, ce problème type est constitué des parties suivantes :

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

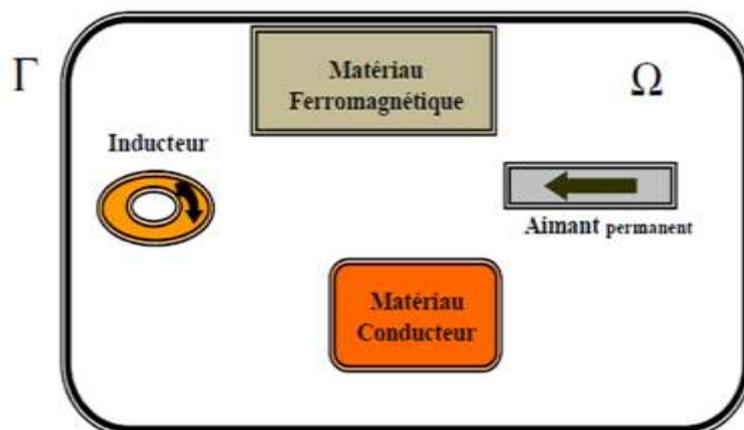


Figure II.2. Domaine d'étude d'un dispositif électromagnétique

II.2.6. Formulations électromagnétiques

Pour la résolution d'un problème électromagnétique on doit élaborer la formulation correspondante à ce problème et qui dépend des propriétés électriques et magnétiques du domaine d'étude (figure II.2).

Les équations précédentes permettent, théoriquement, de décrire tous les systèmes quasi-stationnaires dans la plupart des dispositifs utilisés en électrotechnique. Elles sont souvent transformées avant tout traitement numérique pour être appliquées aux problèmes physiques à résoudre. Alors, une mise en forme préliminaire s'impose afin de réduire le nombre d'inconnues et le nombre d'équations à résoudre. De nombreuses méthodes ont été proposées, utilisant des variables de type potentiel vecteur ou scalaire, magnétique ou électrique ou de type champ. D'après la littérature, dans le cas de l'étude des problèmes électromagnétiques, les modèles (donc les formulations) magnétostatique et magnétodynamique sont tout à fait adéquats [28]. Dans notre étude, on va s'intéresser au modèle magnétodynamique puisque c'est celui approprié pour la modélisation d'un moteur asynchrone.

II.2.6.1. Formulation magnétodynamique

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

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} \quad (\text{II.21})$$

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

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

Avec:

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

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

La figure II.3 montre le diagramme de Toni, propre à la magnétodynamique. Les lois de comportement sont alors des opérateurs qui relient le champ électrique et le champ magnétique avec la prise en compte de la dérivée par rapport au temps [29].

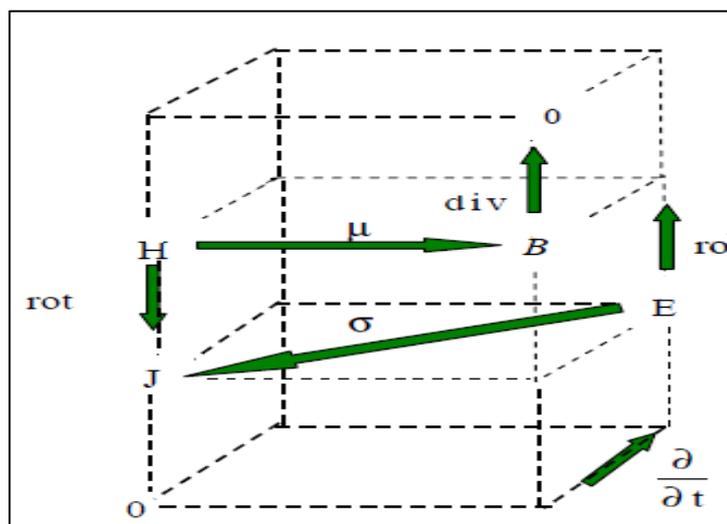


Figure II.3. Diagramme de Toni

Les sources du champ sont les densités de courant imposées \vec{J}_{ext} (et/ou les aimants permanents caractérisés par leur induction rémanente B_r). σ est la conductivité du milieu, V sa vitesse et μ sa perméabilité magnétique. Pour définir complètement le problème de la magnétodynamique, il est encore nécessaire de considérer les relations constitutives des milieux.

Plusieurs formulations ont été développées pour représenter le modèle de la magnétodynamique en vue de sa modélisation. Les principales formulations qu'on peut rencontrer sont: les formulations en E , en A , en $A-V$, en H et en $T-\Phi$.

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

❖ Formulation en Potentiel vecteur magnétique \vec{A}

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

Sachant que la divergence de l'induction magnétique \vec{B} est nulle (Equation II.23), et d'autre part la divergence d'un rotationnel est toujours nulle, on peut en tout point de l'espace identifier l'induction avec le rotationnel d'une grandeur vectorielle \vec{A} [T.m] comme l'indique l'équation ci-dessous:

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

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

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

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

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

➤ *Systèmes 2D cartésiens*

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

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

En magnétodynamique, l'équation de diffusion électromagnétique de la grandeur \vec{A} (équation II.26) se réécrit, comme suit, en coordonnées cartésiennes [17]:

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

Où v est la reluctivité magnétique ($v = \frac{1}{\mu}$).

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

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

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

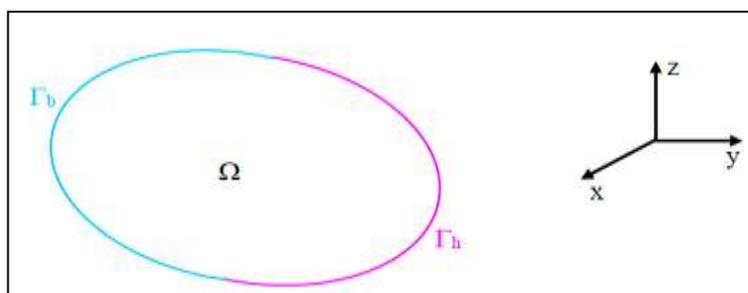


Figure II.4. Domaine d'étude borné

Deux types de conditions aux limites existent:

➤ **Conditions de type Dirichlet sur Γ_h :**

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

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

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

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

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

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

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

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

II.3. Méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles

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

II.3.1. Méthodes analytiques

Ce sont les premières méthodes utilisées. Elles sont d'emploi restreint à des géométries simples dans une approche unidimensionnelle, ou quelque fois dans des problèmes bidimensionnels. La méthode analytique la plus puissante et la plus couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles est la méthode de séparation des variables. Le principe de cette méthode consiste à mettre l'inconnu sous forme d'un produit des fonctions, dont chacune ne dépend que d'une seule variable [30].

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

$$A_z(x, y) = A_z(x) \cdot A_z(y) \quad (\text{II.32})$$

Tel que :

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

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

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

II.3.2. Méthodes semi-analytiques

Parmi les méthodes semi-analytiques, on peut citer la méthode des intégrales de frontières ainsi que la méthode des circuits couplés [26].

II.3.2.1. Méthode des intégrales de frontières (MIF)

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

II.3.2.2. Méthode des circuits couplés (MCC)

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

II.3.3. Méthodes numériques

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

II.3.3.1. Méthode des différences finies (MDF)

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

II.3.3.2. Méthode des volumes finis (MVF)

La MVF se déduit à partir de la MDF. Le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entour un nœud du maillage (celui des différences finies).

La forme intégrale de l'EDP est discrétisée dans le domaine d'étude et intégrée sur chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, exponentielle) entre deux nœuds consécutifs. Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs, la procédure conduit à une solution plus précise que celle fournie par la MDF [26].

II.3.3.3. Méthode des éléments finis (MEF)

La MEF était utilisée au début par les spécialistes de la mécanique. Son introduction dans le domaine d'électrotechnique été fait par M.V.K. Charïen en 1970 [31].

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

A. Principe de la méthode des éléments finis

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

Cette solution globale sera construite sur chacun des éléments du maillage et doit vérifier globalement les équations aux dérivées partielles qui modélisent le phénomène, et les conditions aux limites requises. Sur chaque élément fini, la solution est décrite par une interpolation, en fonction des valeurs nodales de l'inconnu [32].

La formulation présentée précédemment ne peut être résolue par des méthodes analytiques que dans des configurations géométriques simples. Une méthode numérique doit être appliquée dans le cas général [33].

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

B. Maillage en éléments finis

Le maillage consiste à discrétiser le domaine d'étude (1D, 2D, 3D) en un ensemble d'éléments finis de forme simple. Ces éléments peuvent être des segments, des triangles, etc.... (figure II.5). Selon le domaine à discrétiser, la taille des éléments du maillage n'est pas forcément la même, ce qui permet la densification de la discrétisation dans les zones où l'inconnue varie fortement [34].

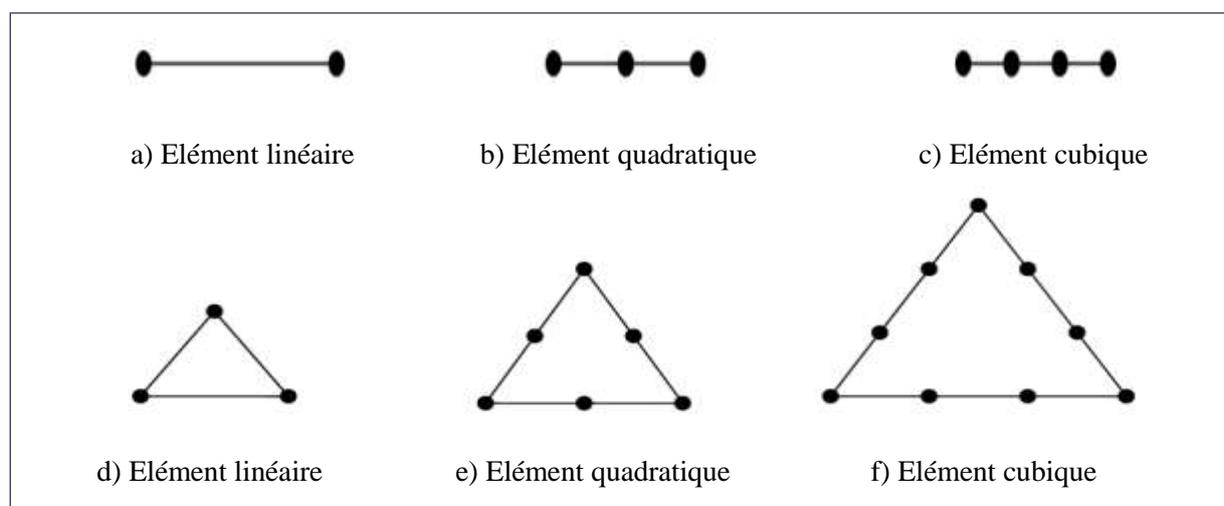


Figure II.5. Éléments classiques en une et deux dimensions

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleure exactitude de la solution, on procède à raffiner le maillage [35].

C. Fonction d'approximation

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

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

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

$$J_i = a + bx + cy = \sum_{i=1}^3 \alpha_i J_i \quad (\text{II.34})$$

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

$$\alpha_i(x_i, y_j) = \begin{cases} 1 & \dots \text{si } \dots i = j \\ 0 & \dots \text{si } \dots i \neq j \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i(x, y) = 1 \quad (\text{II.36})$$

Pour un élément triangulaire de premier ordre on a:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2s} [(x_2 \cdot y_3 - x_3 \cdot y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \quad (\text{II.37})$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{2s} [(x_3 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \quad (\text{II.38})$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2s} [(x_1 \cdot y_2 - x_2 \cdot y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y] \quad (\text{II.39})$$

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

$$s = \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \quad (\text{II.40})$$

D. Formulation intégrale

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

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

La méthode des résidus pondérés ne nécessite pas la connaissance de la fonctionnelle d'énergie du système, ce qui a rendu cette méthode plus générale et largement utilisée par rapport à la méthode variationnelle [26].

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

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

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

$$[M] \cdot [A] = [F] \quad (\text{II.42})$$

Conclusion

La modélisation en électromagnétisme est basée sur les équations de Maxwell, c'est pourquoi nous nous sommes attelés à exposer un rappel des notions relatives à l'électromagnétisme. Par la suite, une formulation mathématique des phénomènes électromagnétiques présents dans les dispositifs électromagnétiques, utilisant principalement le potentiel vecteur magnétique, a été présentée.

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

Enfin, connaissant les outils mathématiques nécessaires pour la modélisation d'un dispositif électromagnétique, on peut entamer le sujet du diagnostic des MAS. Ceci fera l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre III

Diagnostic de la Machine Asynchrone

Chapitre III

Diagnostic de la machine asynchrone

Introduction

La surveillance des machines électriques, pour le diagnostic et la prévision de pannes, a suscité de nombreux travaux ces dernières années, à cause de son influence considérable sur la continuité opérationnelle de nombreux processus industriels.

Un bon diagnostic et une détection précoce de défauts permettent de minimiser le temps d'arrêt ainsi que le temps de maintenance du processus en question. Ils permettent aussi d'éviter les conséquences nuisibles, parfois dévastatrices, des défauts ainsi que de réduire les pertes financières. Une bonne procédure de détection doit prendre les mesures minimales nécessaires à partir du processus en question, ainsi que d'extraire un diagnostic donnant une indication claire des modes de défaillance, par l'analyse des données, dans un minimum de temps [12].

Après avoir exposé les différents défauts qui peuvent survenir dans une machine asynchrone, précédemment, le but de ce chapitre est de présenter la procédure ainsi que les méthodes de diagnostic de ces défauts. Ces méthodes sont classées en deux catégories, celles qui utilisent un modèle mathématique du système et celles qui consistent à analyser les signaux mesurés. De plus, on va discuter les différentes techniques employées pour le diagnostic d'une machine électrique.

III.1. Diagnostic appliqué aux systèmes industriels

Le diagnostic des systèmes industriels nécessite un certain nombre d'étapes. Ces dernières sont résumées dans la figure III.1 [37].

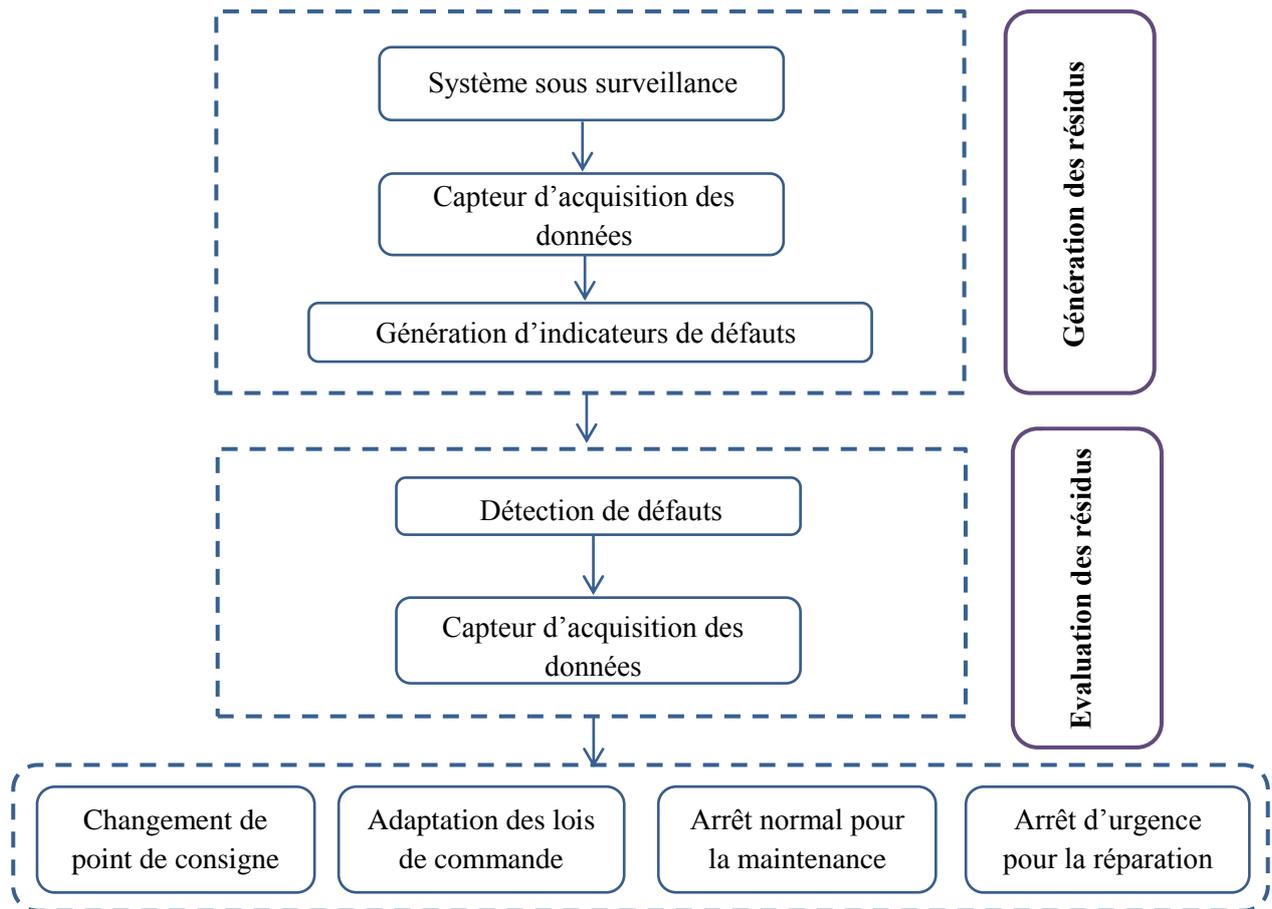


Figure III.1. Les différentes étapes du diagnostic d'un système industriel

➤ Acquisition de données

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

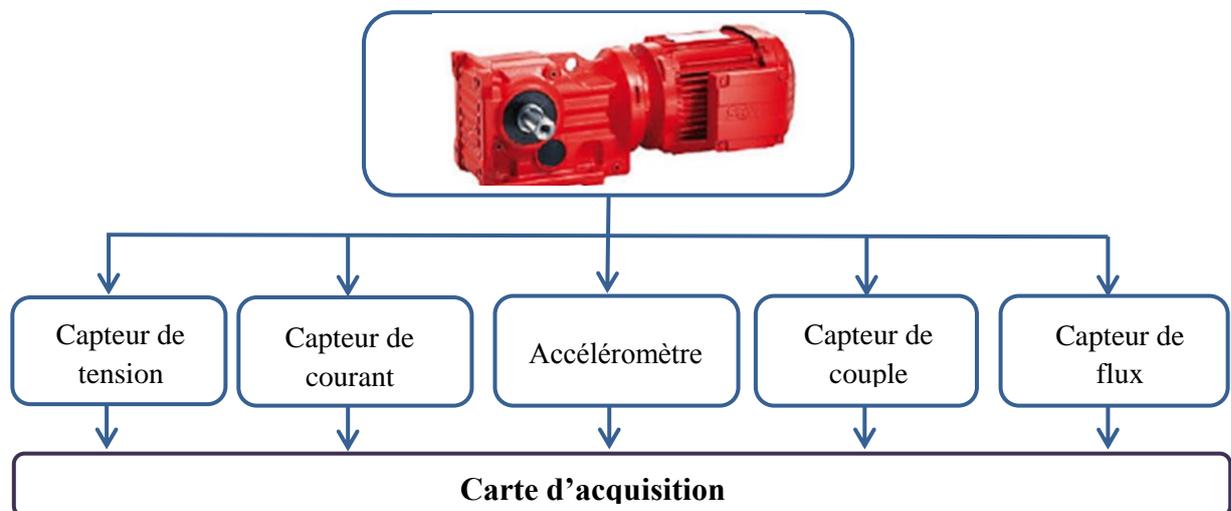


Figure III.2. Chaîne d'acquisition

➤ **Elaboration d'indicateurs de défauts**

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

➤ **Détection de défauts**

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

➤ **Localisation de défaut**

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

➤ **Prise de décision**

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

III.2. Diagnostic appliqué aux machines électriques

III.2.1. Recherche indispensable des symptômes

Lorsque plusieurs défauts présentent les mêmes symptômes, il devient indispensable, pour l'opérateur, de rechercher systématiquement l'existence de symptômes en plus. Il faut insister d'emblée sur le fait que certains de ces symptômes ne sont pas spécifiques à un défaut en particulier et c'est l'analyse minutieuse qui doit faire montrer cela [38].

Le médecin, pour faire un diagnostic réussi, fait plusieurs tests à la recherche de nouveaux symptômes car ceux signalés par le système nerveux central le guident vers plusieurs causes, particulièrement si la maladie s'est aggravé avec le temps. Dans ces cas, c'est l'analyse différentielle associée aux résultats des tests qui permettra de rattacher ces symptômes à l'un ou à l'autre des causes probables. A partir de là, on conclut que: Le diagnostic est facile lorsqu'il est fait en temps réel et lorsque les symptômes sont clairs.

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

Tableau III.1. Pannes types observées sur un moteur

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

III.2.2. Méthodes de diagnostic des machines électriques

A partir des travaux qui ont été effectués dans le domaine du diagnostic des machines électriques, trois méthodes de diagnostic peuvent être distinguées (figure III.3) [39]:

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

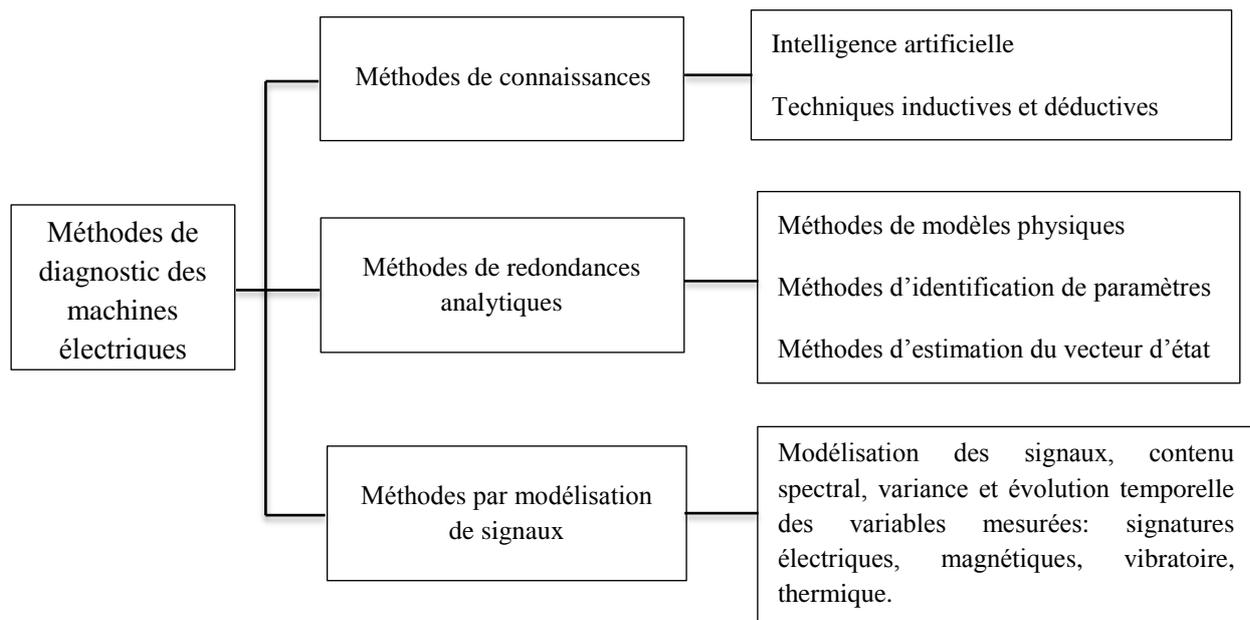


Figure III.3. Méthodes de diagnostic des machines électriques

III.2.2.1. Méthodes de connaissances

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

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

III.2.2.2. Méthodes de redondances analytiques

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

III.2.2.3. Méthodes par modélisation de signaux

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

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

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

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

III.3. Types de grandeurs à analyser

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

- Electrique: analyse des grandeurs électriques aux bornes de la machine (tension, courant,...),
- Mécanique: analyse de la vitesse, du couple ou même des vibrations,
- Thermique: analyse de la température de la machine,
- Electromagnétique: analyse des flux dans l'entrefer, des flux axiaux,...,
- Chimique: analyse des huiles et des gazes.

III.4. Techniques de diagnostic des défauts dans les machines asynchrones

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures. L'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts [40] [41]. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure du champ magnétique, mesure de bruit...), d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) (Figure III.4) [42].

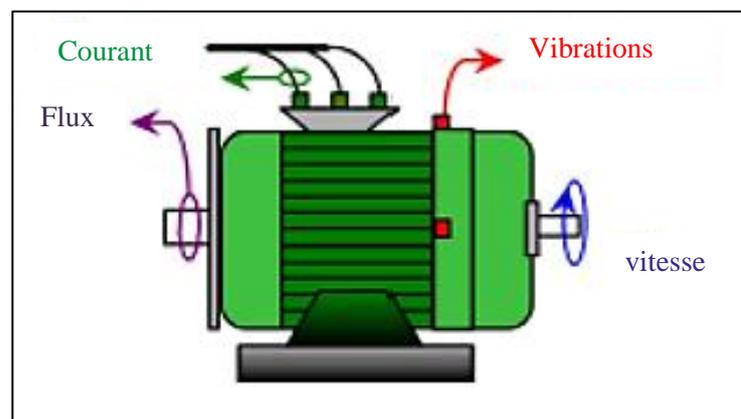


Figure III.4. Quelques grandeurs de diagnostic d'une machine électrique

Ces techniques peuvent être classées en trois catégories:

- Les techniques mécaniques,
- Les techniques chimiques,
- Les techniques magnétiques et électriques.

Ces classifications sont illustrées dans la figure III.5.

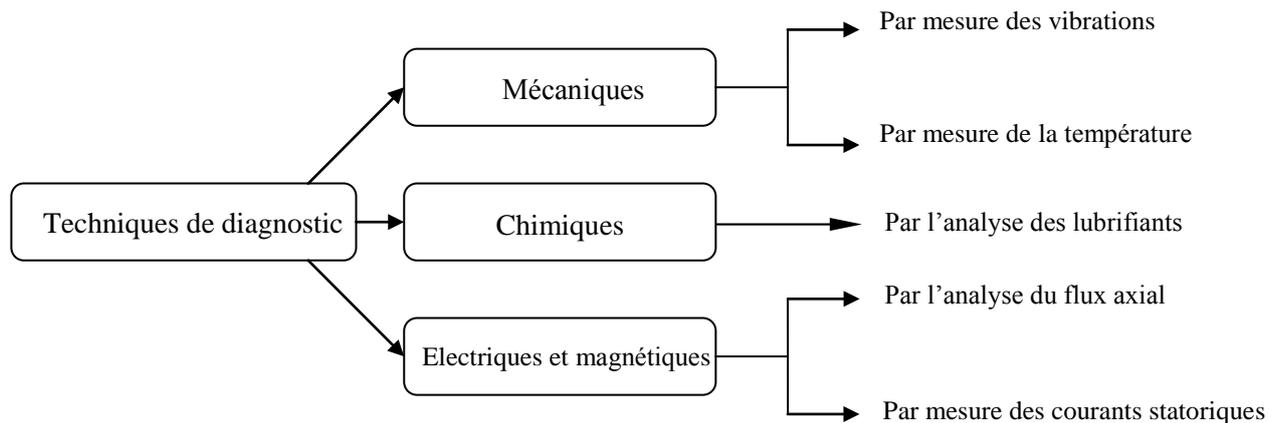


Figure III.5. Techniques de diagnostic d'une machine asynchrone

III.4.1. Techniques mécaniques

Parmi ces techniques, on trouve le diagnostic par mesure des vibrations et par mesure de la température.

III.4.1.1. Diagnostic par mesure des vibrations

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

La technique du diagnostic par analyse des vibrations consiste à placer dans les différents endroits de la machine des capteurs de vibrations, tels que les accéléromètres qui sont les plus utilisés pour la mesure des vibrations dans les machines électriques. Ils doivent être bien positionnés afin de donner une meilleure sensibilité aux vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), le vélocimètre (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

Ces capteurs peuvent se présenter sous forme de plaquettes pressées sur la surface de la machine (capteur piézo-électrique), captant ainsi les vibrations puis les transmettant sous forme de courant électrique amplifié avec une certaine fréquence. Le courant transmis va être transformé en spectre par un analyseur de fréquences puis comparé à d'autres spectres de la machine sans défaut. Si les spectres captés sont différents de ceux de la machine saine, cela veut dire qu'il y a un défaut dans la machine.

La figure III.6 présente une MAS avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique.

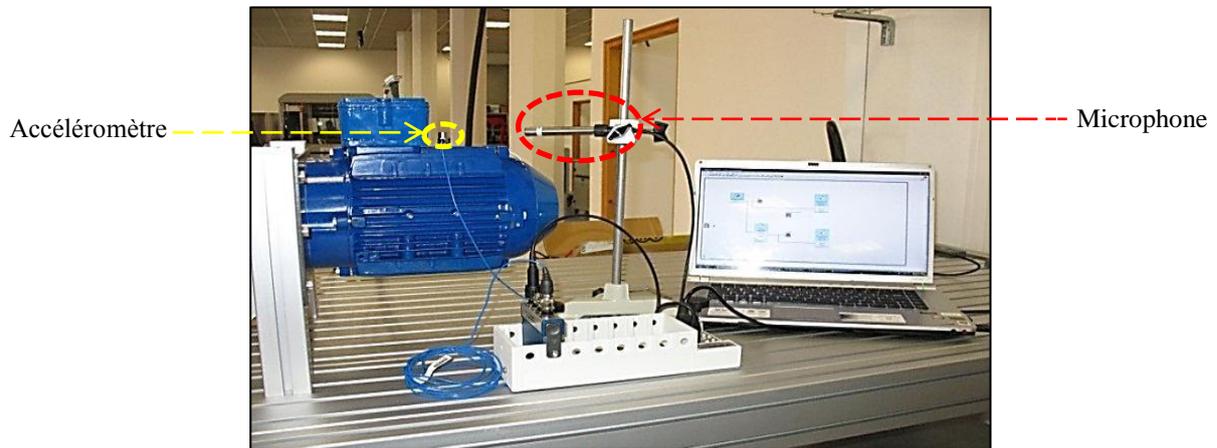


Figure III.6. MAS avec le matériel d'acquisition vibratoire et acoustique

II.4.1.2. Diagnostic par mesure de température

La durée de vie d'un moteur correctement conçu, pour une charge nominale et à température ambiante de 40°C, est de 25000 heures. L'augmentation de la température de 10°C peut réduire sa durée de vie de moitié par la détérioration de son système d'isolement. L'augmentation de la chaleur qui a comme sources les enroulements du moteur et les différentes pertes thermiques (pertes Joule, pertes par courants de Foucault, pertes par hystérésis,..), s'interprète par l'existence d'un défaut dans la machine.

L'approche thermique ou la méthode de diagnostic par la mesure de température consiste à mesurer la valeur de la température de chaque phase de l'enroulement statorique et la comparer avec la valeur limite. Si elle dépasse le taux admissible, on déduit l'existence d'un défaut dans le moteur. Pour mesurer cette température, on utilise des capteurs thermiques (platine 100, ou des thermistances) postés aux différents endroits du moteur (enroulements statoriques, encoches). La figure III.7 montre un capteur de température dans une plaque à bornes [43].

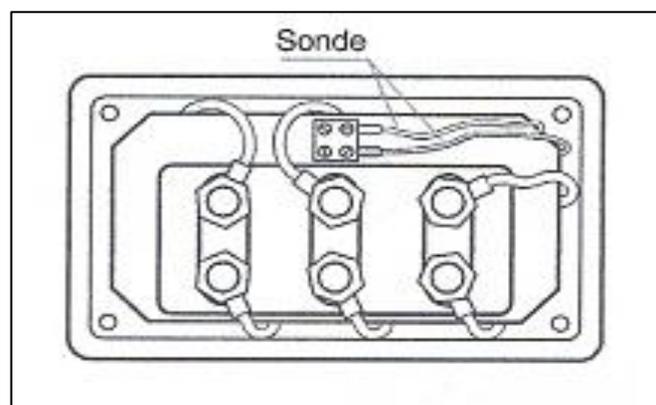
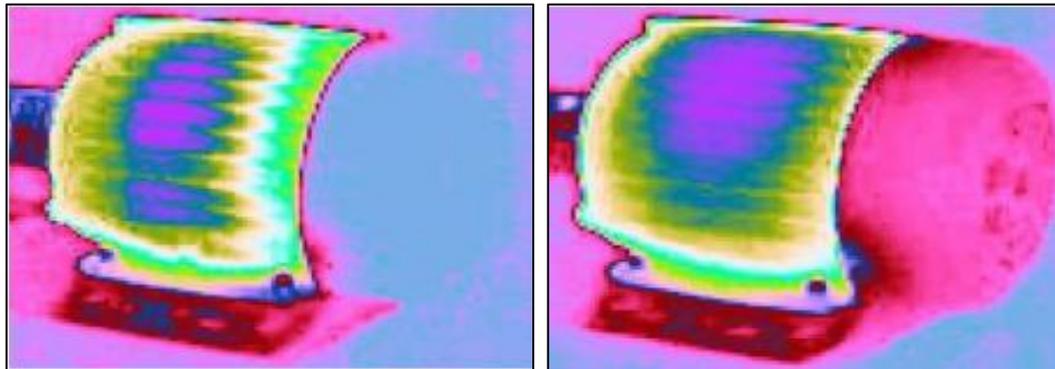


Figure III.7. Capteur de température dans une plaque à bornes

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

Dans l'industrie, il existe des caméras thermiques qui enregistrent l'intensité du rayonnement dans la partie infrarouge du spectre électromagnétique, et la convertit en image visible [44].



a) Moteur sain

b) Moteur en défaut avec 40% court-circuit de la bobine d'une phase

Figure III.8. Image colorée infrarouge thermique

III.4.2. Diagnostic chimiques

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge.

L'air est tiré du moteur, à travers le tube, vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulements est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [45].

III.4.2.1. Diagnostic par l'analyse des lubrifiants

L'analyse des lubrifiants consiste à réaliser des essais physico-chimiques pour déterminer la qualité des huiles, graisses ou fluides hydrauliques. Les lubrifiants se dégradent sous l'action de la chaleur, de l'usure des organes ou par contamination du milieu ambiant (poussières, fuite d'eau, ...). L'analyse de lubrifiants permet de déceler la présence anormale d'eau, l'éventuelle perte de viscosité du produit, ou encore la présence de métaux d'usure [46].

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

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

III.4.3. Techniques magnétiques et électriques

III.4.3.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial

Pour une machine idéale, la valeur du flux magnétique axial (au niveau de l'arbre) est nulle. Mais en pratique, cette valeur n'est pas atteinte à cause des défauts de fabrication ou le non homogénéité des sections des barres rotoriques. Ces problèmes produisent un flux de dispersion axial (flux magnétique de fuites) qui peut être utilisé pour la détection des différents défauts qui surgissent dans le moteur asynchrone tels que:

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

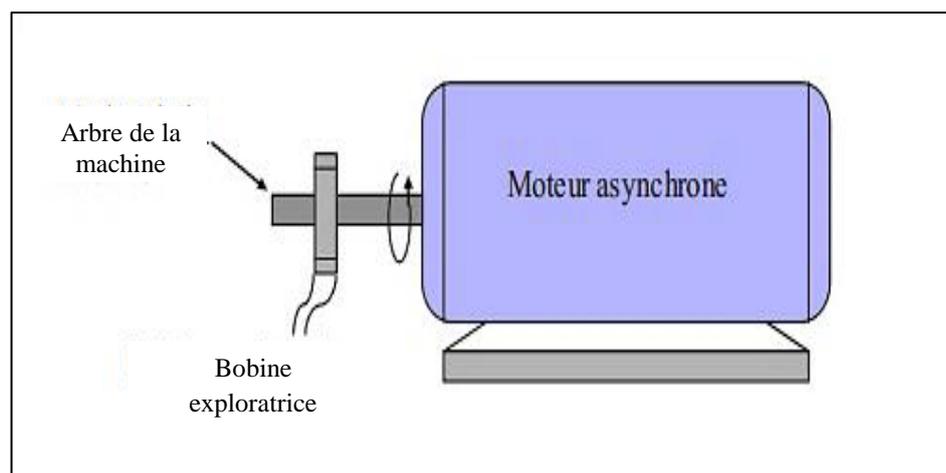


Figure III.9. Bobine exploratrice pour la mesure du flux de fuite axial

Une ou plusieurs bobines exploratrices sont placées symétriquement autour de l'arbre où elles permettent de détecter le flux de fuites axial (figure III.9). Ces bobines sont le siège de tensions induites par le flux de fuites. Les tensions sont captées et analysées, puis comparées à celles d'une machine saine [45].

Dans une machine électrique tournante, le flux de fuite est créé par différents éléments de la machine telle qu'il est montré sur la figure ci-dessous [47].

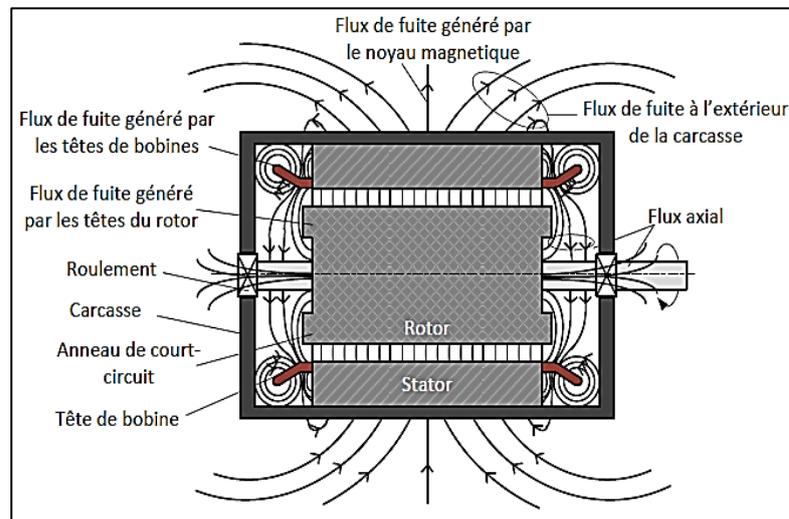


Figure III.10. Flux de dispersion

D'après la répartition des lignes de champ, on peut décomposer le champ extérieur en deux parties appelées champs externes axial et radial (figure III.11). Ces deux champs se combinent pour former le champ de dispersion. Le flux de dispersion peut donner une information sur la présence d'un défaut, parfois la localisation de celui-ci.

Ces méthodes sont simples à mettre en œuvre. Elles consistent à disposer un capteur à la périphérie du moteur et de récupérer le signal du champ de fuite [48]. Or, selon la position du capteur, le champ mesuré n'émane pas forcément du même endroit, et ne résulte, par conséquent, pas forcément du même phénomène physique.

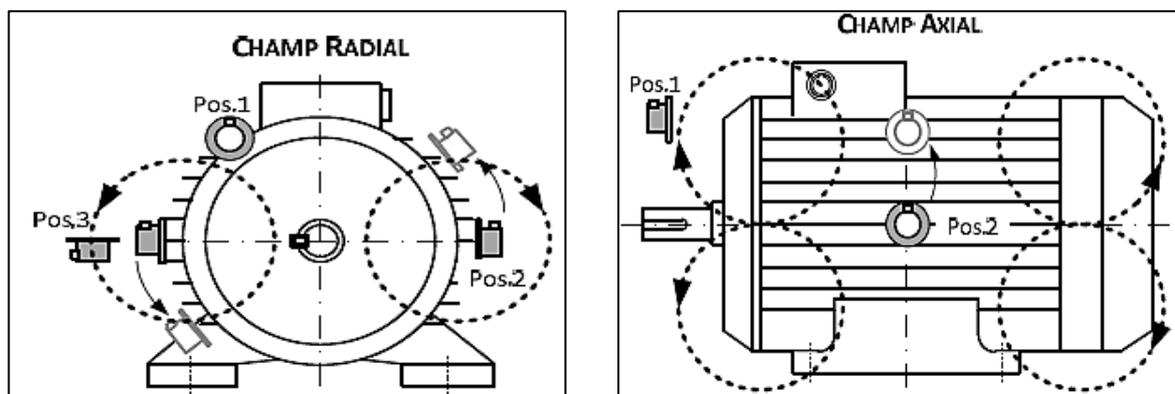


Figure III.11. Champs radial et axial dans la MAS

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

III.4.3.2. Diagnostic par l'analyse du courant statorique

L'analyse spectrale du courant statorique consiste à analyser le courant dans le domaine fréquentiel. Le but de son analyse est de pouvoir détecter et identifier l'élément défectueux. L'intérêt de cette méthode réside dans la simplicité du capteur utilisé. En effet, la mesure du courant puis son traitement est plus simple qu'une analyse de la vitesse ou des vibrations. La figure ci-dessous présente un schéma synoptique du principe de cette méthode [49].

Cette méthode permet de suivre les harmoniques produites par le défaut, sachant que ces harmoniques varient en amplitude et en fréquence avec l'état de charge et le degré de sévérité du défaut. Elle est appliquée sans interrompre le fonctionnement de la machine ce qui facilite beaucoup la surveillance de celle-ci. Le spectre du courant dans le cas où la machine est saine, contient l'harmonique fondamental et ceux d'encoches rotoriques ainsi que d'autres harmoniques avec de faibles amplitudes. Par contre, on observe l'apparition d'autres harmoniques lorsqu'une barre est rompue ou lorsqu'il s'agit d'un défaut d'excentricité. La présence de ces harmoniques à des amplitudes élevées serait révélatrice de l'existence de l'un de ces deux défauts.

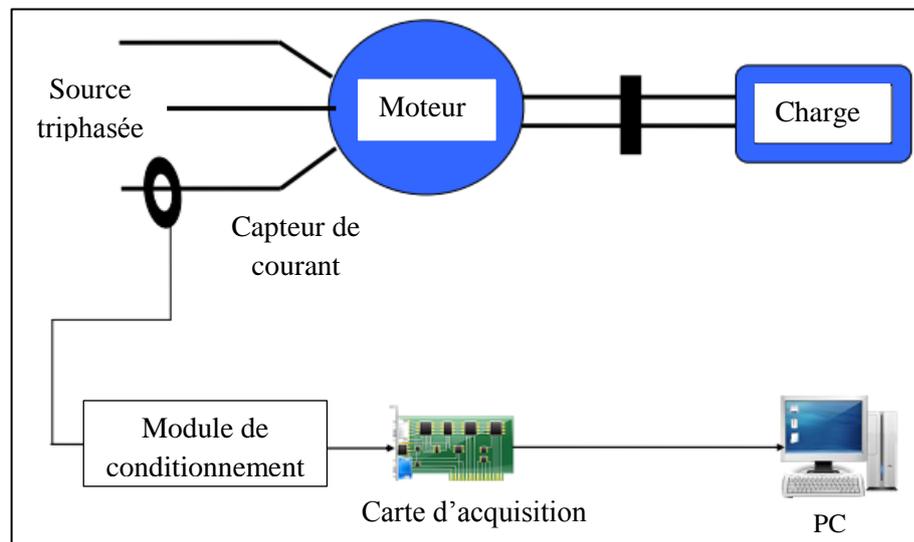


Figure III.12. Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

L'analyse des courants statoriques dans le domaine fréquentiel reste la méthode la plus couramment utilisée, car le spectre résultant contient une source de renseignement sur la majorité des défauts électriques et magnétiques pouvant apparaître au sein d'une machine asynchrone.

III.5. Techniques de traitement du signal

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

Il est possible de classer les techniques de traitement du signal selon ces trois classes [50]:

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

III.5.1. Analyse temporelle

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

III.5.2. Analyse fréquentielle

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

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

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

III.5.3. Analyse temps-fréquence

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

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

III.6. Quelques fréquences caractéristiques de quelques défauts

III.6.1. Défauts du stator

Les composantes fréquentielles à détecter dans le flux axial sont données par:

$$f_{cs} = \left(k \pm n \frac{1-g}{p} \right) f_s \quad (\text{III.1})$$

Où p est le nombre de paires de pôles, f_s est la fréquence d'alimentation électrique, $k = 1, 3, \dots, n = 1, 2, \dots, (2p-1)$ et g est le glissement.

III.6.2. Défauts du rotor

III.6.2.1. Détection d'une barre cassée

Les fréquences caractéristiques des défauts rotoriques sont données par:

$$f_{cbr} = f_s \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1 - g) \pm g \right] \quad (\text{III.2})$$

Où $\left(\frac{k}{p} \right) = 1, 3, 5, \dots$

III.6.2.2. Indicateurs d'excentricité

Les recherches effectuées sur ce type de défaut ont permis de définir 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:

$$f_{ecc} = f_s \left[1 \pm k \left(\frac{1-g}{p} \right) \right] \quad (\text{III.3})$$

Où $k = 1, 2, 3, \dots$

III.6.3. Défauts de roulements

Suivant l'emplacement géométrique du défaut dans le roulement, nous pouvons distinguer les types de défauts suivants [20]:

- Défaut de bague extérieure,

- Défaut de bague intérieure,
- Défaut de billes,
- Défaut de cage.

La figure ci-dessous montre les différentes parties d'un roulement à billes.

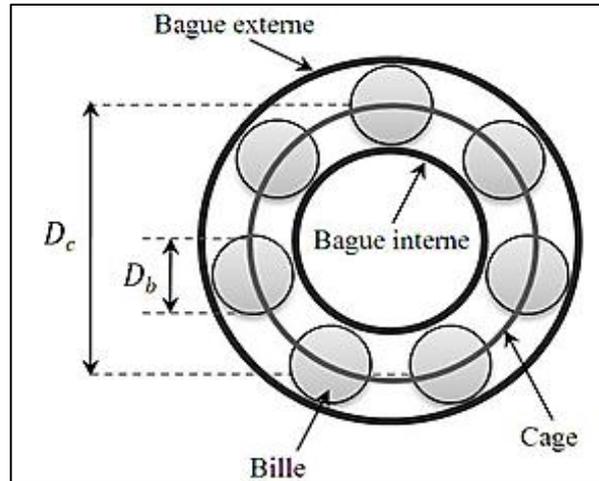


Figure III.13. Roulement à billes

Où

D_b : Diamètre d'une bille,

D_c : Diamètre de la cage,

β : Angle de contact de la bille avec les bagues,

N_b : Nombre de billes.

Chaque type de défauts a sa propre signature et est caractérisé par une fréquence fondamentale, qui peut être calculée à partir de la structure, des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation de l'arbre. En analyse vibratoire, il est donc possible d'observer certaines bandes de fréquences et d'identifier le type de défaut.

Les expressions de ces fréquences caractéristiques sont données comme suite:

➤ Défaut de bague externe: $f_{ex} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right)$ (III.4)

➤ Défaut de bague interne: $f_{in} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right)$ (III.5)

➤ Défaut de bille: $f_{bi} = \frac{D_c}{2D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta\right)$ (III.6)

➤ Défaut de cage: $f_{ca} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right)$ (III.7)

Tel que f_r c'est la fréquence de rotation du rotor.

Conclusion

Nous nous sommes intéressés, dans ce chapitre, au problème du diagnostic des machines électriques et plus précisément des machines asynchrones. Alors, on a présenté les notions de base concernant le diagnostic dans le domaine industriel. De plus, on a donné un aperçu sur les méthodes ainsi que les techniques principales adoptées pour le diagnostic des MAS. Enfin, on a terminé ce chapitre par une présentation de quelques fréquences caractéristiques de quelques défauts.

Chapitre IV

Diagnostic des défauts d'une MAS à cage d'écureuil

Chapitre IV

Diagnostic des défauts d'une MAS à cage d'écureuil

Introduction

Ce chapitre va être consacré à la mise en œuvre des modèles développés, sous environnement Matlab, pour la modélisation et le diagnostic d'une machine asynchrone (MAS) à cage d'écureuil et à pas raccourci. Dans ce but, des modèles numériques basés sur la méthode des éléments finis ont été élaborés.

IV.1. Objectif de l'étude

Le but de cette étude est le diagnostic des défaillances d'une MAS à cage d'écureuil, par l'analyse de ses grandeurs électromagnétiques.

Tout d'abord, on va modéliser cette machine qui est à pas raccourci. Cette modélisation va être effectuée en régime harmonique, dans le cas linéaire et en considérant une source de courant (attaque courant).

Nous allons appliquer la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation aux dérivées partielles (EDP), formulée en terme du potentiel vecteur magnétique A , qui caractérise le comportement électromagnétique de la machine à étudier. Après détermination des valeurs nodales de ce potentiel, nous pouvons déduire les valeurs de l'induction et du flux magnétiques. De plus, on peut déterminer les valeurs des courants induits.

On va appliquer le modèle électromagnétique développé lorsque la machine est saine et lorsqu'elle est défectueuse. Une comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas va être effectuée.

IV.2. Description de la machine à étudier

La machine à étudier est une MAS à pas raccourci comportant des encoches à double couches et d'autres à une seule couche. Une vue éclatée de cette machine est donnée par la figure IV.1 [23].

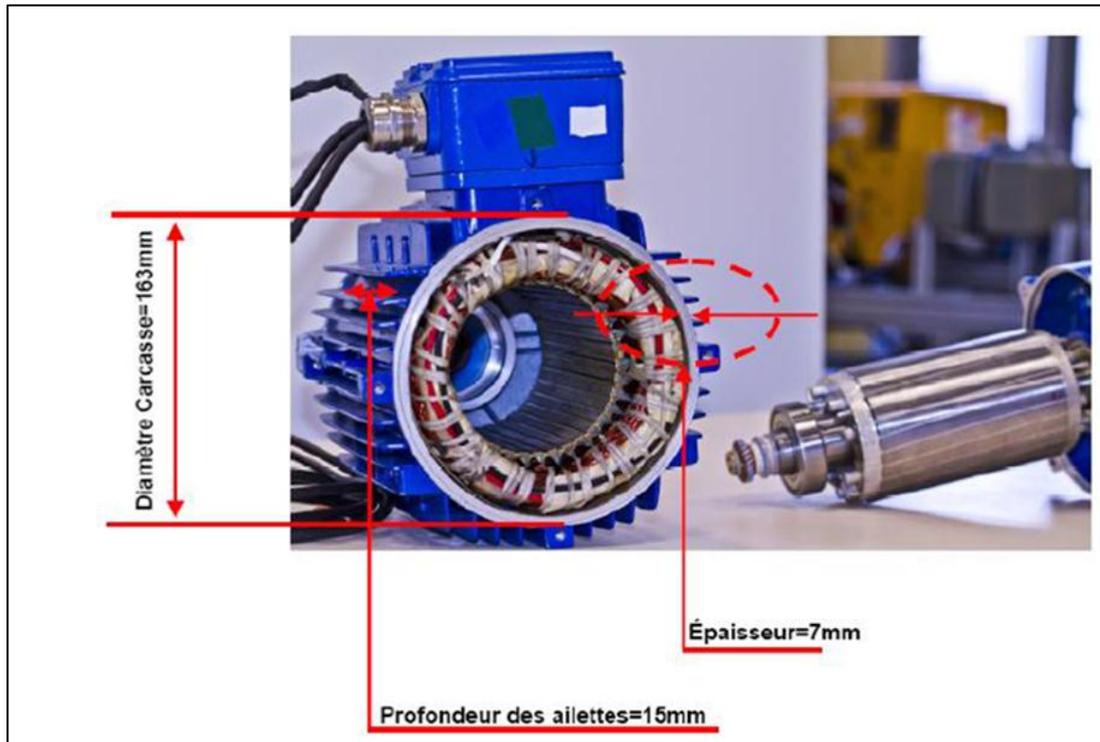


Figure IV.1. Vue éclatée de la MAS à étudier

IV.2.1. Caractéristiques géométriques

La configuration géométrique ainsi que les différentes parties constituant la MAS à étudier sont présentées dans la figure IV.2. Par contre, ses différentes caractéristiques sont résumées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Caractéristiques de la machine à étudier

Caractéristiques	Valeurs	Unités
Diamètre extérieur du stator	150	mm
Diamètre de l'entrefer	89.44	mm
Longueur active de la machine	130	mm
Puissance nominale	5000	W
Fréquence électrique	50	Hz
Nombre d'encoches statoriques	36	
Nombre de barres rotoriques	28	
Type de couplage	Etoile	
Nombre de phases	3	
Nombre de paires de pôles	2	

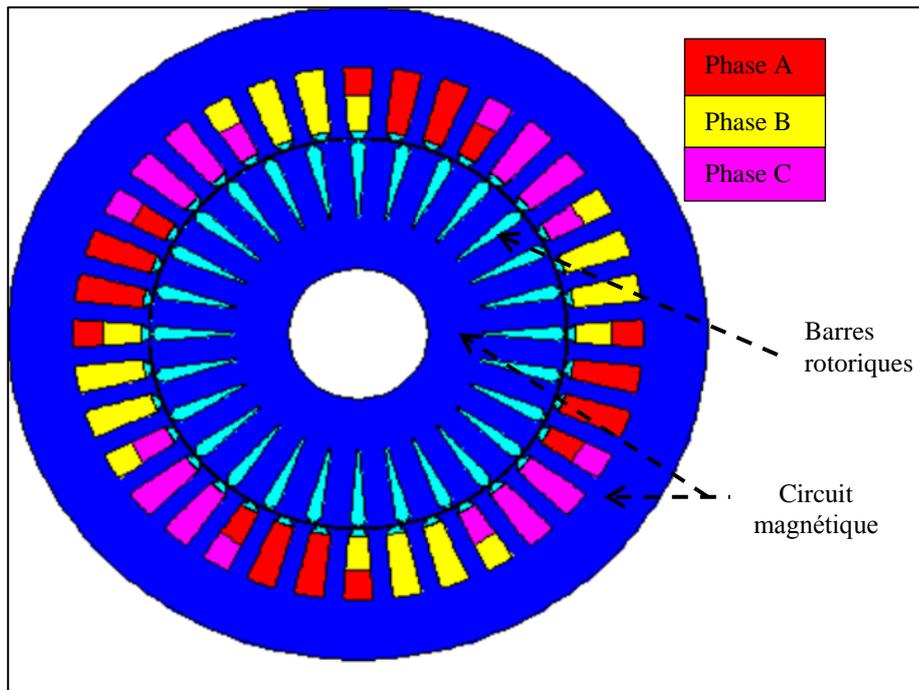


Figure IV.2. Différentes régions constituant la MAS à étudier

IV.2.2. Caractéristiques physiques

Cette machine est constituée de:

- Matériaux ferromagnétiques doux supposés linéaires et ayant une perméabilité relative $\mu_r=1000$,
- Bobinage parcouru par un courant de densité supposée uniformément répartie dans la section des conducteurs.

La répartition des bobines de chacune des trois phases, dans les encoches statoriques, est présentée dans la figure IV.3. On peut bien remarquer qu'il y a des encoches qui comportent deux côtés de bobines différentes (deux phases différentes) et d'autres qui comportent un seul côté (une seule phase). De plus, c'est un bobinage à pas raccourci.

Le circuit magnétique du stator est constitué d'un empilement de tôles ferromagnétiques. Le laminage est de type M800-65A [23]. Il est caractérisé par la variation de l'induction en fonction du champ magnétique, donc par la courbe caractéristique $B(H)$, qui est représentée sur la figure IV.4. Le circuit magnétique du rotor est constitué, lui aussi, par un empilement de tôles de même nature que celles du stator.

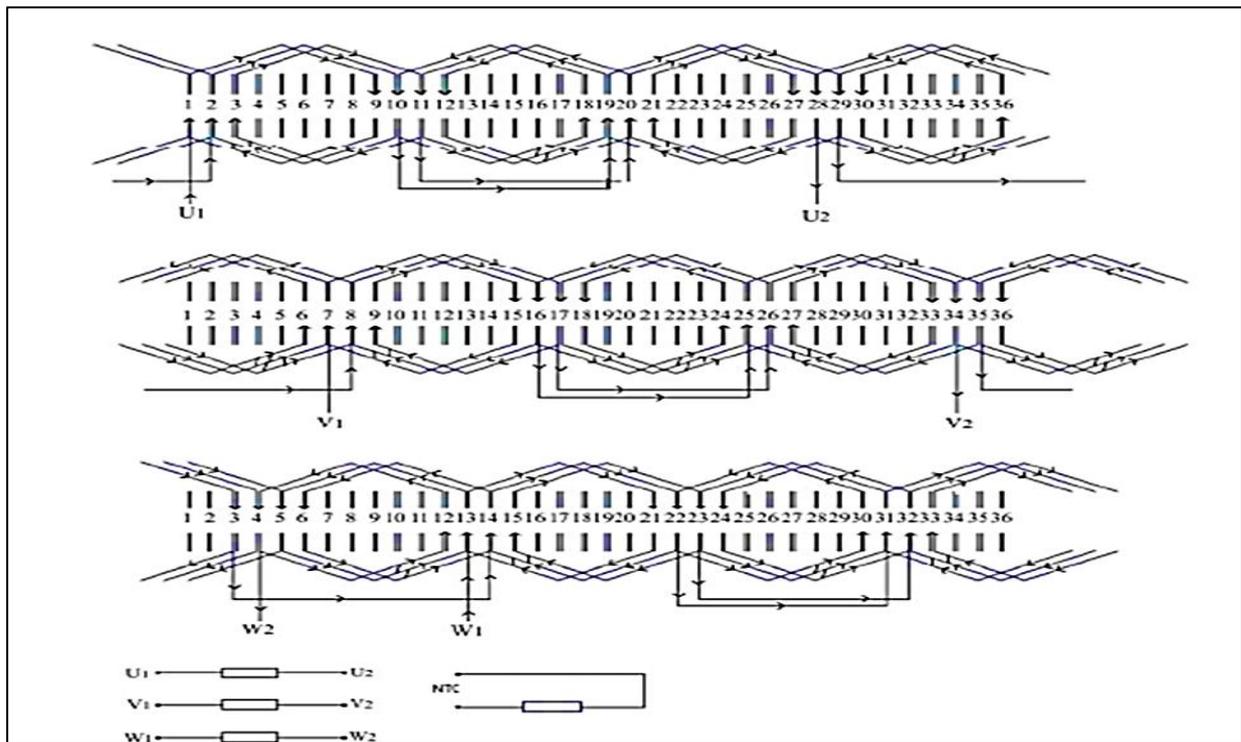


Figure IV.3. Bobinage de la MAS à étudier

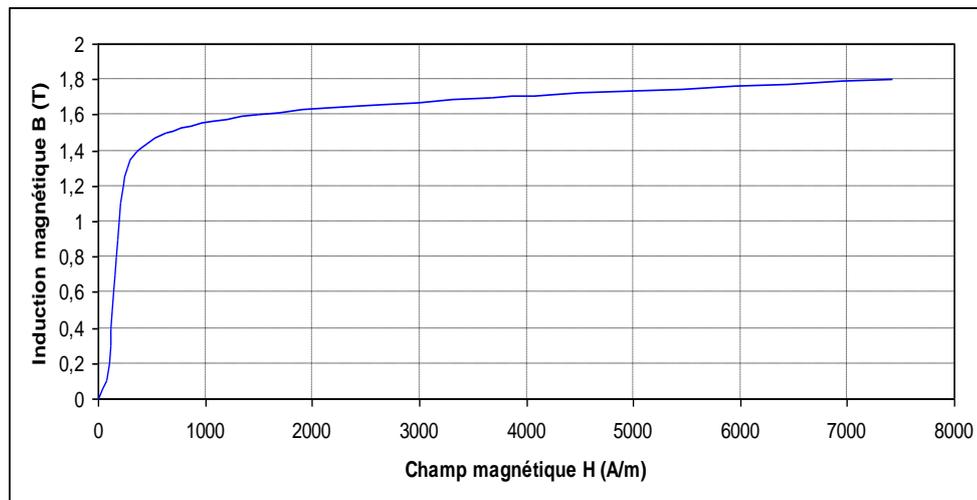


Figure IV.4. Courbe caractéristique $B(H)$ du matériau M800-65A constituant les circuits magnétiques statorique et rotorique

IV.3. Modélisation de la MAS à pas raccourci

En supposant que la MAS est suffisamment long, on peut ramener l'étude au plan xoy. Donc, en bidimensionnelle, le domaine de résolution considéré correspond à la section transversale de la machine. Nous imposons une valeur nulle du potentiel vecteur magnétique sur les frontières du domaine de résolution (conditions aux limites de type Dirichlet: $A=0$ sur la surface externe de la

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

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_{ext} \quad (\text{IV.1})$$

Où:

A : composante suivant z du potentiel vecteur magnétique,

μ : perméabilité magnétique (égale à $\mu_0 \mu_r$ dans le matériau ferromagnétique et μ_0 ailleurs),

σ : conductivité électrique (égale à 10^5 dans les barres rotoriques et zéro ailleurs),

t : temps,

J_{ext} : la densité de courant imposée dans les encoches statoriques.

La figure ci-dessous présente l'organigramme regroupant les différentes étapes du code de calcul électromagnétique développé.

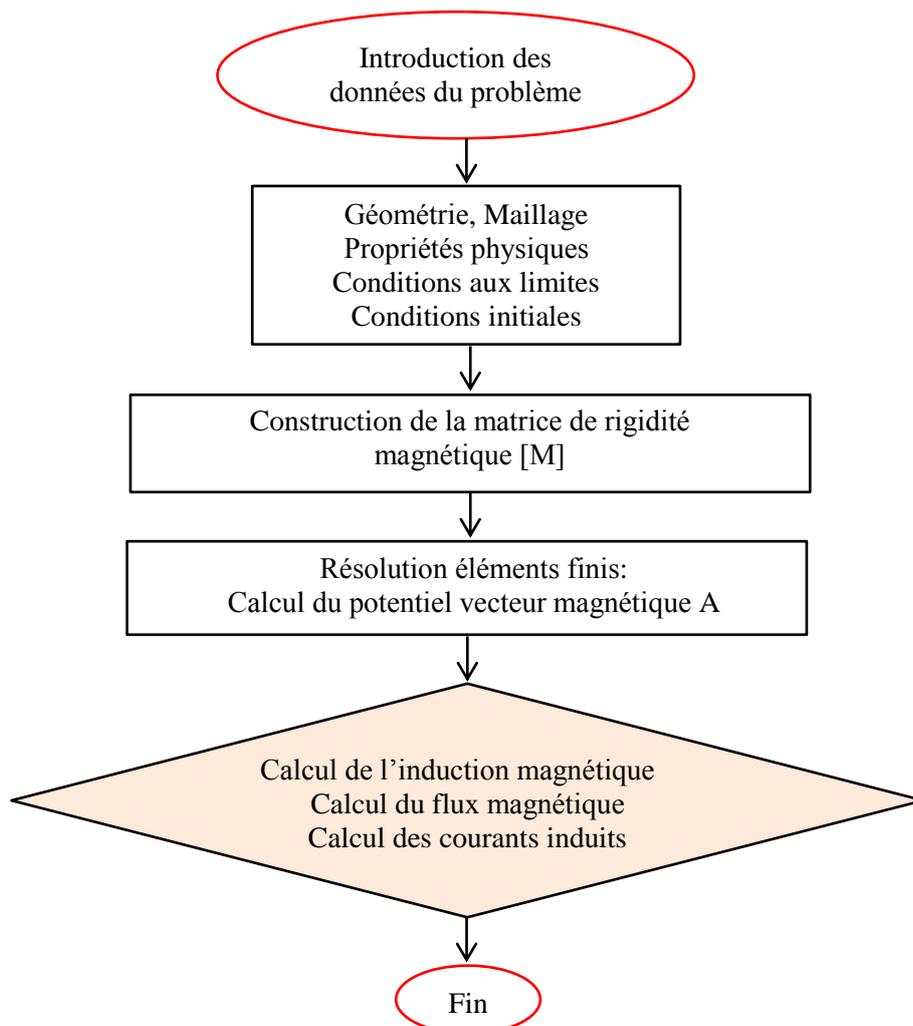


Figure IV.5. Organigramme du code de calcul électromagnétique développé

Les deux figures ci-dessous représentent, respectivement, la configuration géométrique de la machine étudiée ainsi que le maillage éléments finis adopté pour son étude.

Ce maillage est généré par le mailleur automatique du logiciel Matlab. On a très bien affiné le maillage au niveau de l'entrefer. Pour que la solution soit exacte, on doit avoir au moins deux mailles à ce niveau. Les éléments constituant ce maillage sont des éléments triangulaires du premier ordre.

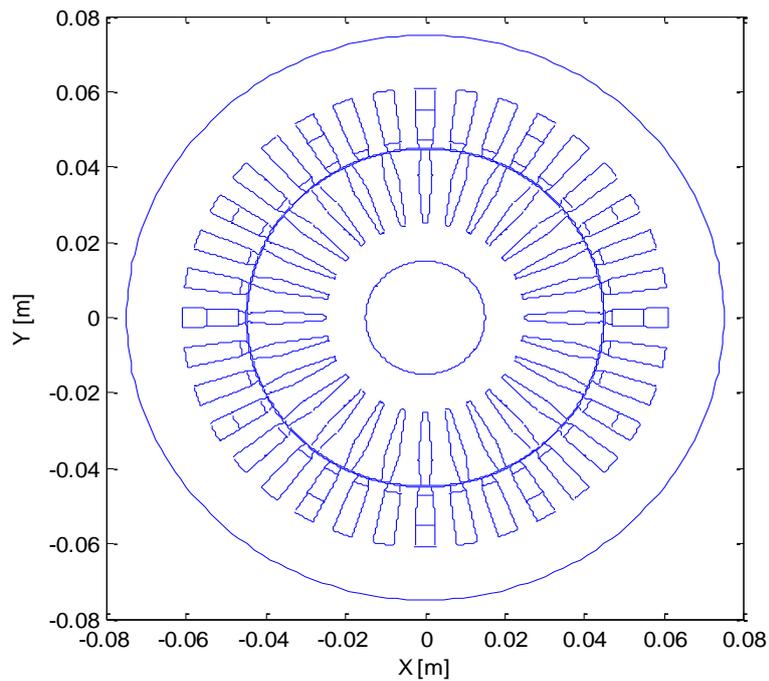


Figure IV.6. Configuration géométrique de la machine étudiée

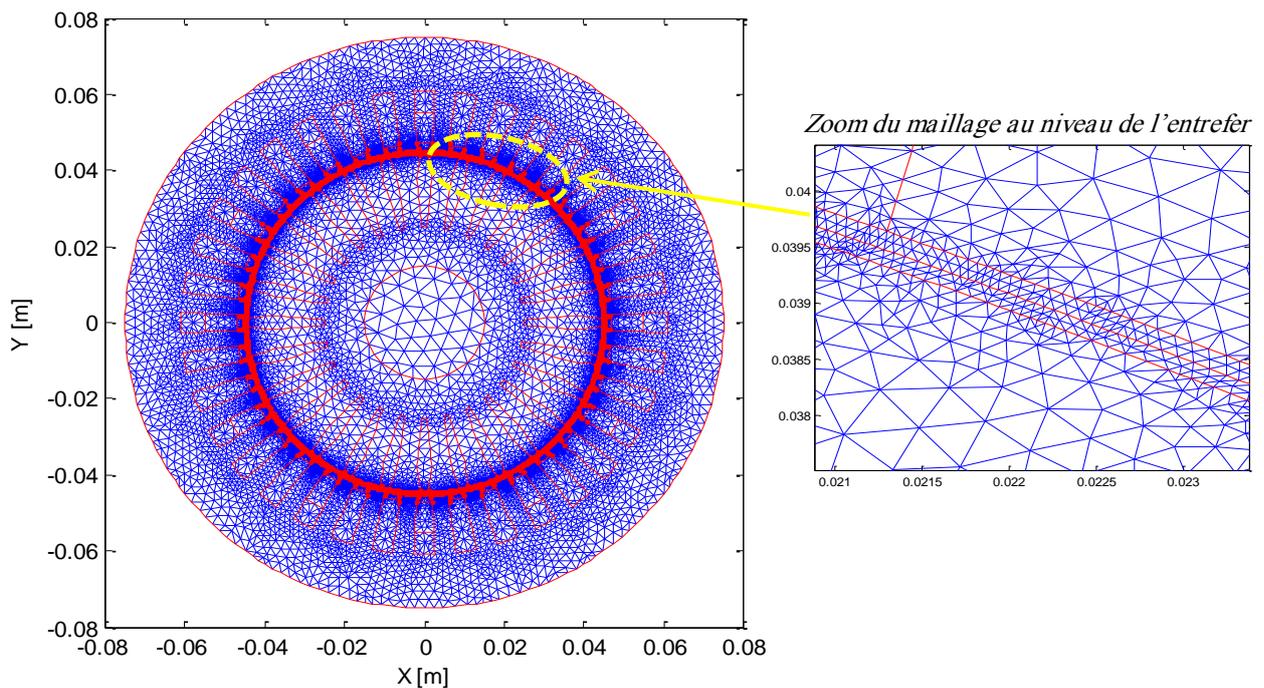


Figure IV.7. Maillage éléments finis adopté à cette étude

Cette étude a été réalisée en régime harmonique (quasi statique), donc la détermination de la répartition des courants statoriques ainsi que la résolution des équations du champ sont à effectuer à un temps bien donné.

La solution en potentiel vecteur magnétique A est obtenue dans chaque nœud du maillage éléments finis du domaine d'étude, pour un fonctionnement en moteur de la MAS. Le courant absorbé étant égale à 26 A (valeur efficace). La valeur de la perméabilité magnétique relative utilisée a été déterminée à partir de la partie linéaire de la courbe $B(H)$ (figure IV.4).

IV.3.1. Discussion et interprétation des résultats

La figure ci-dessous présente les lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique. On voit clairement que ces lignes sont distribuées dans l'entrefer ainsi que dans les parties ferromagnétique de la MAS. Cette distribution est plus concentrée dans les dents: aux endroits étroites et où l'entrefer est plus petit.

On remarque bien que les lignes équipotentielles circulent à l'intérieur du circuit magnétique seulement. Donc, le champ magnétique est nul à l'extérieur du moteur.

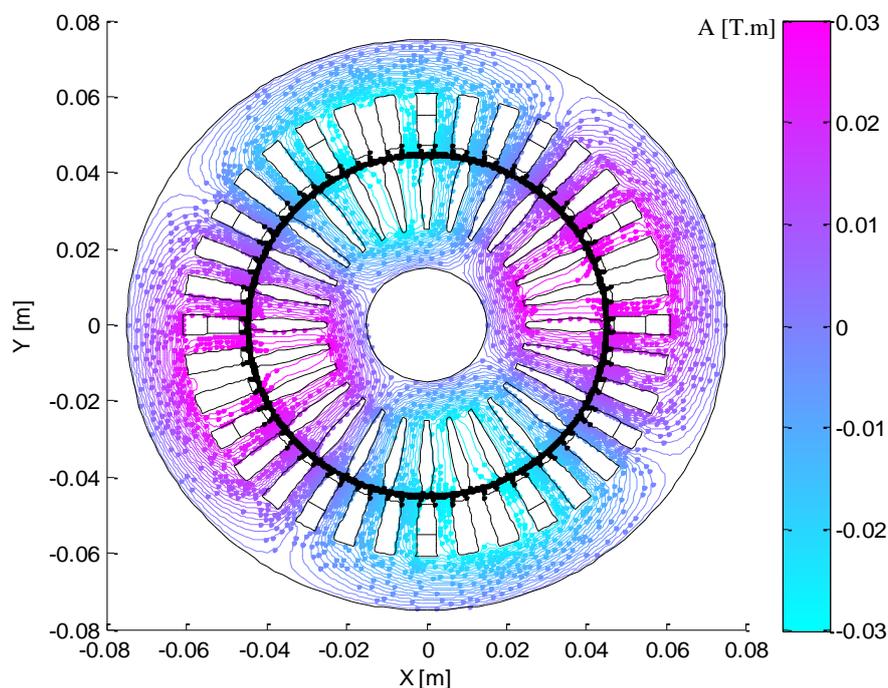
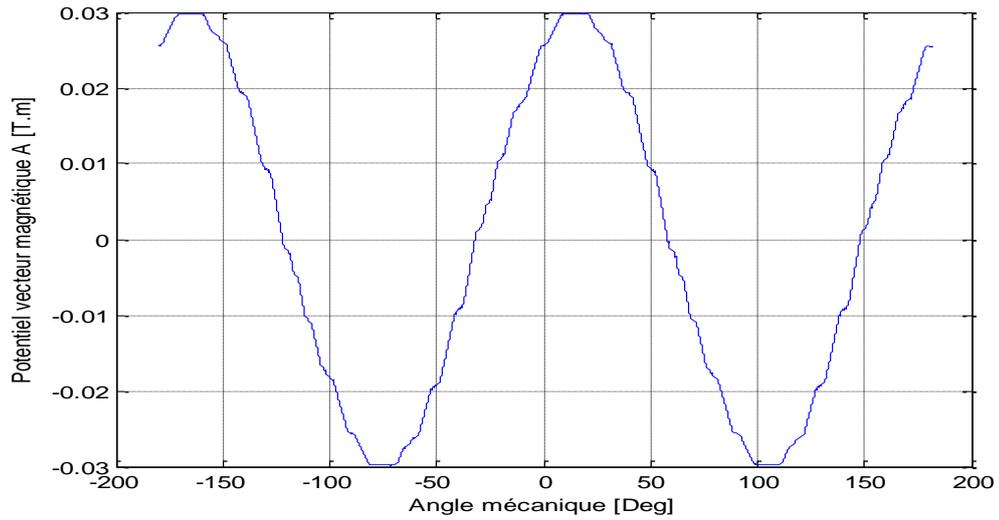
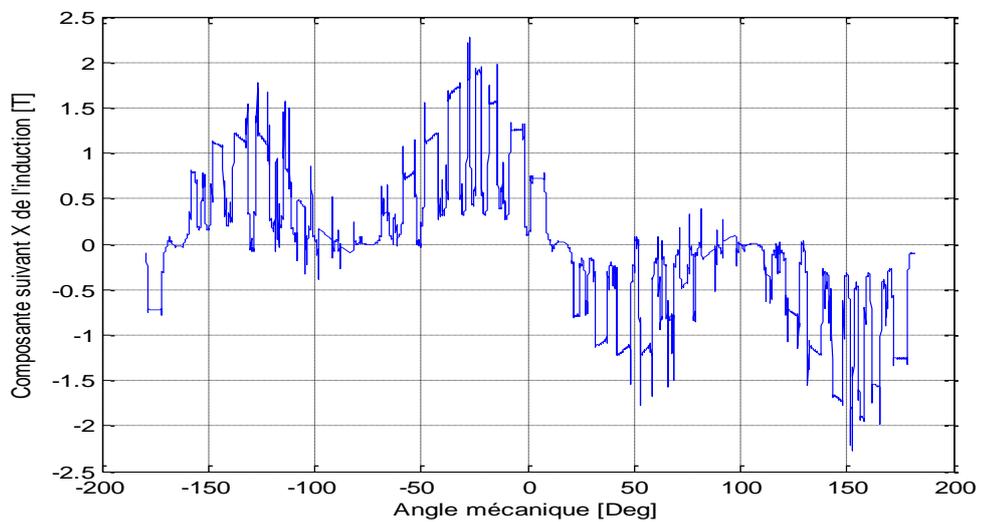


Figure IV.8. Lignes équipotentielles du potentiel vecteur magnétique A

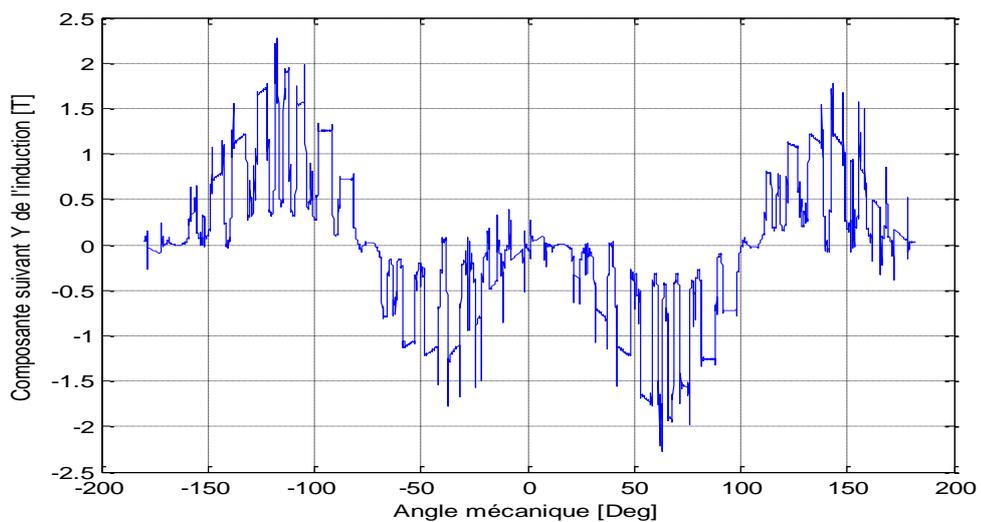
Après calcul du potentiel vecteur magnétique, on a déterminé la distribution de l'induction magnétique ainsi que celle du flux magnétique. Les évolutions de ces grandeurs sont montrées dans les figures ci-dessous.



a) potentiel vecteur magnétique



b) Composante suivant x de l'induction



c) Composante suivant y de l'induction

Figure IV.9. Evolution du potentiel vecteur et des composantes de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer

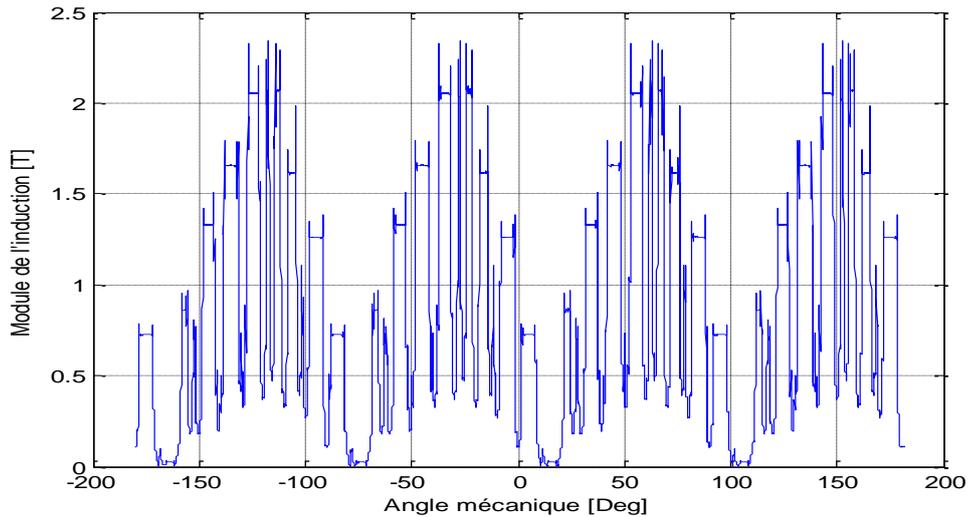


Figure IV.10. Evolution du module de l'induction magnétique suivant un contour dans l'entrefer

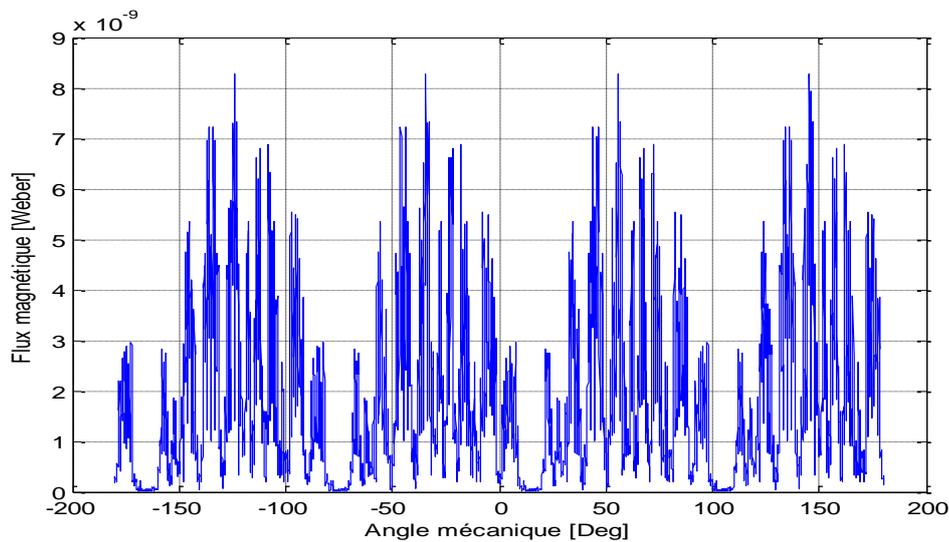


Figure IV.11. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer

A partir de ces figures qui montrent les évolutions du potentiel vecteur, de l'induction ainsi que du flux électromagnétique suivant un contour dans l'entrefer, on peut remarquer qu'elles sont plus importantes aux endroits où il y a plus de concentration des lignes du champ. Les pics constatés reviennent à l'encoche (passage d'une encoche à une dent et d'un point face au circuit magnétique rotorique à un autre face à une barre).

IV.4. Diagnostic des défaillances de la MAS

Dans cette partie, on va créer différents défauts au niveau du stator et du rotor et on va chercher à détecter l'existence de ces défauts. Dans ce but, on va adopter deux techniques de diagnostic: par analyse du flux magnétique et par analyse des courants de barres rotoriques.

IV.4.1. Diagnostic par analyse du flux magnétique

Trois types de défauts vont être considérés: Défaut de rupture de barres rotoriques, défaut d'excentricité et défaut de court-circuit. La procédure à suivre, dans ce cas, est celle présentée dans l'organigramme ci-dessous:

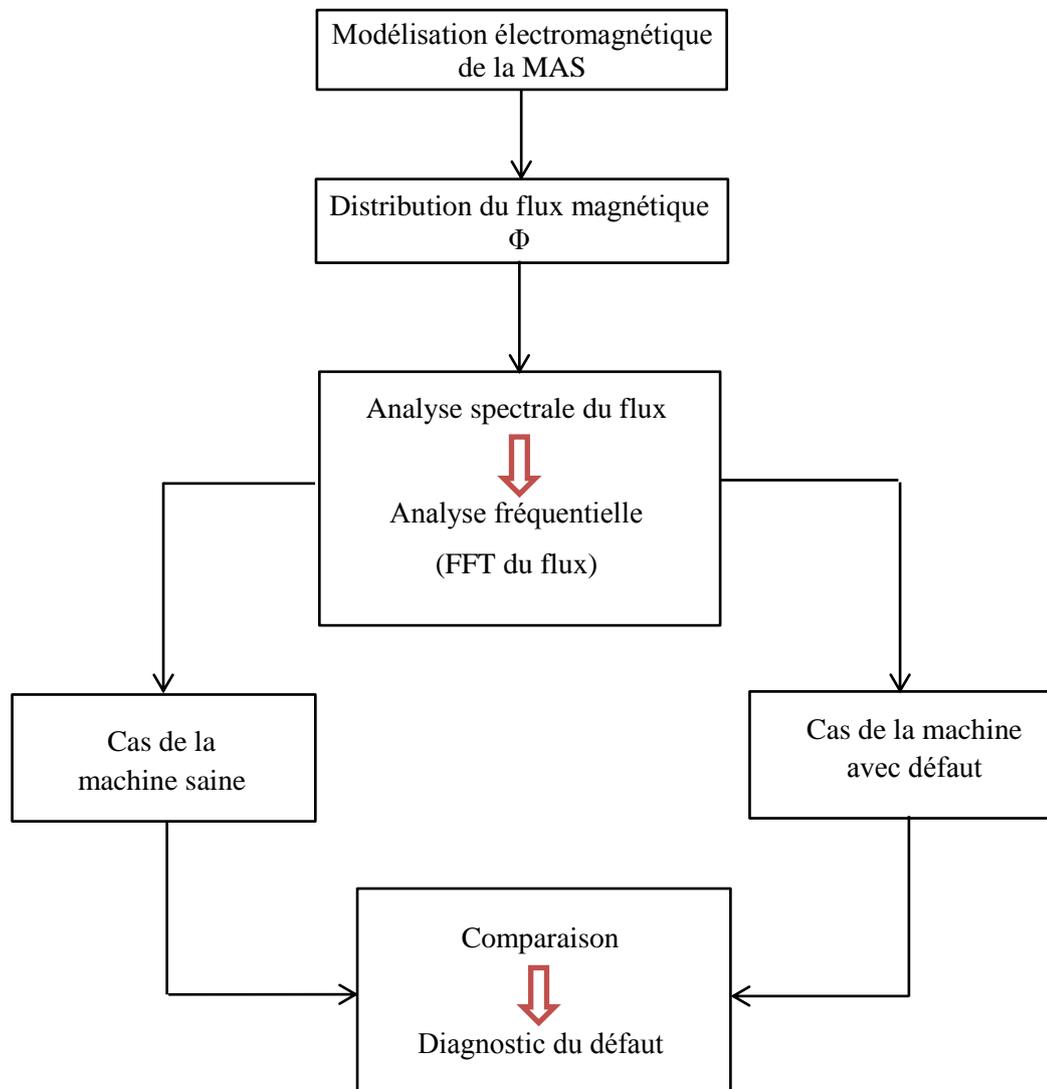


Figure IV.12. Procédure du diagnostic des défauts dans une MAS par analyse du flux magnétique

IV.4.1.1. Défaut de rupture des barres rotoriques

On va considérer deux cas. Dans le premier cas on a une seule barre rotorique cassée tandis que dans le deuxième on a neuf barres cassées.

A. Défaut de rupture d'une seule barre

Les figures ci-dessous représentent respectivement, la configuration géométrique du moteur asynchrone avec une seule barre cassée, l'évolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer ainsi que le spectre fréquentiel correspondant.

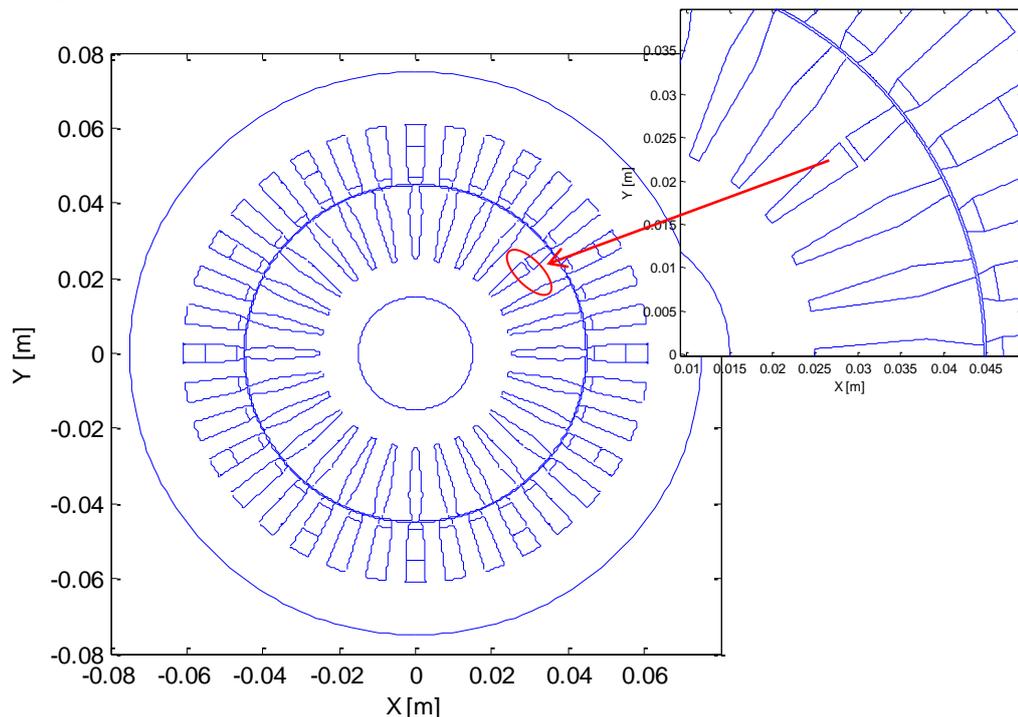


Figure IV.13. Géométrie de la MAS avec rupture d'une seule barre

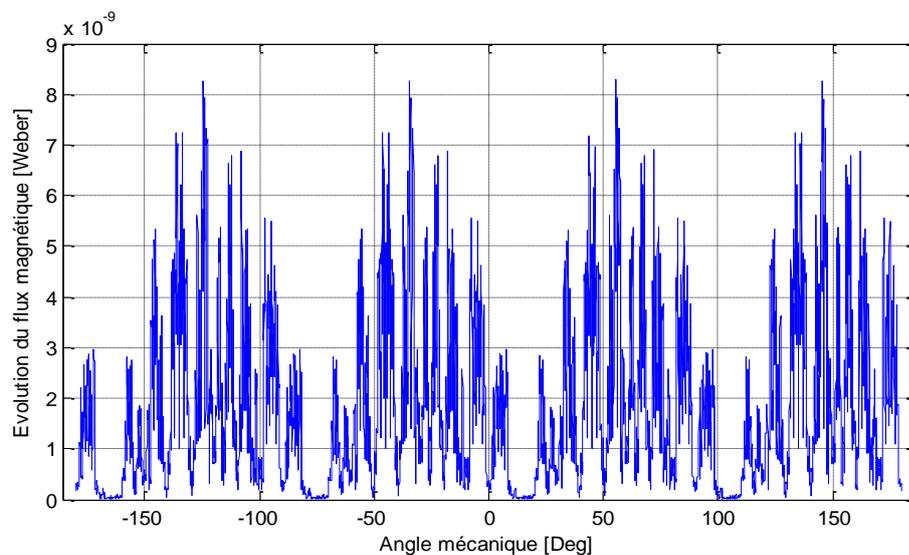


Figure IV.14. Evolution du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer avec rupture d'une seule barre

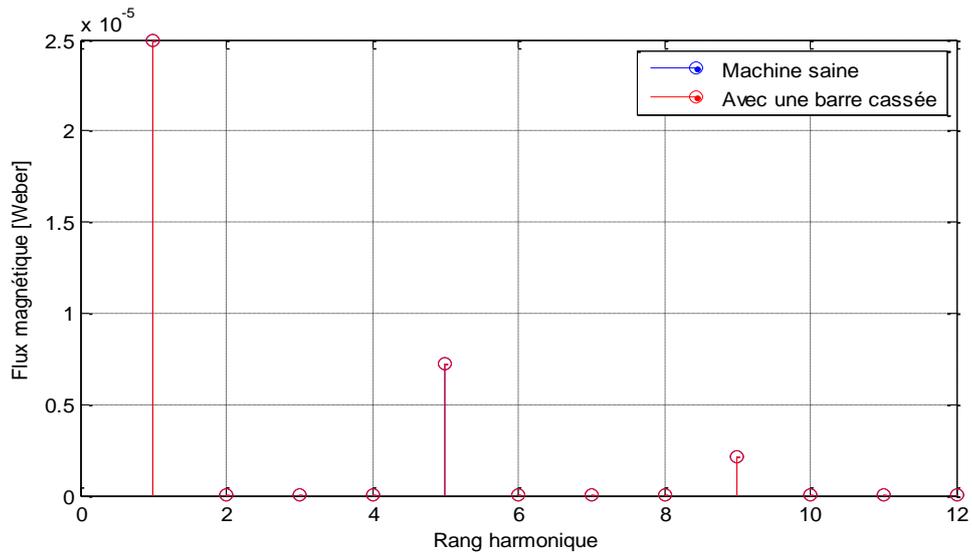


Figure IV.15. Contenu spectral du flux dans l'entrefer avec rupture d'une seule barre

A partir des figures précédentes, on voit clairement qu'il n'y a pas de différence entre le contenu spectral de la machine saine et de celle défectueuse. Cela signifie que la rupture d'une seule barre n'a pas d'effet significatif sur les grandeurs électromagnétiques de la MAS.

B. Défaut de rupture de neuf barres

La figure IV.16 présente la géométrie du moteur asynchrone avec rupture de neuf barres.

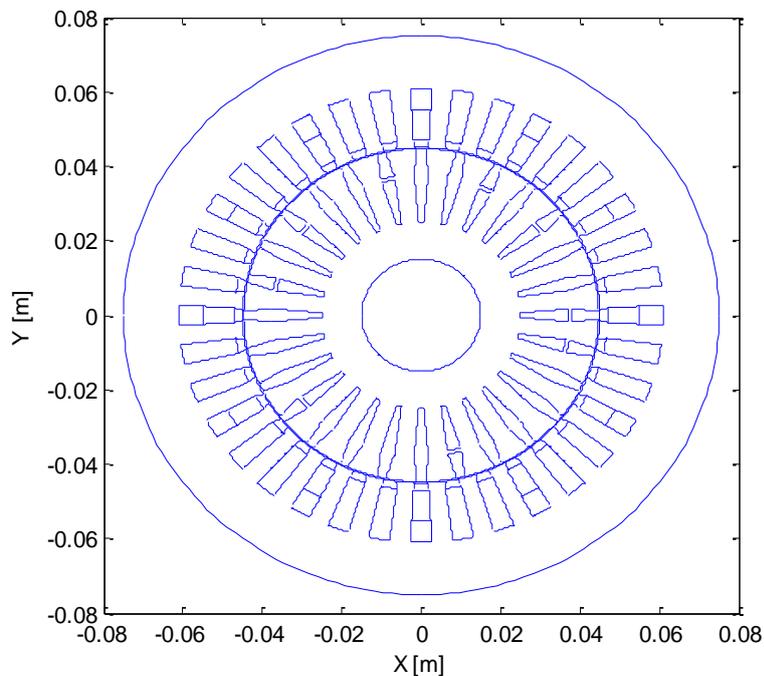


Figure IV.16. Géométrie de la MAS avec rupture de neuf barres

L'évolution du flux magnétique dans l'entrefer ainsi que le contenu spectral correspondant sont donnés, respectivement, par les figures IV.17 et IV.18.

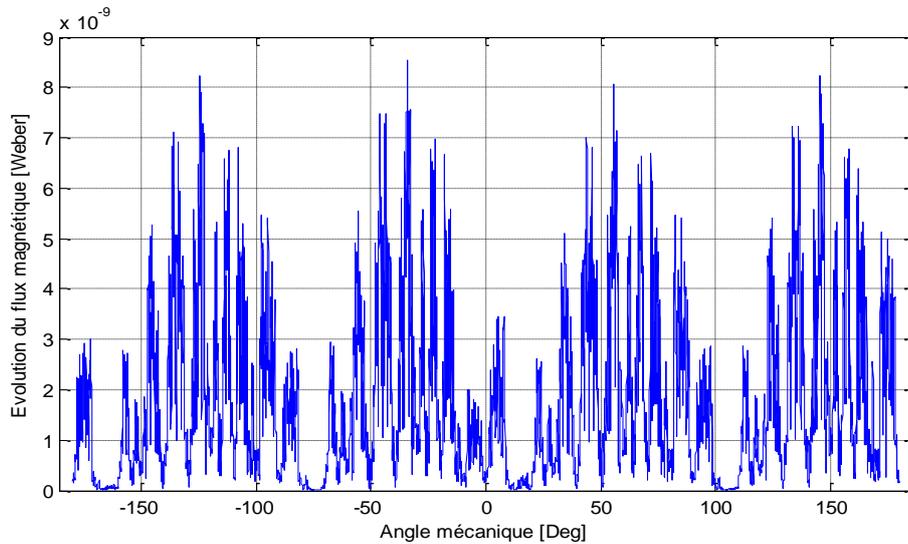


Figure IV.17. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer avec rupture de neuf barres

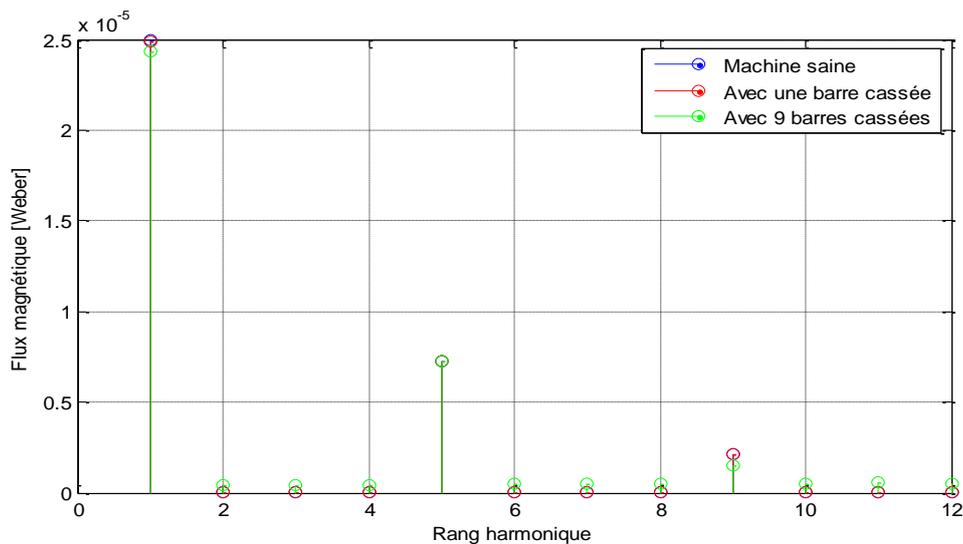


Figure IV.18. Contenu spectral du flux magnétique, avec rupture de neuf barres

Ces résultats montrent bien qu'une rupture de neuf barres a un effet significatif sur la distribution et l'amplitude du flux magnétique. Ceci est bien clair dans le contenu fréquentiel qui montre l'apparition d'autres harmoniques avec des amplitudes faibles (de rang 2, 3, 4...)

D'après ces résultats, on peut conclure que plus on augmente le nombre de barres cassées plus les performances électromagnétiques de la machine diminuent. Donc, le flux magnétique est un bon indicateur de défaut de rupture de barres dans une MAS.

IV.4.1.2. Défaut d'excentricité

Maintenant, on va considérer un autre type de défauts qui est celui de l'excentricité. Cette dernière peut être statique ou dynamique.

A. Excentricité statique

Dans le cas de l'excentricité statique, l'axe du rotor est décalé vers le bas par rapport à celui du stator, comme le montre la figure IV.19.

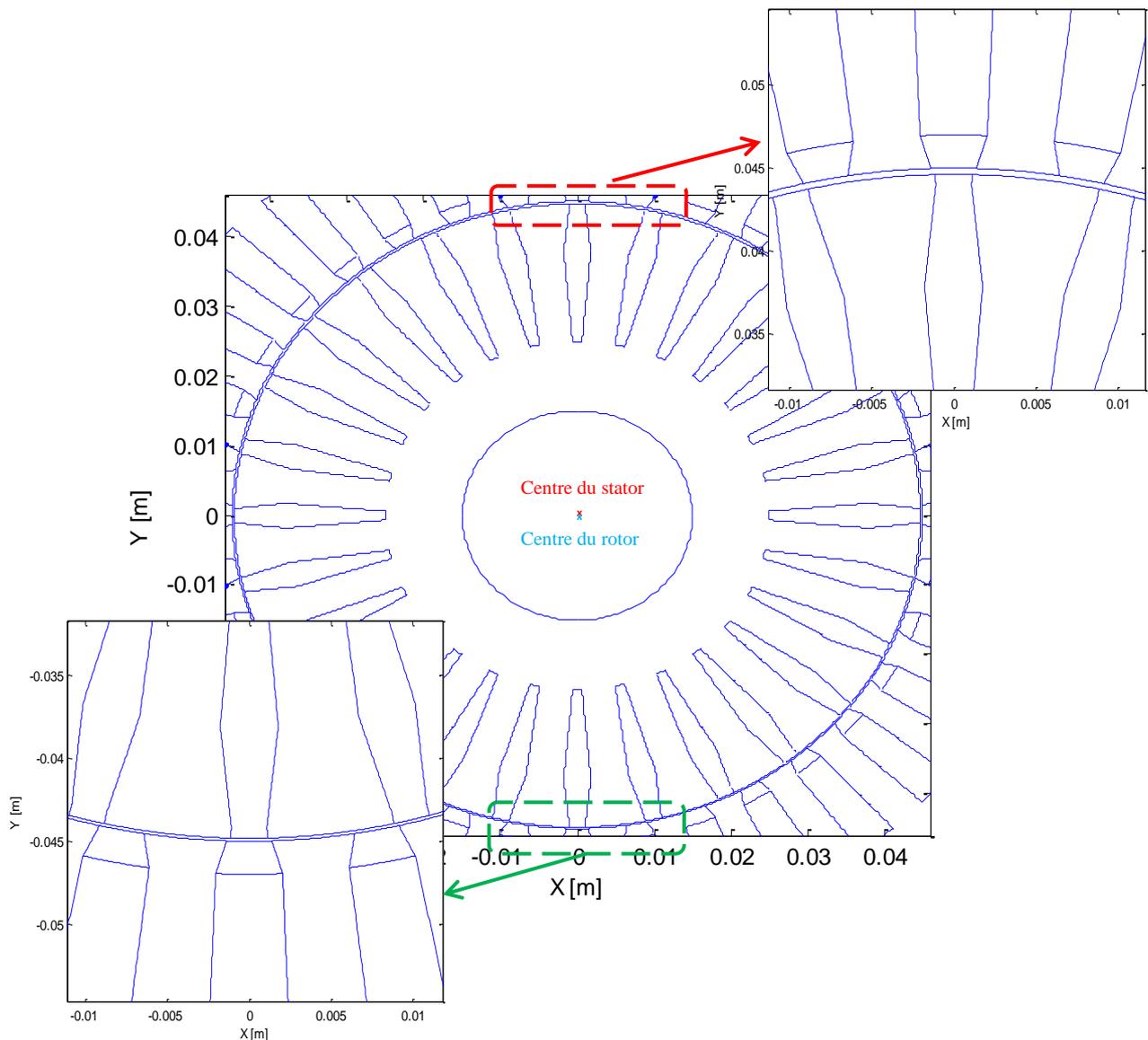


Figure IV.19. Excentricité statique

Les deux figures ci-dessous présentent respectivement, l'évolution du flux magnétique dans l'entrefer ainsi que le spectre fréquentiel correspondant.

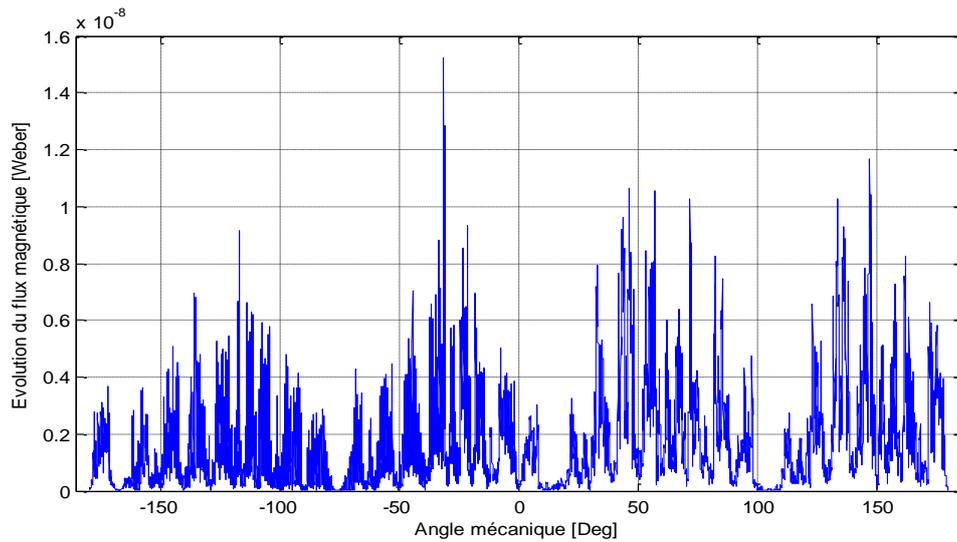


Figure IV.20. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer en présence d'une excentricité statique

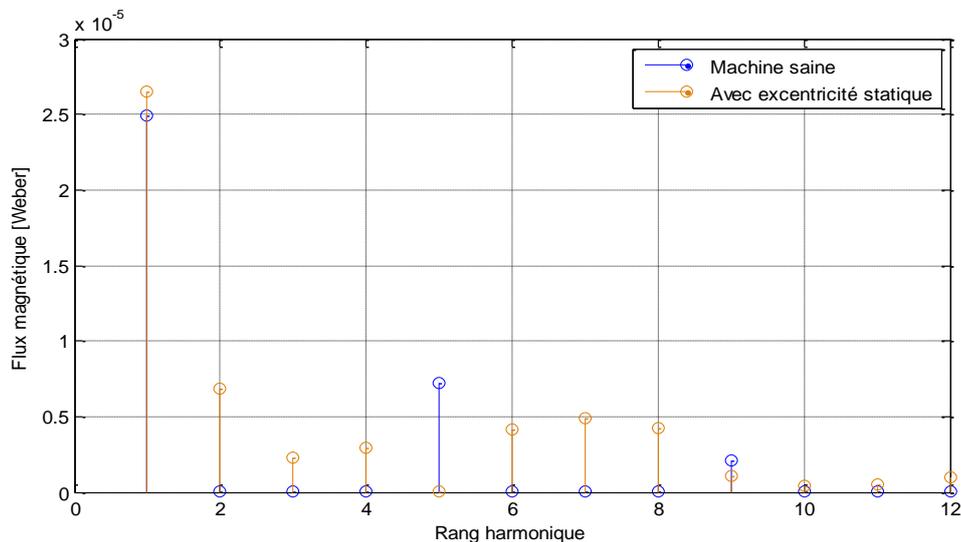


Figure IV.21. Contenu spectral du flux en présence d'une excentricité statique

D'après ces deux figures, on peut constater une non uniformité de la distribution du flux dans l'entrefer (figure IV. 20) qui se traduit par un contenu spectral riche en harmonique (figure IV. 21). Ceci justifie bien l'existence du défaut d'excentricité statique.

B. Excentricité dynamique

Le but de cette partie est d'introduire l'écart dynamique, et pour ce faire nous considérons que le rotor est en rotation, ce qui permet d'observer cette déviation.

La figure IV.22 présente trois positions du rotor par rapport au stator, avec une excentricité dynamique, pour trois temps différents.

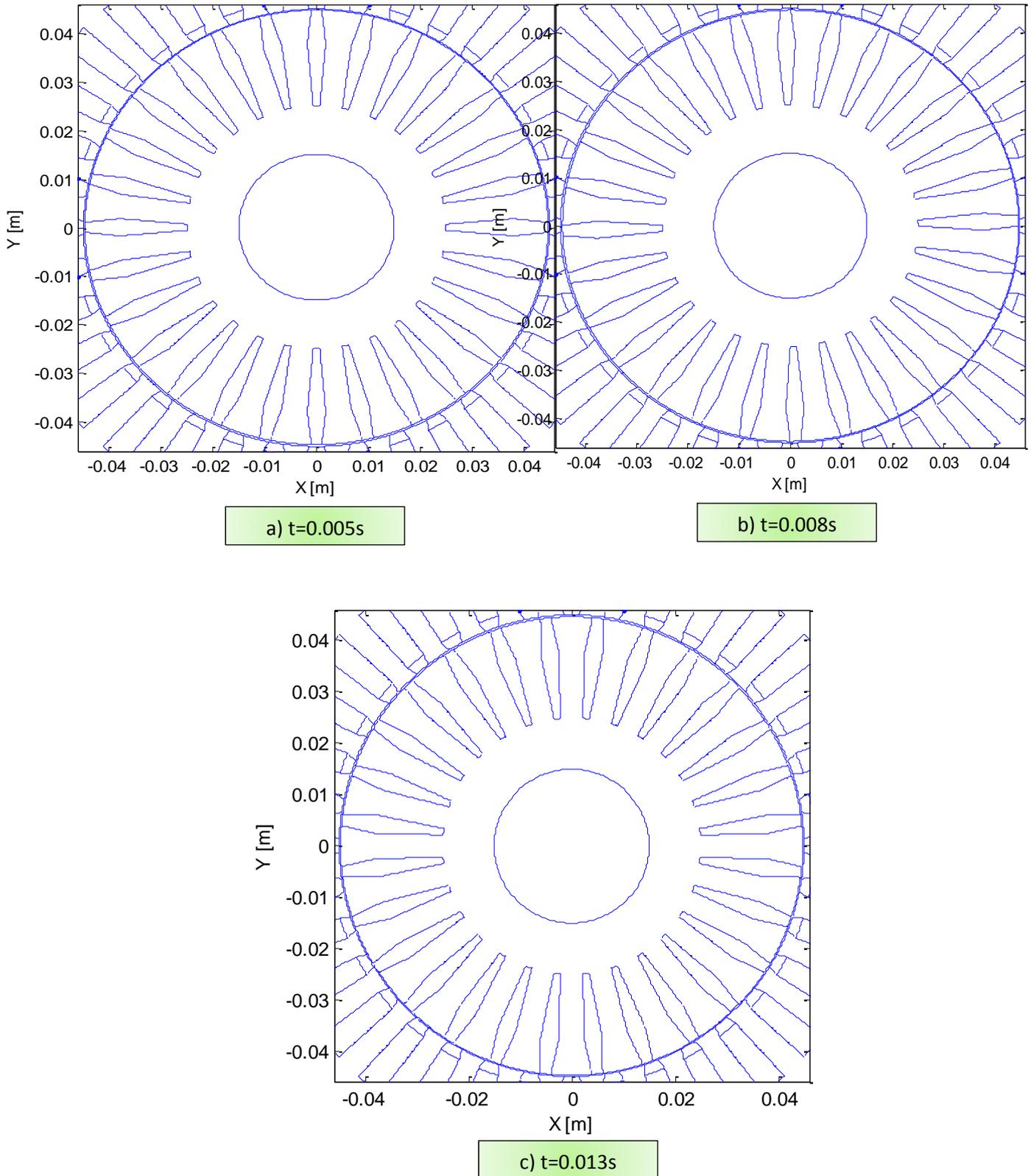


Figure IV.22. Positions du rotor par rapport au stator pour trois temps différents

Les évolutions du flux magnétique suivant un contour dans l'entrefer, pour chacun de ces temps, ainsi que les contenus fréquentiels correspondant sont données par les figures ci-dessous.

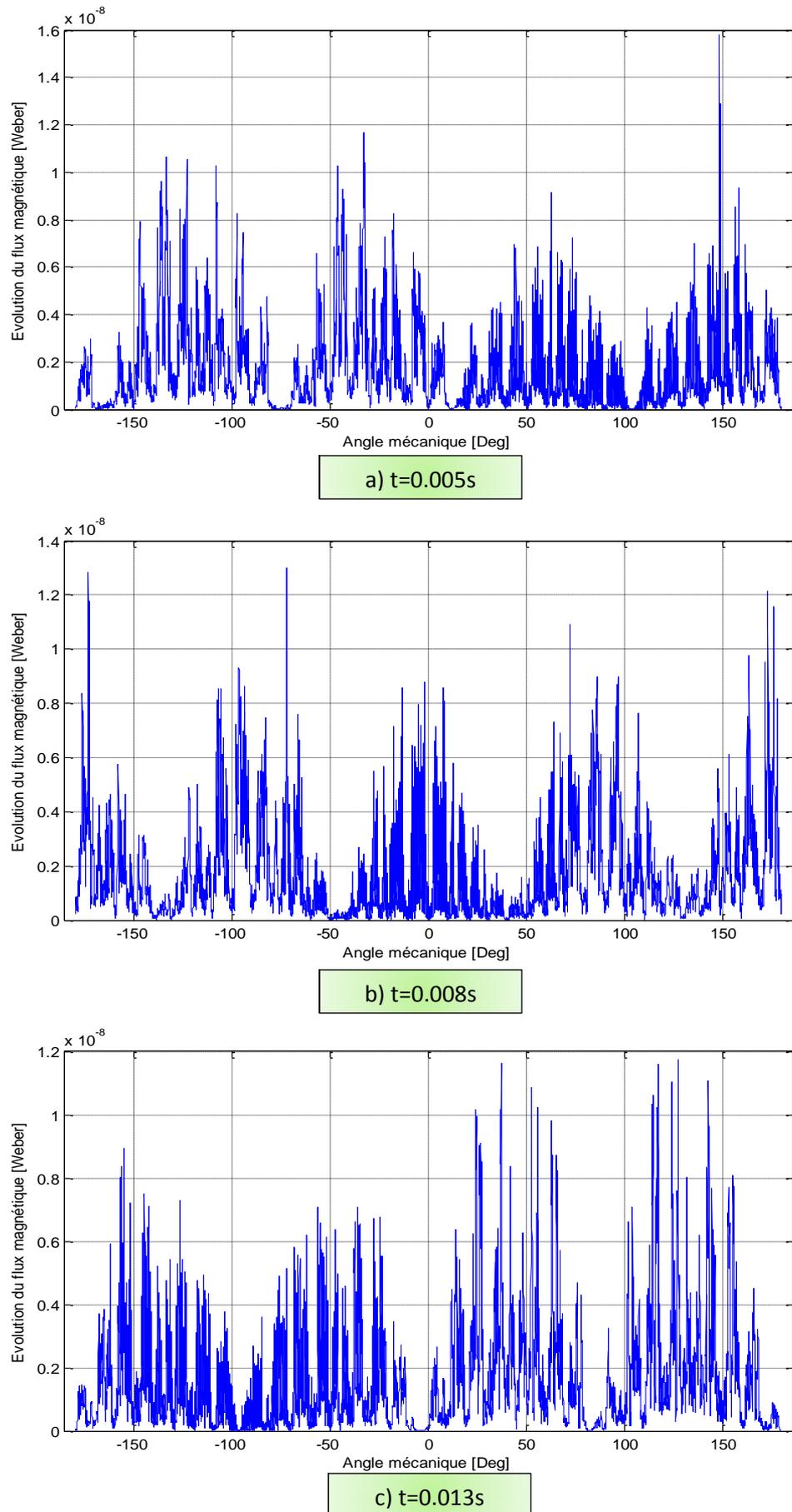


Figure IV.23. Evolution du flux magnétique dans l'entrefer en présence d'une excentricité dynamique

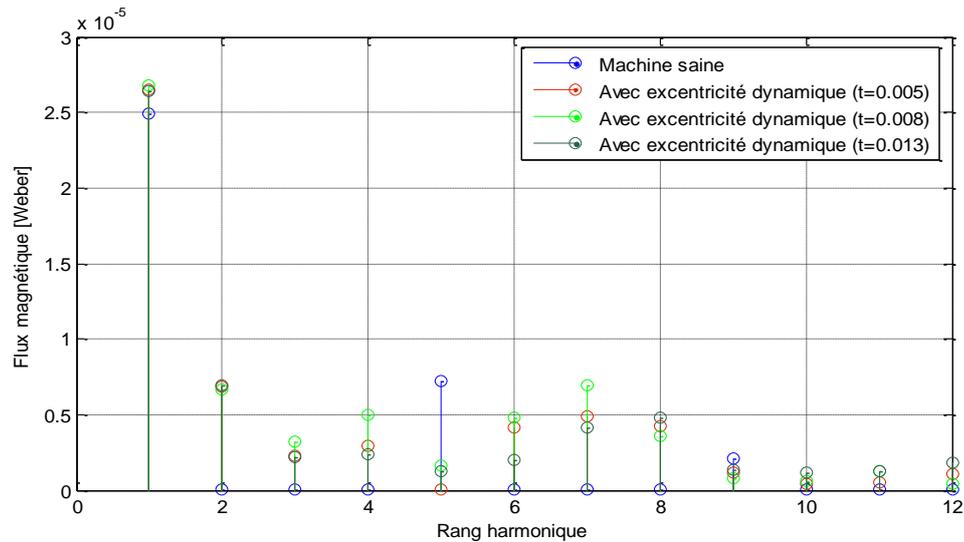


Figure IV.24. Contenu spectral du flux magnétique en présence d'une excentricité dynamique

A partir des figures présentées ci-dessus, on peut constater une importante influence de l'excentricité dynamique sur la distribution du flux ainsi que sur son contenu spectral. Pour chaque position du rotor on a une nouvelle distribution non uniforme du champ et par conséquent un nouveau spectre fréquentiel riche en harmonique (indice de présence de défaut).

IV.4.1.3. Défaut de court-circuit

Dans ce cas, on va considérer deux types de défaut de court-circuit, celui entre spires d'une même phase ainsi que celui entre deux phases différentes. Une comparaison entre les spectres fréquentiels, du flux magnétique, obtenus dans les deux cas est donnée par la figure ci-dessous.

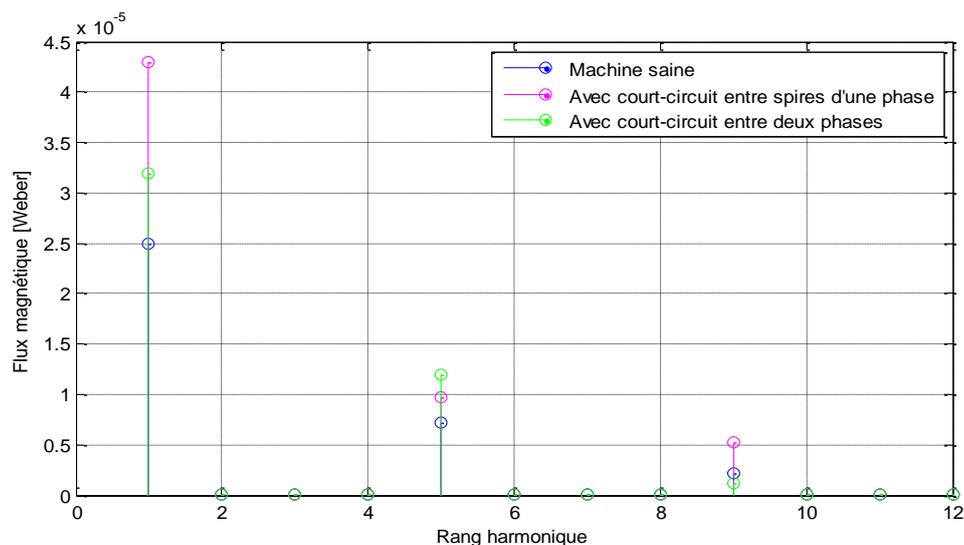


Figure IV.25. Spectres fréquentiels du flux magnétique dans les deux cas: court-circuit entre phases et court-circuit entre spires d'une même phase

D'après la figure ci-dessus, on peut conclure qu'un défaut de court-circuit a une influence considérable sur les performances de la machine. Ce défaut peut être bien détecté à partir du contenu spectral du flux magnétique. Selon le degré du court-circuit, ce contenu spectral sera plus ou moins riche en harmoniques (c'est seulement l'amplitude des harmoniques qui est influencée).

IV.4.2. Diagnostic par analyse des courants de barres rotoriques

Les courants de barres rotoriques sont des courants induits. Donc, leurs valeurs dépendent du champ qui régit dans la machine. Cela signifie qu'une bonne connaissance des valeurs de ces courants peut donner une aide sur les défauts statoriques et rotoriques qui peuvent survenir dans une MAS. Les courants induits calculés par l'expression :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{IV.2})$$

Les tableaux IV.2 et IV.3 résument les valeurs des courants de barres obtenues en présence de défauts d'excentricité dynamique et de court-circuit, respectivement. On remarque clairement que la présence de l'un de ces défauts a un effet significatif sur les valeurs de ces courants. Néanmoins le défaut de court-circuit est le plus influent.

Tableau IV.2. Courants dans les barres en présence d'une excentricité dynamique

		$t=0.005$	$t=0.008$	$t=0.013$
Courant dans les barres [A/m ²] × 10 ⁵	Machine saine	1.5944	1.6173	1.6006
	Avec excentricité dynamique	2.7637	2.5438	2.8103

Tableau IV.3. Courants dans les barres en présence d'un court-circuit

	Court-circuit entre phases	Court-circuit entre spires
Courants dans les barres [A/m ²] × 10 ⁵	2.1125	2.6737

Conclusion

Ce chapitre présente une application qui vise la modélisation et le diagnostic d'une MAS à cage d'écureuil, à pas raccourci. Dans ce but un code de calcul, basé sur la méthode des éléments finis, a été développé. Ce code permet le calcul de l'induction, du flux ainsi que des courants induits dans n'importe quel point de la machine.

Une analyse spectrale du flux magnétique a été effectuée pour le diagnostic de différents défauts de la MAS. Une comparaison des résultats obtenus a bien montré l'intérêt de cette technique du diagnostic pour la détection des défauts d'excentricité et de court-circuit. Par contre, cette technique a montré peu d'intérêt lors du diagnostic de défaut de rupture de barres. On ne peut détecter ce type de défaut qu'après la rupture de neuf barres.

A partir des résultats obtenus, On a pu aussi constater que les courants de barres rotoriques peuvent être considérés comme des bons indicateurs de défauts dans la MAS.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Compte tenu de la fréquence d'utilisation des machines asynchrones dans le domaine industriel, la détection précoce des défauts dans ces machines est devenue un enjeu économique très important.

Ce travail de Master a visé la modélisation et le diagnostic des défaillances d'une MAS à cage d'écureuil par analyse de ses grandeurs électromagnétiques. Le processus complet a été réalisé en bidimensionnel sous environnement MATLAB.

Cette étude a été orientée vers le diagnostic des défauts de la MAS par analyse du flux magnétique et des courants rotoriques induits. Trois types de défauts ont été considérés: défaut de rupture de barres, défaut d'excentricité et le défaut de court-circuit. Ces types de défauts se manifestent par la variation du champ magnétique, des courants induits et du flux magnétique.

Dans ce cadre, un modèle mathématique basé sur les équations de Maxwell a été développé. La méthode des éléments finis, jugée actuellement comme l'une des méthodes numériques les plus robustes pour la résolution des problèmes différentiels difficiles, a été appliquée pour le calcul du champ électromagnétique. A partir de la connaissance de ce dernier, on a pu calculer les courants induits dans les barres rotoriques, le flux magnétique qui apparaisse dans l'entrefer de la machine ainsi que son spectre fréquentiel.

La technique d'analyse du flux a montré son intérêt pour le diagnostic des défauts d'excentricité et de court-circuit. Par contre, un défaut de rupture de barres ne peut être détecté, par cette technique, qu'après la rupture de neuf barres. Donc, cette technique ne convient pas bien pour ce type de défauts.

Le défaut de court-circuit a un effet très significatif sur les valeurs des courants de barres, ce qui rend l'analyse de ces courants, un bon indicateur de défauts de court-circuits.

Les trois défauts considérés ne se manifestent pas de la même manière ce qui explique la diversité des techniques adoptées pour la détection de chacun de ces défauts

En perspective, cette étude pourrait être élargie en considérant d'autres types de défauts (défauts de roulements...) ainsi que d'autres outils de diagnostic et de détection avancés (réseaux de neurones, logique floue, neuro flou) ou par estimation paramétrique surtout en régime variable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Chahmi, « Identfcaton paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017.
- [2] J.P. Fanton, « Électrotechnique, machines et réseaux », éditions Ellipses, 2002.
- [3] C. Ong, « Dynamical simulation of electrical machinery », school of electrical and computer engineering, Perdue University West Lafayette, Rudiana, 1998.
- [4] A. Chahmi, « Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic », thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017.
- [5]http://www.cours_examens.org/images/Etudes_superieures/Ingeniorat_electricite/4_annee/Machines_electriques_II/SBA_cours/chap_5.pdf.
- [6] J. Gauthier, H. Hammouri, S. Othman, «Asimple observer for non-linear systems applications to bioreactors», IEEE transactions on automatic control, vol. 37, no. 6, p. 875-880, 1992.
- [7] M. Dessoude, « Moteurs asynchrone, choix et problèmes connexes », techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 3 490.
- [8] S. Chneider, « Guide des solutions d'automatisme », publication technique, Paris 2007.
- [9] B. Saint-Jean, « Electrotechnique et machines électriques », éditions Eyrolles, Paris, 1976.
- [10] M. Bichari « Système de diagnostic des défaillances des machines électriques », magistère en Génie industriel, Université de Batna, 2012.
- [11] A. Ceban, « Méthode globale de diagnostic des machines électriques », thèse de doctorat, laboratoire systèmes électrotechniques environnement, Université Lille de Nord de France, Février 2012.
- [12] N. Bessous, « Outils pour la détection et la classification. Application au diagnostic de défaut de surface de rail », thèse de doctorat, Université d'Henri Poincaré Nancy, 2004.
-

- [13] Ali. Ibrahim, « Contribution au diagnostic de machines électromécanique : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée », thèse doctorat, Université de Saint Etienne, 2009.
- [14] S. Belhamdi, « diagnostic des défauts de la machine asynchrone contrôlée par différentes technique de commande », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [15] A. Belbeche, « Modélisation, Diagnostic et Commande d'une machine asynchrone avec rupture d'une phase », diplôme ingénieur d'état en électrotechnique, l'Université de Batna, 2013.
- [16] N. Nait Said, « Contribution à l'identification et la commande de la machine à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2003.
- [17] S. Nandi, T. C. Ilamparithi, L. Sang Bin, and H. Doosoo, «Detection of eccentricity faults in induction machines based on nameplate parameters», IEEE transactions on industrial electronics, vol. 58, pp. 1673-1683, May 2011.
- [18] Guide des solutions d'automatisme: schémathèque by Schneider electric, 2007.
- [19] M. A. Mezroua, « Présentation des différentes défaillances du moteur asynchrone à cage », publié le 26/08/2009 à 00:07.
- [20] S. Rao, «Engineering optimisation, Theory and practice» john Wiley &sons, New York, 1996.
- [21] A. Fedsi, A. Tioune, «optimisation de forme d'une machine à reluctance variable», mémoire d'ingénieur, Université de Jijel, 2008.
- [22] C. Labiod, «Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de magister, Université de Biskra, 12/05/2014.
- [23] C. Sabonnadiere, L. COULOMB, «Calcul des champs électromagnétiques», technique de l'ingénieur D 3020.
- [24] A. Chentouf « Contribution à la modélisation électrique, magnétique et thermique d'un applicateur de plasma inductif haute fréquence », thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 1994.
- [25] P. Mas, « Modélisation en électromagnétisme », étude technique, Janvier 1992.
-

- [26] S. Bourouaih . M. Hala, «Etude de l'influence de l'emplacement des aimants dans le rotor sur le comportement vibratoire d'une MSAP à flux radial», mémoire de fin d'étude, Université de Jijel, 2016.
- [27] C. Golovanov, «Développement de formulation éléments finis 3D en potentiel vecteur magnétique application à la simulation de dispositifs électromagnétiques en mouvement», thèse du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 1997.
- [28] A. Ameer, «Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants », thèse Magister, Université de Batna, 2005.
- [29] M. Zaouia, «modélisation Numérique du Couplage Electromagnétique_Mécanique dans les Structures Linéaires Tubulaires » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammerri de Tizi Ouzou, 2013.
- [30] A. Hamadou, A. Nessissen, «Modélisation numérique d'une moteur asynchrone à cage d'écureuil », Université de Djilali Bounaamaa, Khemis Miliana, 2015.
- [31] Y. Boutora, «Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique de machine synchrone à aimants permanents avec la méthode des éléments finis», thèse de Doctorat, Ecole National polytechnique, 2007.
- [32] Z. Bouhrine, «stratégie d'optimisation par algorithme génétique : application aux dispositifs électrotechnique», mémoire de master, Université de Jijel, 2011.
- [33] C. Guerin, «détermination des pertes par courants de Foucault dans les cuves de transformateurs», l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [34] W.belhouchet, Z .Bouchelit, «Optimisation des performances d'un dispositif électrotechnique par couplage réseaux de neurones algorithme génétique », mémoire de fin d'études, Université de Jijel ,2016.
- [35] M. Khebbab, « Etude et Modélisation de Capteur a Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », thèse de magister, Université de Constantine, 2007.
- [36] F. Babaa, « Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : Application au diagnostic des défauts statoriques », thèse de doctorat, Université de Constantine 1, 2014.
-

- [37] H. Grad, « Apport de la MCSA par rapport à l'analyse vibratoire pour le suivi de l'état de la machine Asynchrone », master génie électrique, Université Mohammed V –Soussi-Maroc, 2013.
- [38] M. Nezar, « Diagnostic des associations convertisseurs statiques – machine à synchrones en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », thèse doctorat de l'Université de Batna, 2006.
- [39] D. Thailly, « Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : Application au diagnostic », thèse de doctorat, laboratoire systèmes électrotechniques et environnement (LSEE), Université d'Artois, Béthune, France, 2007.
- [40] P.J. Travner, B.G. Gaydon and D.M. Ward, « Monitoring generator and large motor », IEE Proceeding May 1986.
- [41] Austin H. Bonnett, « Safety consideration for the application installation, operation, and maintenance of industrial AC induction motors », IEEE Trans. Ind. Appl.; vol 25, September /October, 1989.
- [42] R. Hubert, D. Gaëtan, « Notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone », notes de cours, I.U.F.M. de Lorraine, Maxéville, 7 Janvier 2003.
- [43] Leroy somer guide d'utilisation, « Moteurs asynchrones triphasés ouverts installation et maintenance », http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/2197_fr.pdf.
- [44] M. Eftekhari, M. Moallem, S. Sadri, Min-Fu Hsieh, « A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging », infrared physics & technology, 61 (2013) 330–336.
- [45] M. Harir, « Etude des défauts dans la machine asynchrone à cage d'écureuil par l'emploi de la fonction d'enroulement modifiée », mémoire de magister, Université d'Oran, 2009.
- [46] M. Bazi Smail, « Contribution à la détection et au diagnostic des défauts dans un système machine à induction-convertisseur », thèse de doctorat, Université de Batna, 2016.
- [47] W. T. Thomson, « A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrelcage induction motors—past », present and future in 2nd IEEE international Symposium on diagnostics for electrical machines, power electronics and drives - Sdemped 99, Gijon, Spain, 1999, pp. 3-17.
-

- [48] F. Zidat, J.-P. Lecointe, F. Morganti, J.-F. Brudny, T. Jacq, and F. Streiff, « Non invasive sensors for monitoring the efficiency of AC electrical rotating machines », *Sensors*, vol. 10, pp. 7874-7895, 2010.
- [49] M. Drif, N. Benouzza, B. Kraloua, A. Bendiabdellah and J.A.Dente, « Squirrel cage rotor faults detection by instantaneous power spectrum approach », proceeding of IEEE Sdemped 01, Gorizia, Italy, 2001.
- [50] R. Bousseksou, « Modélisation analytique des machines asynchrones application au diagnostic », thèse de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [51] N. Hacib, «Modélisation dynamique et conception optimal d'une machine électrique en vue de la réduction des phénomènes vibratoire», thèse de doctorat, Université de Jijel.
-