



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie



Mémoire de Fin d'Études
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Faculté de la Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines Electriques

Thème

**Techniques avancées pour le
diagnostic des machines électriques
- défauts rotoriques -**

Réalisé par :

MESBAHI Abdelouahab

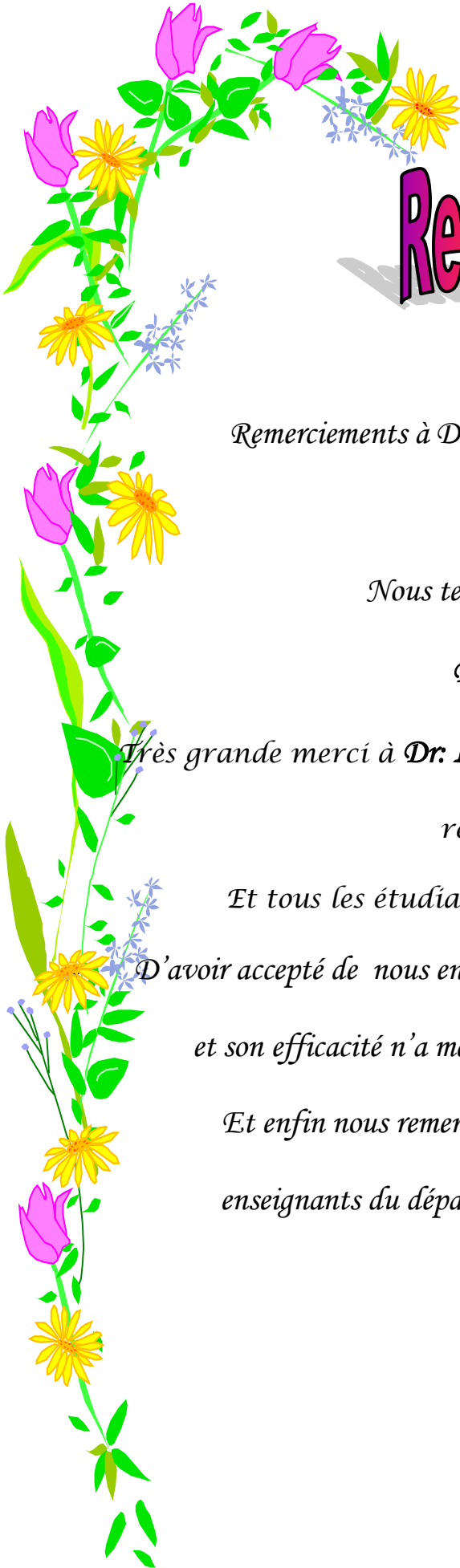
ZELLOUMA Moussa

NEMSI Mohammed Amine

Encadré par :

Dr: ALLAL Abderrahim

Soutenu en Juin 2022



Remerciements

*Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidés À réaliser ce
modeste travail.*

Nous tenons à remercier notre promoteur

Dr. ALLAL Abderrahim

*Très grande merci à Dr. LABIOD SHOULAIB, pour son aide à obtenir les
résultats expérimentaux*

Et tous les étudiants de notre section machine électrique

D'avoir accepté de nous encadrer et De nous suivre durant toute cette période.

et son efficacité n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble, Nous remercions aussi tous les

*enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre
formation.*





Dédicaces

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance à :

Ma très chère mère et mon père

Mes sœurs

Mes frères

A toute ma famille

A tous mes amis



Résumé:

Dans ce travail, nous abordons la modélisation des moteurs asynchrones et cela dans le but de l'identification des défauts rotoriques. A cet effet, nous rappelons dans ce travail les différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement du moteur asynchrone ainsi que leurs causes et les différentes techniques de diagnostic en présentant leurs points faibles et leurs points forts

nous présentons une méthode permettant la détection d'un défaut rotorique, les barres casées et leurs influences sur l'enveloppe du courant statorique. les relevés spectraux sont toujours riches en harmoniques indiquant la multitude de phénomènes définissant l'état de la machine. deux types d'étude des harmoniques : les harmoniques de temps (TH) et les harmoniques (RBFH) , en utilisant technique avancée de diagnostic : la première est la technique MCSA et la deuxième la technique MSCSA , le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

Mots clés : Machine asynchrone triphasée. diagnostic , techniques avancées , détection.

المخلص:

في هذا العمل قمنا بمناقشة نمذجة المحركات غير المتزامنة وذلك بهدف تحديد الأعطال. ولهذا ذكرنا في هذا العمل العيوب المختلفة التي يمكن أن تؤثر على أداء الصحيح للمحرك غير المتزامن، وكذلك أسبابها وتقنيات التشخيص المختلفة من خلال عرض نقاط ضعفها ونقاط قوتها.

ولقد عرضنا طريقة جديدة تسمح بتشخيص العطب في الجزء الدوار والتي تعتمد على القضبان المكسورة وتأثيرها على غلاف تيار الجزء الثابت. دائماً ما تكون القراءات الطيفية غنية بالتوافقيات التي تشير إلى العديد من الظواهر التي تحدد حالة الآلة. نوعان من دراسة التوافقيات: توافقيات الوقت (TH) والتوافقيات (RBFH)، باستخدام تقنية التشخيص المتقدمة: الأول هي تقنية MCSA والثاني هي تقنية MSCSA. والهدف هو اختيار أفضل المؤشرات التي تعطي المعلومات الصحيحة عن حالة الآلة.

الكلمات المفتاحية : المحرك غير المتزامن - التشخيص - أعطاب الجزء الدوار - الكشف - الطرق الحديثة.

NOTATIONS et SYMBOLES

n : entier naturel.
 f_s : fréquence d'alimentation [Hz].
 P : nombre de paires de pôles
 g : glissement.
 Ω : Surface enfermée par un contour.
 μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.
 H : Champ magnétique.
 B : Induction magnétique.
 f_{exc} : Fréquence d'excentricité
 f_{cc} : fréquence de court-circuit .
 f_c : caractéristiques fréquences.
 f_{roul} : la fréquence des défauts de roulement reflétés dans le courant du stator
 D_b : Diamètre de la bille (Ball).
 D_c : Diamètre du palier
 β : angle de contact de la bille avec la cage
 f_{rot} : fréquence de rotation mécanique du rotor
 n_b : nombre de billes ;
 θ : Angle décrivant une position particulière dans l'espace, mesuré par rapport à une référence fixée par rapport au stator.
 $F.m.m$: force magnétomotrice.
 N_s : Nombre de spires.
 i : Courant électrique.
 ϕ : Flux magnétique.
 r : Rayon moyen de l'entrefer de la machine symétrique.
 S : Surface fermée
 l : Longueur active de la machine.
 L_{BA} : Inductance mutuelle entre l'enroulement B et A.
 L_b : Inductance de fuite d'une barre rotorique.
 L_e : Inductance de fuite d'un segment d'anneau de court-circuit.
 L_{mr} : Inductance de magnétisation d'une maille rotorique.
 L_{Am} : Inductance de magnétisation d'une phase statorique.
 L_{fA} : Flux de fuite d'une phase statorique.
 ψ_{BA} : Flux mutuelle total entre deux enroulements A et B.
 F : Force magnétomotrice.
 F : Force mécanique.
 g_0 : Epaisseur de l'entrefer de la machine symétrique.
 $[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.
 $[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[R]$: Matrice globale des résistances de la machine.
 $[V_s]$: Matrice des tensions statoriques.
 $[V_r]$: Matrice des tensions rotoriques.
 $[I_s]$: Matrice des courants statoriques.
 $[I_r]$: Matrice des courants rotoriques.
 I_{bk} : courant de barre [A].
 M_{sr} : mutuelle cyclique entre le stator [H].
 B_s : induction magnétique créée dans l'entrefer par le courant statorique [T]
 R_e : résistance totale de l'anneau de court-circuit [Ω].
 R_r : résistance de l'enroulement rotorique [Ω].
 R_s : résistance de l'enroulement statorique [Ω].
 r_s : résistance d'une phase statorique [Ω].
 d, q : indices pour les composantes de PARK directe et quadrature, respectivement.
 K_0 : coefficient de frottement.
 M_{rr} : L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes
 L_b : inductance d'une barre rotorique [H].
 L_e : inductance total de l'anneau de court-circuit [H].
 p : Nombre de paires de pôles.
 N : Fonction d'enroulement.
 N_s : nombre de spires statoriques par phase.
 N_r : nombre de barres rotorique.
 C_r : couple de charge.
 J : Densité de courant.
 α_r : Pas d'encoches rotoriques.
 MAS : Machine asynchrone.
 RSH : Harmoniques des encoches rotoriques
 TH : Harmoniques de temps
 $RBFH$: Harmoniques des défauts de barres rotoriques
 EFH : Harmoniques des défauts d'excentricité
 $MCSA$: Motor Current Signal Analysis

LISTE DE FIGURES

Chapitre I : Défaillances et méthodes de diagnostic des machines asynchrones

Figure I.1: Eléments de constitution d'une machines électrique.	04
Figure I.2: Stator d'une machines électriques.	04
Figure I.3: Rotor d'une machines électriques.	05
Figure. I.4: Principe de fonctionnement d'un machines électriques.	06
Figure I.5: Les défauts des machines électriques.	07
Figure I.6: La répartition des pannes.	08
Figure I.7: Représentation des différents défauts statoriques possible.	09
Figure I.8: Représentation de défaut rupture de barre et d'anneau.	09
Figure I.9: Défauts d'excentricité.	10
Figure I.10: roulement à bille.	11
Figure I.11: Différentes phases de diagnostic.	13

Chapitre II : Modélisation dédiée au diagnostic de la machine asynchrone à cage

Figure II.1: Circuit électrique équivalent du rotor à cage basé sur la structure multi-enroulements.	20
Figure II.2: Champ produit par une maille rotorique.	22
Figure II. 3: Schéma électrique équivalent des mailles rotorique.	24
Figure II. 4: Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q)	28
Figure II. 5: Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase.	30
Figure.II.6 : Représentation élémentaire d'un court-circuit entre spires.	33
Figure.II.7: Représentation d'un circuit statorique contenant un court-circuit entre spires.	34
Figure.II.8: Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (moteur sain).	34
Figure.II.9: Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (rupture) d'une barre rotorique)	35
Figure II. 5: Machine asynchrone élémentaire.	30

Chapitre III : Résultats expérimentaux et de simulation

Figure III. 1: Installation expérimentale moteur avec cassure de barres et de portions d'anneaux résultats expérimentaux relative au courant moteur	42
---	----

Figure III 2: Spectre expérimental du courant statorique MCSA harmoniques de temps (moteur sain)	42
Figure III 3: Spectre expérimental du courant statorique MCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique)	43
Figure III 4 : Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA	43
Figure III 5: Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur sain)	44
Figure III 6: Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique)	44
Figure III 7 : Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA	45
Figure III 8 : Indice partiel relatif des technique MCSA et MCSA en utilisant l'harmonique de temps (TH)	46
Figure III 9: Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) pour un (moteur sain)	46
Figure III 10: Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)	47
Figure III 11 : Représentation des amplitudes d'harmoniques (RBFH) pour MCSA	47
Figure III 12: Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur sain)	48
Figure III 13: Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)	48
Figure III 14: Représentation des amplitudes harmoniques (RBFH) pour MSCSA	49
Figure III 15: Indice partiel relatif des techniques MCSA et MSCSA d'après l'harmonique RBFH	50
Figure III 16: Indice global relatif le plus sensible de technique (TH) et (RBFH)	41

Sommaire

Remerciements	
Notations et symboles	ii
Liste des figures	iv
Sommaire	v
Introduction générale	01

Chapitre I : Défaillances et méthodes de diagnostic des machines asynchrones

I.1 Introduction	03
I.2 Machine asynchrone MAS	03
I.2.1 Eléments de constitution de la machine asynchrone	03
I.2.1.1 Stator	04
I.2.1.2 Rotor	04
I.2.1.3 Organes mécaniques	05
I.2.2 Principe de fonctionnement	05
I.3 Défaits des machines électriques	06
I.4 Causes des défauts	07
I.4.1 Défaits statoriques	07
I.4.2 Défaits rotoriques	08
I.5 Différents défauts dans la machines électriques	08
I.5.1 Défaits statorique	08
I.5.2 Défaits rotoriques	09
I.5.2.2 Défaits d'Excentricité	10
I.5.2.3 Défaillances des roulements mécaniques	10
I.6 Diagnostic des machines électriques	11
I.6.1 Conséquences des défauts	11
I.6.2 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques	12

I.6.3 Organisation générale de la procédure de diagnostic	12
I.7 Différentes méthodes de diagnostic	13
I.7.1 Méthodes internes	13
I.7.2 Méthodes externes	14
I.7.3 Méthodes inductives	15
I.7.4 Méthodes déductives	15
I.8 Méthodes de détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage	15
I.9 Conclusion	18

Chapitre II : Modélisation dédiée au diagnostic de la machine asynchrone à cage

II.1 Introduction	19
II.2 Modèle multi-enroulements	19
II.2.1 Calcul des inductances	20
II.2.2 Partie statorique	20
II.2.1.2 Partie rotorique	21
II.2.2 Mise en équations	23
II.2.2.1 Equations statoriques	23
II.2.2.2 Equations rotoriques	24
II.3 Equation d'état de la machine	25
II.3.1 Système d'équations global	27
II.3.2 Transformation de Park	28
II.4 Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques	30
II.5 Calcul des inductances en cas de court-circuit entre spires statorique	32
II.5.1 Exemple élémentaire	32
II.5.2 Système d'équations correspondant	33
II.6 Défaut rotorique	34
II.7 Conclusion	36

Chapitre III : Résultats expérimentaux et de simulation

III.1 Introduction	37
III.2 Théorie générale sur les harmoniques de la MAS	37
III.3 Etude du courant de stator avec ses harmoniques	39
III.3.1 Analyse du spectre MCSA	40
III.3.1 Défaut de rupture de barres rotoriques	40
III. 4.Etude comparative entre la méthode classique MCSA et celle avancée MSCSA	41
III.4.1.Première méthode en utilisant l'indice (de Diagnostic) partiel relatif	41
III. 4.1.1. Harmoniques de temps (TH)	42
III.4.1.1.1.Méthode MCSA	42
III.4.1.1.2.Méthode MSCSA	44
III.4.1.2 Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	46
III.4.1.3 utilisant l'indice (de diagnostic) global relatif	50
III.5 Conclusion	52
Conclusion général	53
Annexe	
Références Bibliographie	55

Introduction Générale

Introduction Générale

La machine électrique est célèbre grâce à sa qualité de robustesse et à son faible coût de construction. Dans les milieux industriels, il est nécessaire de mettre en place des programmes de maintenances préventives et correctives pour assurer leur continuité de fonctionnement. La fiabilité et la sûreté de son fonctionnement permettant d'assurer la sécurité des personnes, la qualité du service et la rentabilité des installations. Malheureusement, ces machines sont soumises à plusieurs contraintes de natures différentes (électriques, mécaniques, thermiques, magnétiques et environnementales). Le cumul de ces contraintes cause des défauts dans les différentes parties du moteur, ce qui engendre par conséquence des arrêts non programmés conduisant à des pertes de production et à des réparations coûteuses. La maintenance classique des machines électriques ne peut pas éviter l'apparition de ces défauts et leurs conséquences sur ces dernières. En effet, car d'une part l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade du défaut, c'est à dire dans le cas critique de son évolution.

C'est pour éviter ces problèmes que la recherche, sur le plan mondial, s'emploie depuis plusieurs dizaines d'années à élaborer des techniques de diagnostic. La problématique du diagnostic est en effet liée à celle de la maintenance, or celle-ci fait intervenir des facteurs économiques (coût de la maintenance par rapport au gain espéré), des facteurs humains (qualification, formation du personnel), et des facteurs industriels difficiles à évaluer. Le diagnostic des défaillances des systèmes industriels lorsqu'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à obtenir un meilleur gain de productivité.

Or, la demande croissante en terme de robustesse des outils de diagnostic nécessite de trouver de nouvelles solutions et, en particulier, de porter une analyse sur d'autres grandeurs, ceci afin de compléter les approches existantes.

Le premier chapitre, est consacré sur l'état de l'art du diagnostic de défaut de la machine asynchrone. Une citation des divers défauts pouvant affecter le bon fonctionnement de la

machine asynchrone ainsi que les différentes méthodes de détection et du diagnostic de ces défauts sont représentés.

Le deuxième chapitre présentera la modélisation de la machine asynchrone dédiée au diagnostic des défauts rotoriques pour obtenir des résultats de simulation qui sera nécessaire dans cette étude consacrée à la surveillance des machines électriques .

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux et de simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, (avec et sans défaut). Nous montrerons les effets des cassures de barres sur les différentes grandeurs électriques analyser. Nous présenterons diverse méthodes se basant sur Time Harmoniques de Temps (Time Harmonics TH) et Harmoniques des défauts de barres rotoriques naturels (Harmonics of Rotor Bar Fault) RBFH.

Enfin une conclusion générale où on présente une synthèse des résultats ainsi obtenus ainsi les perspectives future pour l'amélioration de ce travail.

Chapitre I:

***Défaillances et méthodes de
diagnostic des machines
asynchrones***

I.1 Introduction:

Dans ce chapitre, on présente une étude machines électriques sur la distribution des différentes défaillances sur les éléments de la machine, ensuite nous effectuons une présentation des différents défauts pouvant survenir sur chacun de ces éléments en citant leurs causes et effets sur le comportement de la machine. Finalement nous rappelons brièvement les techniques de base couramment utilisées pour la détection et le diagnostic des divers défauts.

II.2 Machine asynchrone MAS:

La machine asynchrone (MAS) est par excellence la machine la plus répandue dans l'industrie. Cet intérêt croissant est justifié par de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût ... etc. Le développement des convertisseurs de fréquence permettant de varier la fréquence de rotation dans une large gamme, En effet il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant les convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, lavage, pompage, etc....) [2].

Bien que la machine asynchrone soit robuste, elle peut présenter, comme toute autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels, le diagnostic des défauts fait l'objet d'un intérêt grandissant depuis les deux dernières décennies[2].

I.2.1 Eléments de constitution de la machine asynchrone

La connaissance des éléments de constitution des machines asynchrones permet de comprendre de quelle façon le système est réalisé physiquement. Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties distinctes :

- ❖ **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 moteur[3].

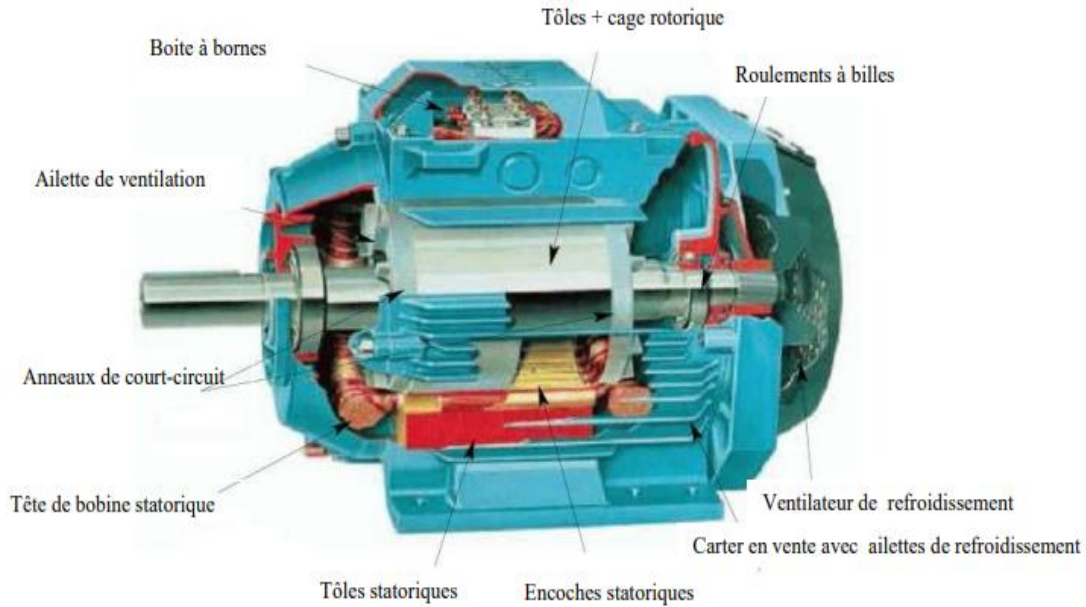


Figure I.1: Eléments de constitution d'une machine électrique[3].

I.2.1.1 Stator:

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statorique. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique[4].

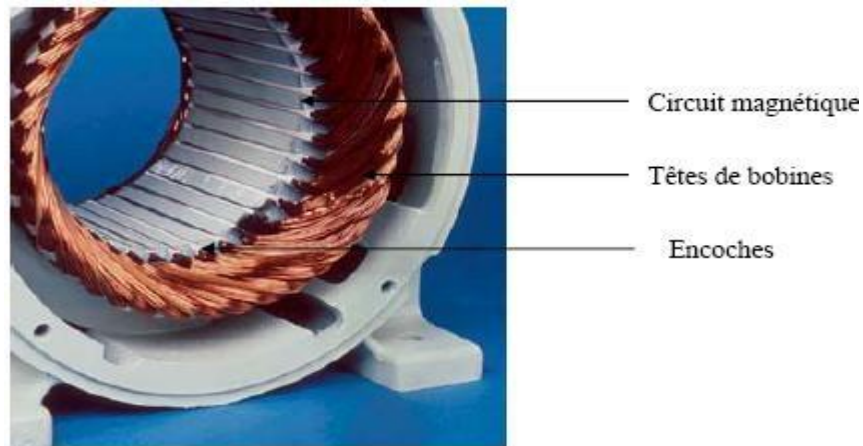


Figure I.2: Stator d'une machine électrique [4].

I.2.1.2 Rotor:

Le circuit rotorique 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 conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. La figure (1.3) illustre un rotor à cage. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.[5]



Figure I.3: Rotor d'une machines électriques[5]

I.2.1.3 Organes mécaniques:

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). [6]

I.2.2 Principe de fonctionnement:

Le fonctionnement du moteur asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, crée par le courant triphasé fourni par un réseau triphasé équilibré de pulsation ω_s aux enroulements statoriques, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ magnétique tournant (loi de LENZ). Cette interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.[7]

Dans la MAS, l'onde du champ tournant se déplace dans l'entrefer de la machine avec une vitesse de rotation nommée vitesse de synchronisme Ω_s . Elle est liée à la fréquence d'alimentation f_s par l'expression suivante :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = 60 * \frac{f_s}{p} \quad (\text{tr/min}) \quad (I-1)$$

f_s : fréquence des tensions triphasées du réseau d'alimentation [HZ].

p : le nombre de paires de pôles.

Un rotor en court-circuit, balayé par ce champ tournant, sera traversé par des courants induits (courant de Foucault), ce qui soumet ce dernier à des forces électromagnétiques de Laplace. L'ensemble de ces forces crée un couple moteur qui mettra le rotor en rotation (voir figure I.4), le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à celle du champ tournant ($\Omega < \Omega_s$) [7].

En effet, Il existe donc toujours une différence de vitesse entre le stator et le rotor .cette différence s'appelle le glissement (g) qui est une caractéristique particulière de la MAS. Il est défini comme étant l'écart de vitesse entre la vitesse de synchronisme (Ω_s) et la vitesse de rotation du rotor (Ω). Le glissement (g) est alors donné par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I-2)$$

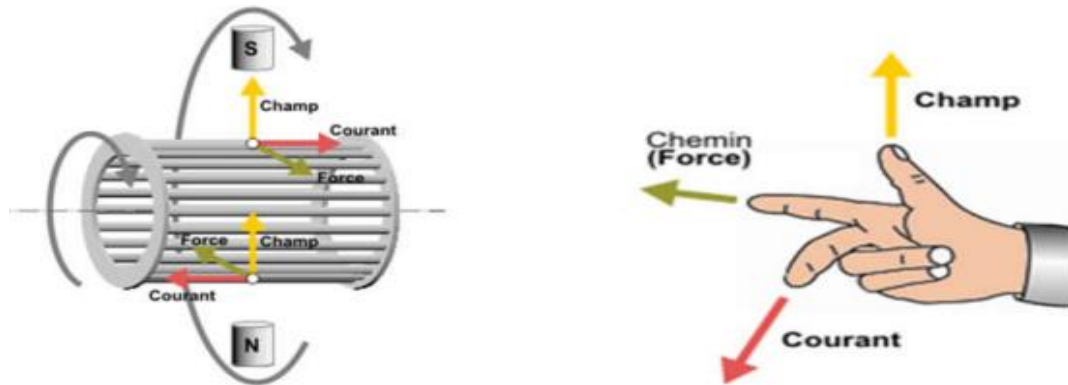


Figure. I.4.:Principe de fonctionnement d'un machines électriques[7].

I.3 Défaits des machines électriques:

Généralement les différents défauts des machines électriques sont de l'origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'assemblage, l'installation et la nature la charge et le calendrier de maintenance[9].

Des défauts peuvent être classé leurs origines en deux catégories intentées et externes :

- **défauts internes** : sont provoqué par les constituants de la machine (bobinage du stator et rotor, circuit magnétique, cage rotoriques, entrefer mécanique, etc...) [10].
- **défauts externes** : sont causes par le type d'alimentation, la charge mécanique, ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine.

Une classification des défauts excitants dans les machines électriques selon leur origines et présentée comme suit [11]

Defaults	Interne	MECANIQUE	Contact entre stator et rotor
			Défaut de roulements
			excentricité
			Mouvement de l'enroulement et des tôles
		ELECTRIQUE	Défaillances au niveau de l'isolation
			Rupture des barres
	Externe	MECANIQUE	Défaillances au niveau de circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		ENVIRONNEMENTALE	Défaut de montage
			Humidité
			température
		ELECTRIQUE	Propriété
			Fluctuation de la tension
			Sources de tension déséquilibre
			Réseau bruite

Figure I.5: Les défauts des machines électriques[8]

I.4 Causes des défauts:

Les causes des défauts au stator et au rotor sont multiples [12], les plus fréquentes d'entre eux sont énumérées ci-dessous

I.4.1 Défauts statoriques [13]:

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité ;
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibre, défaut d'installation;
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême ;
- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc ;
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines ;
- défaillance des connecteurs : vibration excessive ;

- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

I.4.2 Défaits rotoriques[13]:

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

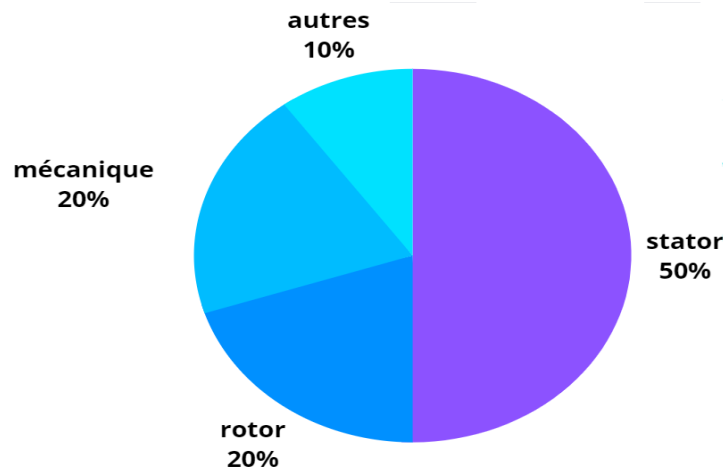


Figure I.6: La répartition des pannes.

I.5 Différents défauts dans la machines électriques:

I.5.1 Défauts statorique:

L'apparition d'un défaut au niveau des circuits électriques statorique de la machine asynchrone peut avoir des origines diverses. On peut citer à titre d'exemple, les défauts de type courts-circuits inter-spires qui apparaissent à l'intérieur des encoches statoriques. Ce type de défauts peut être causé par une dégradation des isolants des spires du bobinage statorique.

On peut citer aussi les courts-circuits qui apparaissent entre une phase et le neutre, entre une phase et la carcasse métallique de la machine ou entre deux phases statoriques. Les courts-

circuits entre spires est donc le défaut le plus fréquemment rencontré au stator, la fréquence caractéristique de ce défaut est[14].

$$f_{cc} = f_s \left\{ \frac{n}{p} (1 - g) \mp k \right\} \quad (I- 3)$$

Avec $n=1,2,3,\dots$ et $k=1,3,5,\dots$

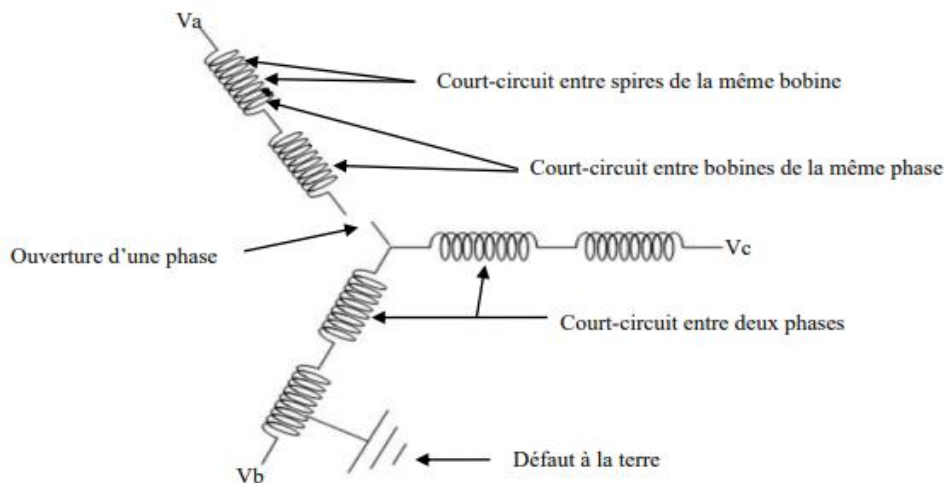


Figure I.7: Représentation des différents défauts statoriques possible[8].

I.5.2 Défauts rotoriques:

I.5.2.1 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit:

Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit Figure.

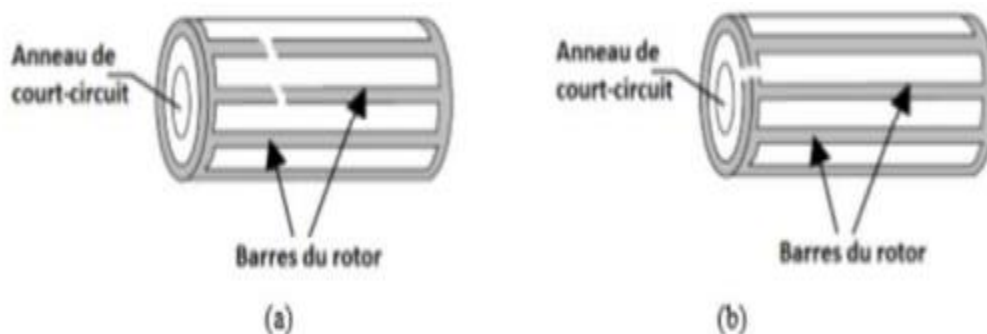


Figure I.8: Représentation de défaut rupture de barre et d'anneau[9].

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique, à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication[15].

I.5.2.2 Défauts d'Excentricité :

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. L'excentricité dans les machines peut être de deux formes, soit le centre du rotor et le centre du stator ne coïncide pas, mais le rotor tourne autour de son axe, excentricité statique) ou alors le rotor ne tourne pas autour de son axe de révolution où il apparaît un balourd (excentricité dynamique). L'apparition des deux types d'excentricité au même temps est généralement appelé : excentricité mixte[16].

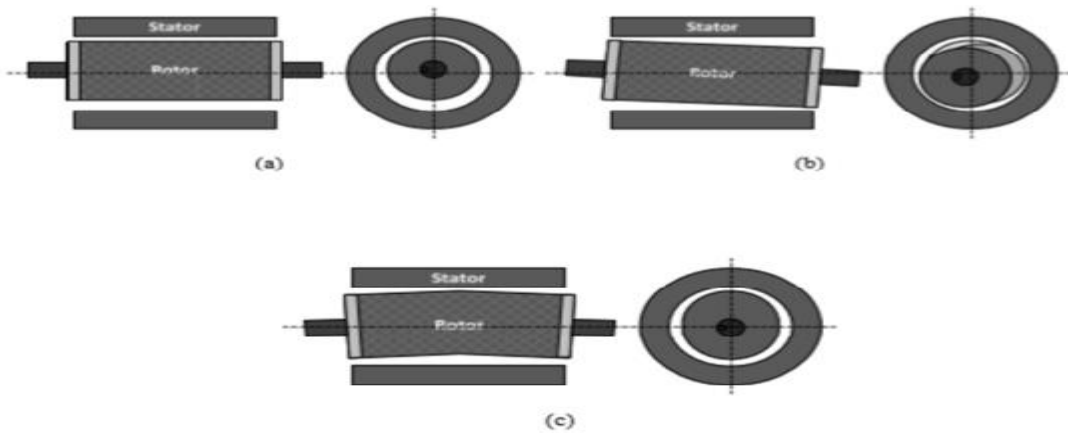


Figure I.9: Défauts d'excentricité[9]

I.5.2.3 Défaillances des roulements mécaniques:

Le roulement à billes est un organe de base dans la machine asynchrone qui joue le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En plus, il représente l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant de garantir une bonne rotation du rotor. La majorité des machines électriques utilisent les roulements à billes ou à rouleaux. Le roulement à billes est le plus utilisé dans le monde industriel parce qu'il a le meilleur rapport performance-prix[17] [18].

Les roulements se composent généralement de deux bagues, une intérieure et autre extérieure entre lesquelles existe un ensemble de billes ou de rouleaux tournants. fonctionnement normal, la défaillance due à la fatigue commence par des petites fissures situées au-dessous des surfaces du chemin de roulement et de l'élément roulant, qui se propage graduellement sur la surface. Tout changement de l'uniformité du roulement produit des vibrations qui génèrent dans le courant statorique des raies spectrales de fréquences[19].

$$f_{roul} = |f_s - kf_v| \quad (I- 4)$$

d'où: $k=1.2.3\dots$ et f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations. Les fréquences caractéristiques des vibrations dépendent de l'élément du roulement affecté par un défaut et sont liées aux paramètres du roulement. les fréquences des vibrations qui caractérisent les défauts des roulements à bille sont :

- **Défauts au niveau d'une bille**

$$f_b = \frac{PD}{BD} f_{rot} [1 - (\frac{BD}{PD} \cos(\beta))^2] \quad (I- 5)$$

- **Défauts sur la bague intérieure**

$$f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_{rot} [1 + (\frac{BD}{PD} \cos(\beta))] \quad (I- 6)$$

- **Défauts sur la bague extérieure**

$$f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_{rot} [1 - (\frac{BD}{PD} \cos(\beta))] \quad (I- 7)$$

BD : le diamètre d'un élément roulant,

PD : la distance entre les centres des billes diamétralement opposées,

n_b : le Numbers d'éléments roulants,

β : angle de contact des billes avec les bagues du roulement.

f_{rot} : la fréquence de rotation du rotor.

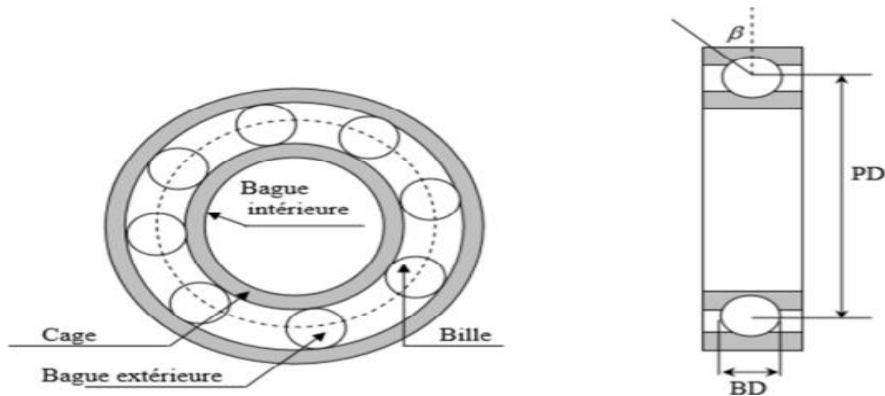


Figure I.10: roulement à bille[9].

I.6 Diagnostic des machines électriques:

I.6.1 Conséquences des défauts [20]:

Les défauts qui surviennent sur les des machines électriques conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On site parmi les conséquences des défauts:

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.

- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentations des arrêts non programmés, des pertes de production, et par conséquent, du rendement global.

I.6.2 Méthodes de détection de défauts dans les machines électriques :

Pour effectuer le diagnostic d'une installation, les opérateurs de maintenance analysent un certain nombre de symptômes, tels que le bruit, la température, les vibrations....etc. En s'appuyant sur leurs expériences, ces derniers sont dus à des modifications des caractéristiques temporelles et fréquentielles d'un certain nombre de grandeurs mesurables ou non . Pour effectuer un diagnostic, il est nécessaire de procéder à une ou des analyses afin d'interpréter les signaux issus des capteurs tant sur le plan fréquentiel que temporel. Parmi tous les signaux permettant d'établir un diagnostic, ceux-ci peuvent provenir de la mesure du courant absorbé par le moteur électrique, le carré de ce courant, la puissance instantanée, le vecteur de Park....[21].

I.6.3 Organisation générale de la procédure de diagnostic :

- La procédure de diagnostic de défaillances et de dégradait on susceptible d'affecter les différentes entités d'un moteur électrique s'articule autour des étapes suivantes.
- L'extraction des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux, à partir des moyens de mesures appropriés ou d'observations réalisées par les personnels de surveillance.
- L'élaboration des caractéristiques et signatures associées à des symptômes révélateurs de défaillances et de dégradation en vue de la détection d'un dysfonctionnement.

La détection d'un dysfonctionnement par comparaison avec des signatures associées à des états de fonctionnement normaux, et la définition d'indicateurs de confiance dans la détection.

- La mise en œuvre d'une méthode de diagnostic de la défaillance ou de la dégradation à partir de l'utilisation des connaissances sur les relations de cause à effet.
- La prise de décision en fonction des conséquences futures des défaillances et des dégradations. Cette prise de décision peut conduire à un arrêt de l'installation si les conséquences de la défaillance sont importantes pour la sécurité des personnes et des biens ou à une reconfiguration du fonctionnement du procédé pour éviter une perte de production en attendant le prochain arrêt de production le plus propice aux opérations de maintenance corrective. Schéma

suivant représente l'ensemble des tâches à réaliser pour assurer un fonctionnement satisfaisant d'un processus industriel[22].

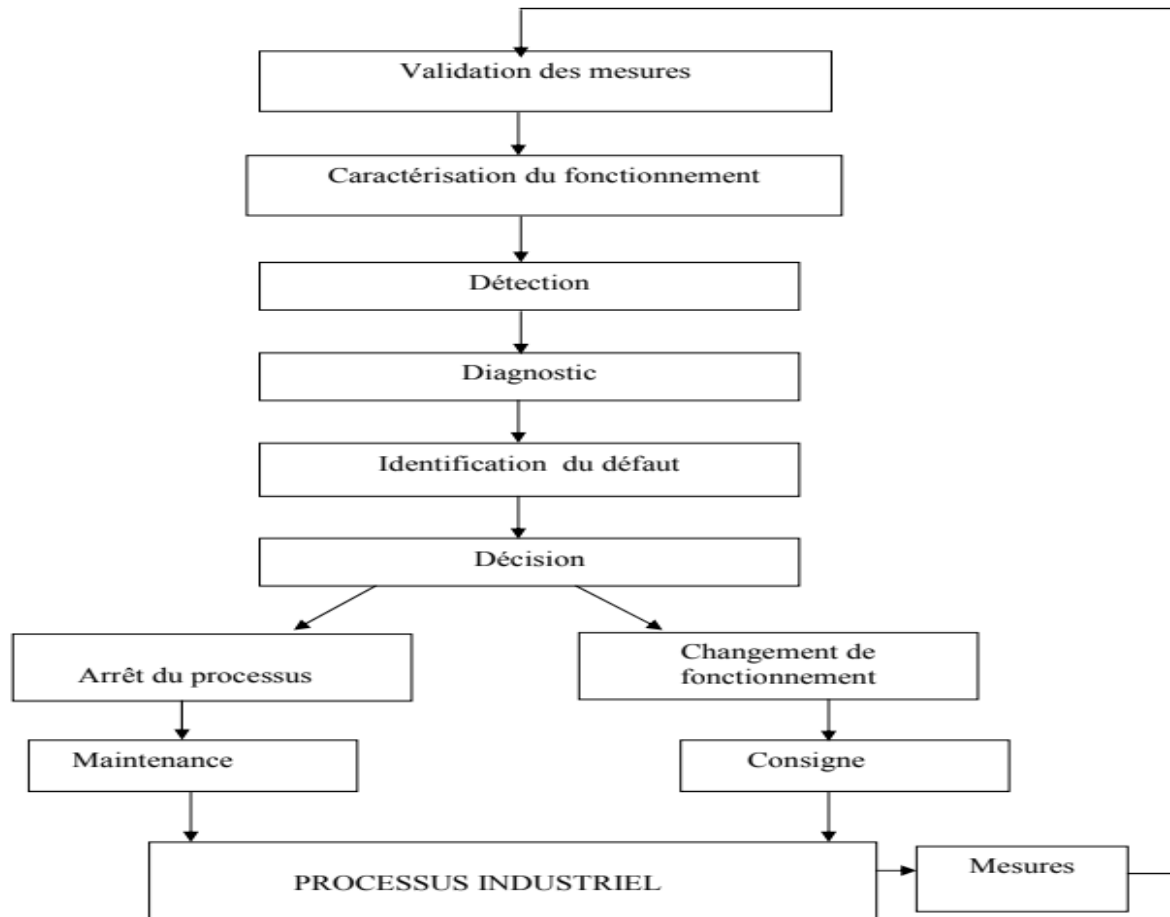


Figure I.11: Différentes phases de diagnostic[22].

I.7 Différentes méthodes de diagnostic :

I.7.1 Méthodes internes:

Ces méthodes reposent sur la comparaison des mesures réelles sur le système à surveiller et des informations qui fournissent le modèle. Les écarts caractérisent le fonctionnement du système :

- A un écart nul, le fonctionnement de type normal
- A un écart non nul, le fonctionnement de type défaillant

Ces méthodes internes se classent en deux grandes catégories ; les méthodes de redondance analytique qui utilisent les techniques d'estimation d'état et les techniques d'estimation paramétrique qui ont pour but d'estimer des paramètres de modèles[23].

Les méthodes internes de diagnostic se distinguent selon les modèles utilisés.

❖ **Modèle de simulation** : c'est une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce mode de diagnostic sont représentés Par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont prises en Compte de manière additive à travers des matrices, les défauts sont pris en compte soit de La même manière soit en modifiant la structure même du modèle. C'est dans cet esprit que Nous avons développé notre modèle de simulation[23].

❖ **Equations de parité** : une relation ou équation qui génère un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système et les équations de parité additionnelles sont obtenues par l'intermédiaire de transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic[23][9].

❖ **Observateurs** : un module capable d'engendrer une approximation du vecteur d'état est Appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une Représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic[15].

❖ **Estimation paramétrique** : l'estimation paramétrique est la détermination des valeurs des Paramètres qui gouvernent le comportement dynamique du système. Il s'agit de déterminer les valeurs numériques des coefficients des équations qui décrivent, au niveau de la structure, le modèle du système[2].

❖ **Modélisation des signaux** : dans cette méthode, le contenu spectral, l'évolution temporelle des variables mesurées sont exploitées pour détecter et localiser les défauts. L'analyse Spectrale plus particulièrement est utilisée depuis de très nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux défauts (rupture de barres, dégradation des roulements...) Se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine[2][9].

I.7.2 Méthodes externes:

Face à la difficulté liée à la génération de modèles physiques représentatifs du fonctionnement d'un système et de ses différents composants, les méthodes externes ont souvent prouvé leur efficacité. Ces méthodes exploitent les informations délivrées par les signaux des capteurs installés sur les machines, tels que les signaux vibratoires pour le cas des machines

tournantes, pour construire une image représentative « instance, observation » et l'assigner à son mode de fonctionnement.

Tout ceci est réalisé sur plusieurs étapes, en premier lieu l'information la plus complète possible est extraite à partir des signaux délivrés par les capteurs, sous forme d'indicateurs ; cette information est traitée ensuite via des techniques de transformation et de sélection d'indicateurs, pour la rendre plus robuste et plus pertinente ; l'ensemble d'indicateurs pertinents est utilisé par la suite comme vecteur d'entrée aux classifieurs permettant d'assigner les différentes instances et observations aux modes de fonctionnement. Ces méthodes semblent les plus adaptées au diagnostic des défauts des machines tournantes exploitant au mieux les informations issues des capteurs, installés sur les machines et ne nécessitant pas le développement de modèles élaborés, difficile dans ce cas complexe.

Les différentes étapes permettant le développement de cette méthode de diagnostic sont détaillées dans les sections suivantes[24].

I.7.3 Méthodes inductives:

Ces méthodes de diagnostic correspondent à une approche montante ou recherche en avant. Il s'agit de trouver le défaut à partir de ses effets sur le système. Ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui a pour objectif d'interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons afin de trouver le défaut[25].

I.7.4 Méthodes déductives:

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. À partir d'une connaissance a priori du défaut, la méthode déductive doit trouver quels sont les effets dans le système. Une vérification des « effets trouvés » par rapport aux « effets possibles » permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut, ce qui justifie notre raisonnement.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (avant ou arrière) soit une combinaison de raisonnements (avant et arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou avant-arrière. La connaissance « a priori » de la cause (défaut) implique la connaissance de certains effets (symptômes) [25].

I.8 Méthodes de détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage:

Afin de bien classer notre travail, il est très important de prendre une idée générale sur les différentes méthodes utilisées pour le diagnostic des anomalies dans les machines électriques.

Sachant que plusieurs travaux ont visés cet axe depuis longtemps, il existe par conséquent, plusieurs approches et techniques qui ont été largement étudiées [30]. Il est important de savoir que les différentes méthodes de diagnostic sont classées selon les approches auxquelles elles appartiennent. En effet, il existe deux approches : Approche Signal et Approche Modèle.

❖ Approche Signal

Pour effectuer le diagnostic d'une installation industrielle, les opérateurs de la maintenance analysent un certain nombre de signaux issus de la machine. En effet, l'évolution temporelle et le contenu spectral de ces signaux, peuvent être exploités pour détecter et localiser les anomalies qui affectent le bon fonctionnement de cette installation. La surveillance via cette approche nécessite une bonne connaissance des défauts et leurs signatures. D'après la littérature, les principales techniques du diagnostic utilisées sont les suivantes :

❖ Diagnostic par l'analyse des vibrations mécaniques

Le diagnostic des défauts en utilisant les vibrations mécaniques est la méthode la plus utilisée dans la pratique. Les forces radiales, créées par le champ d'entrefer, provoquent des vibrations dans la machine asynchrone. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique [31].

$$\sigma(\theta, t) = \frac{B_s^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (I- 8)$$

La distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer est le produit de la *FMM* et de la perméance (*P*).

$$B_s = Fmm \cdot P \quad (I- 9)$$

Les vibrations de la machine peuvent être captées par des accéléromètres placés sur les paliers selon les directions axiale, verticale et radiale. Les spectres des signaux de vibrations, issus du moteur avec défaut, sont comparés avec ceux de références enregistrées lorsque le moteur était en bon état. Cette méthode permet la détection aussi bien des défauts électriques que mécaniques puisque la force magnétomotrice contient les effets des asymétries du stator ou du rotor et la perméance dépend de la variation de l'entrefer (à cause des ouvertures des encoches statoriques, rotoriques et l'excentricité). Cependant, le coût des capteurs de vibration qui est relativement élevé, ainsi que les difficultés rencontrées dans la connexion de ces capteurs (problème d'accessibilité) représentent les limites et les inconvénients de cette méthode.

❖ Diagnostic par l'analyse du flux magnétique axial de fuite

La présence d'un défaut quelconque, provoque un déséquilibre électrique et magnétique au niveau du stator et du rotor ce qui affecte la répartition des du champ magnétique dans et hors la machine. Plusieurs auteurs se sont penchés à l'exploitation du flux axial. En fait, si on place une bobine autour de l'arbre de la machine, elle sera le siège d'une force électromotrice induite. Le contenu spectral de cette tension induite, peut être exploité pour détecter les différents défauts statoriques ou rotoriques [32].

❖ Diagnostic par l'analyse des tensions statoriques induites

La technique pour la détection des défauts rotoriques dans les machines asynchrones. Cette technique, est basée sur l'exploitation du contenu fréquentielle de la tension induite par le flux rotorique dans les enroulements statoriques, pendant la déconnexion du moteur du réseau. La rupture d'une barre va affecter directement la tension induite dans les enroulements statoriques. En utilisant cette approche, les effets de non – idéalité de la source (déséquilibres et présence des harmoniques du temps) peuvent être évités [33]. Cependant, l'application de cette technique est impossible lorsqu'il s'agit d'un moteur appartenant à une chaîne de production.

❖ Diagnostic par l'analyse du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé dans les machines électriques, provient de l'interaction entre le champ statorique et celui rotorique. Par conséquent, tout défaut, soit au niveau du stator ou au rotor, affecte directement le couple électromagnétique. L'analyse spectrale de ce signale , donne des informations pertinentes sur l'état du moteur. Cependant, la nécessité d'un équipement assez coûteux pour l'acquisition de cette grandeur représente l'inconvénient major de cette méthode[34].

❖ Diagnostic par l'analyse de la puissance instantanée

L'utilisation de la puissance instantanée pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones, a fait l'objet des nombreux travaux. Il est clair que le niveau d'informations portées par le signal de la puissance et plus grand que celui donné par le courant d'une seule phase, ce qui représente l'avantage de cette méthode par apport aux autres. Cette méthode est utilisée pour la détection des défauts mécaniques ou encore les défaut électriques tels que les courts-circuits entre spires statorique. Dans cette direction, M. Drif et al. ont démontrés l'efficacité de l'utilisation de la puissance apparente pour la détection d'un défaut d'excentricité [34].

❖ Diagnostic par l'analyse du courant statorique

Parmi tout les signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants, car, il est très facile d'accès et nous permet de détecter aussi bien les défauts électriques que les défauts purement mécaniques . Cette technique est dénommée dans la littérature "Motor Current Signature Analysis" (MCSA). Les défauts de la machine asynchrone se traduisent dans le spectre du courant statorique soit par [34]:

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

❖ Diagnostic par l'analyse du Vecteur de Park

Il y a deux versions de cette méthode ; la première, utilise les grandeurs biphasées i_{ds} et i_{qs} , qui sont calculées à partir des trois courants d'alimentation, pour l'obtention de la courbe de lissajou: $i_q = f(i_d)$. Le changement de l'épaisseur et de la forme de cette courbe donne une information sur le défaut .

La deuxième version de cette technique est appelée l'Approche Etendue du Vecteur de Park, qui est basée sur l'analyse spectrale du module du vecteur de Park $\left(\sqrt{i_d^2(t) + i_q^2(t)} \right)$. Elle présente beaucoup d'avantages quant à la détection des défauts statoriques ou rotoriques et même les défaut de roulement. On peut trouver d'autres variantes de cette technique dans [34].

I.9 Conclusion:

Ce chapitre a servi à l'exposition des défauts qui peuvent affecter la machines électriques défauts, leurs causes et leurs signatures, ainsi que les méthodes du diagnostic.

Comme nous avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude des techniques avancées pour le diagnostic des machines électriques défauts rotoriques.

Nombreuses sont les défaillances classiques courantes mais difficile a diagnostiquer sur les machines tournantes. Parmi lesquelles on trouve les défauts de roulements et les cassures des barres.

L'analyse et l'interprétation de ces méthodes de diagnostic nécessitent la connaissance au préalable d'un bon modèle de la machine qui sera l'objet du second chapitre.

Chapitre II:

Modélisation dédiée au diagnostic de la machine asynchrone à cage

II.1. Introduction:

La modélisation et la simulation des machines électriques constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux et la vérification des algorithmes de détection des défauts. Elles nous permettent aussi, de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Il est important donc, de synthétiser un modèle adapté au problème à traiter, décrivant le comportement de la machine non pas de la façon moyenne, comme pour la commande, mais d'une façon la plus fine possible. Donc la modélisation des machines électriques est une étape aussi bien pour le concepteur. Elle permet l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration d'un diagnostic. Un modèle basé sur les équations électriques et mécaniques des circuits est en générale suffisant pour faire la synthèse du diagnostic. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulation courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable. Les méthodes classiques d'étude de ce type de machine utilisent des modèles simples dans le repère (d, q) , négligeant un certain nombre de phénomènes. Ces modèles sont fréquemment affectés par les transformations et le changement d'axes de référence, ce qui conduit à des interprétations théoriques qui ne peuvent pas être utilisées pour analyser des effets localisés tels que les cassures des barres rotoriques de la machine en les distinguant des effets provenant d'autres incidents. D'autre part, ces modèles sont imprécis et ne décrivent qu'un fonctionnement sain de la machine [26]. Ainsi, il a fallu s'orienter vers des modèles plus sophistiqués (modèle multi - enroulements) pour une description adaptée aux défauts. La modélisation décrite dans ce chapitre a pour objet de permettre la représentation d'une rupture de barres pour une machine asynchrone à cage [27].

II.2. Modèle multi-enroulements:

La figure II.1 représente le rotor d'une machine asynchrone à cage assimilé à un enroulement polyphasé là où chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions d'anneau de court-circuit. Le circuit statorique est composé d'un enroulement triphasé qui peut être placé dans les encoches statoriques selon différentes manières définissant ainsi le type de bobinage adopté. Partant de cette structure, il serait possible d'établir les équations générales régissant le fonctionnement en se basant sur des hypothèses simplificatrices dont les plus importantes sont [28]:

- Pas de saturation dans le circuit magnétique.
- L'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.

- Pas de phénomène de l'effet de peau.
- La perméabilité du fer est supposée infinie.

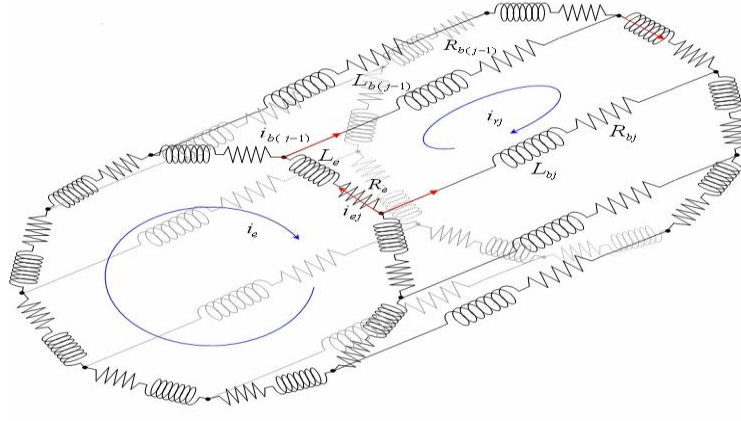


Figure II.1: Circuit électrique équivalent du rotor à cage basé sur la structure multi-enroulements[28].

II.2.1 Calcul des inductances :

II.2.1.1 Partie statorique :

En premier temps, on suppose que les enroulements statoriques sont idéalement distribués autour du périphérique de l'entrefer de sorte que l'induction résultante puisse être supposée sinusoïdale. Dans ce cas, l'expression de la **FMM** de la première phase statorique A sera.

$$F_A(\varphi) = \frac{2N_s}{\pi \cdot p} \cdot i_A \cos(p\varphi) \quad (II- 1)$$

N_s est le nombre total des tours de chaque phase, p le nombre de paires de pôles, φ un angle décrivant une position particulière dans l'espace ; cet angle est mesuré par rapport à une référence fixe par rapport au stator, et i_A le courant traversant la phase A. La densité du flux radial créée dans l'entrefer tiendra l'expression:

$$B_A(\varphi) = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi g_0 p} \cdot i_A \cos(p\varphi) \quad (II- 2)$$

où μ_0 désigne la perméabilité magnétique de l'air, et g_0 l'épaisseur de l'entrefer de la machine symétrique (entrefer constant).

Sachant que :

$$d\phi = B_A ds \quad (II- 3)$$

Par intégration de l'expression (II.3) autour d'un intervalle polaire, nous obtenons l'expression du flux magnétique dans l'entrefer par pôle tel que :

$$\phi = \int_0^l dz \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} B_A(\varphi) r d\phi \quad (II- 4)$$

Etant donné que l'entrefer de la machine est supposé uniforme, et qu'on néglige toute asymétrie axiale, l'expression (II.4) se réduit à:

$$\phi = \frac{4\mu_0 N_s r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (II- 5)$$

où r désigne le rayant moyen de l'entrefer de la machine symétrique, et l la longueur effective de la machine.

Le flux total traversant l'enroulement de la phase A dû au courant i_A est donné par.

$$\psi_A = \phi \cdot N_s = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2} \cdot i_A \quad (II- 6)$$

L'inductance de magnétisation et le flux par unité de courant. Par conséquent, elle est égale à :

$$L_{Am} = \frac{\psi_A}{i_A} = \frac{4\mu_0 N_s^2 r l}{\pi g_0 p^2} \quad (II- 7)$$

L'inductance totale dans la phase A est égale à la somme de l'inductance de magnétisation et l'inductance de fuite correspondant au flux de fuite d'encoches, au flux de fuite des têtes de bobines...etc. Son expression est :

$$L_A = L_{Am} + L_{fA} \quad (II- 8)$$

Les enroulements statoriques étant identiques et symétriques, ce qui fait que :

$$L_A = L_B = L_C \quad (II- 9)$$

Et du fait qu'ils sont décalés de $2\pi/3$, les inductances mutuelles entre enroulements statoriques auront pour valeurs:

$$L_{AB} = L_{BA} = L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \quad (II- 10)$$

$$L_{BC} = L_{CB} = L_{Am} \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \quad (II- 11)$$

$$L_{AC} = L_{CA} = L_{Am} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = \frac{-L_{Am}}{2} \quad (II- 12)$$

II.2.1.2 Partie rotorique :

En définissant les flux rotoriques qui entrent en jeux, et en faisant référence à la représentation équivalente du rotor, il sera possible de donner l'expression des différentes inductances. La figure II.2 représente, en fonction de l'ouverture angulaire φ' dans un référentiel lié au rotor, l'allure de l'induction magnétique dans l'entrefer, supposée radiale, produite par une maille rotorique. Cela en admettant que les barres rotoriques sont identiques, régulièrement décalées et séparées l'une de l'autre par un angle $\alpha_r = 2\pi/N_b$ (rad).

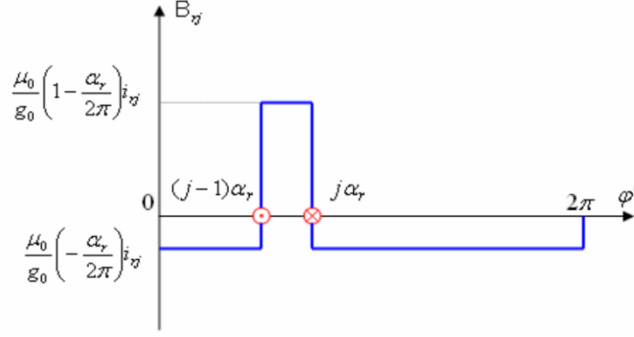


Figure II.2. Champ produit par une maille rotorique[20].

Chaque maille rotorique est considérée comme étant une bobine à une spire parcourue par un courant i_{rj} , et qui sera le siège d'un flux propre ψ_{rjrj} tel que :

$$\psi_{rjrj} = \int_0^l dz \int_{(j-1)\alpha_r}^{j\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi' \quad (II- 13)$$

Il en résulte que:

$$\psi_{rjrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(1 - \frac{\alpha_r}{2\pi}\right) \alpha_r \cdot i_{rj} \quad (II- 14)$$

Par conséquent, l'inductance de magnétisation est égale à :

$$L_{mrj} = \frac{\psi_{rjrj}}{i_{rj}} = \frac{2\pi\mu_0(N_b-1)rl}{g_0 N_b^2} \quad (II- 15)$$

L'inductance totale de la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique s'obtient par la sommation de l'inductance de magnétisation de cette maille et les inductances de fuite des deux barres et des deux portions d'anneau de court-circuit formant la maille. Son expression sera :

$$L_{rj} = L_{mrj} + L_{bj} + L_{b(j+1)} + 2L_e = L_{mrj} + 2(L_b + L_e) \quad (II- 16)$$

Les mailles rotoriques sont magnétiquement couplées par l'intermédiaire du flux rotorique d'entrefer. Le flux traversant la $k^{\text{ème}}$ maille rotorique, produit par le courant i_{rj} circulant dans la $j^{\text{ème}}$ maille rotorique est donné par :

$$\psi_{rkrj} = \int_0^l dz \int_{(k-1)\alpha_r}^{k\alpha_r} \frac{\mu_0 r}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi}\right) i_{rj} d\varphi' \quad (II- 17)$$

avec $k \neq j$, d'où :

$$\psi_{rkrj} = \frac{\mu_0 r l}{g_0} \left(\frac{-\alpha_r}{2\pi}\right) \alpha_r \cdot i_{rj} \quad (II- 18)$$

De ce fait, l'expression de L_{rkrj} sera donnée par :

$$L_{rkrj} = \frac{\psi_{rkrj}}{i_{rj}} \quad (II- 19)$$

Tenant compte des inductances de fuites, il est possible de déduire les expressions des inductances mutuelles entre la $j^{\text{ème}}$ maille et les autres mailles du circuit rotorique.

$$L_{r(j+1)j} = \frac{\psi_{r(j+1)rj}}{i_{rj}} - L_{b(j+1)} = \frac{-2\pi\mu_0 rl}{g_0 N_b^2} - L_b \quad (\text{II- 20})$$

$$L_{r(j-1)j} = \frac{\psi_{r(j-1)rj}}{i_{rj}} - L_{bj} = \frac{-2\pi\mu_0 rl}{g_0 N_b^2} - L_b \quad (\text{II- 21})$$

Et pour les mailles non adjacentes on obtient:

$$L_{rkj} = \frac{\psi_{rk rj}}{i_{rj}} = \frac{-2\pi\mu_0 rl}{g_0 N_b^2} \quad (\text{II- 22})$$

II.2.2 Mise en équations:

Le but de la mise en équations est d'effectuer une simulation numérique. Nous recherchons donc, l'ensemble des équations différentielles indépendants définissant le modèle de la machine.

II.2.2.1 Equations statoriques:

Les équations de tension et du flux statorique sont :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [R_s][I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abc}] \\ [\Phi_{abc}] = [L_s][I_{abc}] + [M_{sr}][I_{rk}] \end{cases} \quad (\text{II- 23})$$

Avec :

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^t \quad (\text{II- 24})$$

$$[I_{abc}] = [I_a \quad I_b \quad I_c]^t$$

$$[I_{rk}] = [I_{r0} \quad I_{rl} \quad \dots \quad I_{r(N_r-1)}]^t \quad (\text{II- 25})$$

$$[\Phi_{abc}] = [\Phi_a \quad \Phi_b \quad \Phi_c]^t \quad (\text{II- 26})$$

La matrice des résistances statoriques est :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II- 27})$$

La matrice d'inductances statoriques s'écrit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{sp} + L_{sf} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sp} + L_{sf} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sp} + L_{sf} \end{bmatrix} \quad (\text{II- 28})$$

La matrice des inductances mutuelles entre phases statoriques et mailles rotoriques s'écrit[27]

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \cos(\theta_r + ka) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3} \right) & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & -M_{sr} \left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3} \right) & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (II- 29)$$

Avec: $k=0, 1, 2, \dots, N_r-1$

II.2.2.2 Equations rotoriques:

Le modèle multi-enroulement , permet de mieux se rapprocher de la structure réelle de la cage rotorique.

Le rotor est assimilé à un enroulement polyphasé de (N_r+1) mailles, chaque maille est constituée de deux barres adjacentes et de deux portions des deux anneaux de court circuit. La figure II.3 illustre la modélisation du rotor par son schéma électrique équivalent. Ce découpage est largement suffisant pour l'étude des ruptures de barres ou d'anneaux. Par contre, la prise en compte des courants inters barres nécessiterait d'affiner encore le circuit.

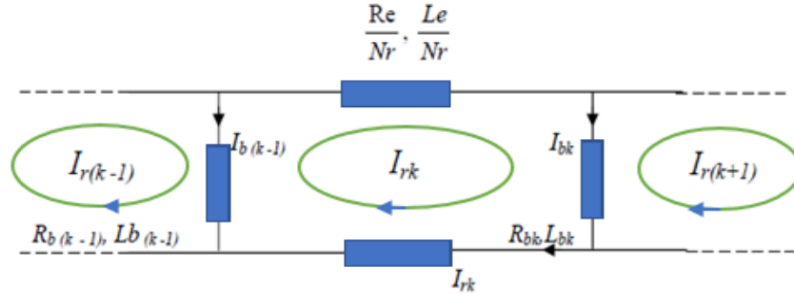


Figure II. 3. Schéma électrique équivalent des mailles rotorique[40].

Sachant que :

- Pour le nœud n^0_1 :

$$i_{bk} = i_{rk} - i_{r(k+1)} \quad (II- 30)$$

- Pour le nœud n^0_2 :

$$i_{b(k-1)} = i_{r(k-1)} - i_{rk} \quad (II- 31)$$

L'équation de la tension pour une maille 'k' de la cage rotorique est donnée par:

$$\frac{R_e}{N_r} i_{rk} - R_{b(k-1)} \cdot i_{b(k-1)} + \frac{R_e}{N_r} i_{ek} + R_{bk} i_{bk} + \frac{d}{dt} \Phi_{rk} = 0 \quad (II- 32)$$

Le flux totalisé Φ_{rk} pour un circuit élémentaire k est composé de la somme des termes suivants :

❖ Le flux principal :

$$\Phi_{rp} = L_{rp} I_{rk} \quad (II- 33)$$

❖ **Le flux mutuel avec les autres circuits du rotor:**

$$\Phi_{rr} = M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} \quad (II-34)$$

❖ **Le flux mutuel avec le stator:**

$$\Phi_{sr} = M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (II-35)$$

L'équation (II-36) devient donc:

$$0 = R_{bk} I_{r(k-1)} + \left(2 \frac{R_e}{N_r} + R_{b(k-1)} + R_{bk} \right) I_{rk} - R_{bk} I_{r(k+1)} - \frac{R_e}{N_r} I_e + \frac{d\Phi_{rk}}{dt} \quad (II-37)$$

D'où :

$$\Phi_{rk} = \left(L_{rp} + \frac{2L_e}{N_r} + 2L_b \right) I_{rk} - M_{rr} \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^{N_r-1} I_{rj} - L_b (I_{r(k-1)} + I_{r(k+1)}) - \frac{L_e}{N_r} I_e \quad (II-38)$$

$$M_{sr} \left[\cos(\theta_r + ka) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{2\pi}{3}\right) : \cos\left(\theta_r + ka - \frac{4\pi}{3}\right) \right] [I_{abc}] \quad (II-39)$$

Avec : $k=0, \dots, N_r-1$.

Il faut compléter le système d'équations des circuits du rotor par celle de l'anneau de court-circuit:

$$\frac{L_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} \frac{dI_{rk}}{dt} - L_e \frac{dI_e}{dt} - \left(R_e \cdot I_e - \frac{R_e}{N_r} \sum_{k=0}^{N_r-1} I_{rk} \right) = 0 \quad (II-40)$$

De la même façon on utilise les équations de $I_e(k)$ et $I_b(k)$ et on trouve :

$$\frac{R_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} I_{r(k)} + \frac{L_e}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \frac{d}{dt} I_{r(k)} - I_e \frac{d}{dt} I_e - R_e I_e = 0 \quad (II-41)$$

II.3 Equation d'état de la machine:

Le système est mis sous la forme canonique suivante :

$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \frac{d[L]}{dt} [I] \quad (II-42)$$

Avec :

$[V] = [v_a \ v_b \ v_c : 0 \ 0 \dots \dots 0 : 0]^t$: Le vecteur global des tensions $((N_r+4) \times 1)$. Il contient les trois tensions statoriques et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [i_a \ i_b \ i_c : i_{r0} \ i_{r1} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} : i_e]$: Le vecteur global des courants $((N_r+4) \times 1)$. Il contient les trois courants statoriques et les N_r courants des mailles rotoriques, ainsi que le courant de l'anneau de court-circuit.

❖ **La matrice globale des résistances est :**

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_s]_{3 \times 3} & : & [0]_{3 \times (N_r+1)} \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]_{(N_r+1) \times 3} & : & [R_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (II-43)$$

❖ La matrice des résistances rotoriques :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_{b0} + R_{b(N_f-1)} + 2\frac{R_c}{N_r} & -R_{b0} & .. & 0 & .. & .. & -R_{b(N_f-1)} & : & \frac{R_c}{N_r} \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ 0 & .. & -R_{b(k-1)} & R_{bk} + R_{b(k-1)} + 2\frac{R_c}{N_r} & -R_{bk} & .. & 0 & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ -R_{b(N_f-1)} & .. & 0 & .. & .. & -R_{b(N_f-2)} & R_{b(N_f-1)} + R_{b(N_f-2)} + 2\frac{R_c}{N_r} & : & \frac{R_c}{N_r} \\ & & & & & & & : & \\ \frac{R_c}{N_r} & .. & .. & .. & .. & .. & \frac{R_c}{N_r} & : & R_c \end{bmatrix} \quad (II- 44)$$

La matrice globale des inductances est donnée par :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_s]_{3 \times 3} & : & [M_{sr}]_{3 \times (N_r+1)} \\ ... & ... & ... \\ [M_{rs}]_{(N_r+1) \times 3} & : & [L_r]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (II- 45)$$

La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{tp} + 2L_b + 2\frac{L_c}{N_r} & M_{tr} - L_b & .. & .. & M_{tr} & .. & M_{tr} - L_b & : & -\frac{L_c}{N_r} \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ M_{tr} - L_b & .. & M_{tr} - L_b & L_{tp} + 2L_b + 2\frac{L_c}{N_r} & M_{tr} - L_b & M_{tr} & .. & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. & .. & : & .. \\ M_{tr} - L_b & .. & M_{tr} & .. & .. & M_{tr} - L_b & L_{tp} + 2L_b + 2\frac{L_c}{N_r} & : & -\frac{L_c}{N_r} \\ & & & & & & & : & \\ -\frac{L_c}{N_r} & .. & .. & .. & .. & .. & -\frac{L_c}{N_r} & : & L_c \end{bmatrix} \quad (II- 46)$$

La dérivée de la matrice globale des inductances est :

$$\frac{d[L]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \frac{d[M_{sr}]^t}{dt} & [0] \end{bmatrix} \quad (II- 47)$$

❖ Equation mécanique

Selon l'application à laquelle est désigné le moteur, il est possible de définir l'équation mécanique du mouvement associé.

$$J_T \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} + f_V \Omega_r = C_e - C_r \quad (II- 48)$$

C_e est le couple électromagnétique, C_r le couple résistant, f_v le coefficient de frottement visqueux et J_T le moment d'inertie total des parties tournantes.

Pour un circuit magnétique linéaire, la co-énergie est égale à l'énergie emmagasinée.

De ce fait vient :

$$C_e = \left[\frac{\partial W_{co}}{\partial \theta_r} \right]_{(I_s, I_r \text{ constant})} \quad (\text{II- 49})$$

avec :

$$W_{co} = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot [L] \cdot [I] \quad (\text{II- 50})$$

ce qui donne finalement l'expression du couple électromagnétique.

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I]^T \cdot \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot [I] \quad (\text{II- 51})$$

Si $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ sont constantes, et $[L_{sr}] = [L_{rs}]$, on obtient l'équation suivante du couple :

$$C_e = \frac{1}{2} \cdot [I_s]^T \cdot \frac{d[L_{sr}]}{d\theta_r} \cdot [I_r] \quad (\text{II- 52})$$

II.3.1 Système d'équations global:

Nous pouvons regrouper ces équations dans une représentation matricielle unique pour aboutir à [1]:

$$\begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r}) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} [I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\dot{I}] \\ \dot{\Omega}_r \\ \dot{\theta}_r \end{bmatrix} \quad (\text{II- 53})$$

et une forme condensée :

$$[U] = [B] \cdot [X] + [A] \cdot [\dot{X}] \quad (\text{II- 54})$$

où le vecteur $[\dot{X}]$ peut être écrit comme suit :

$$[\dot{X}] = [A]^{-1} \cdot [U] - [A]^{-1} \cdot [B] \cdot [X] \quad (\text{II- 55})$$

Nous faisons, ainsi, apparaître le vecteur d'état $[X]$ et le vecteur $[U]$ contenant les grandeurs externes à la machine tel que :

$$[U] = \begin{bmatrix} [V] \\ -C_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II- 56})$$

$$[X] = \begin{bmatrix} [I] \\ \Omega_r \\ \theta_r \end{bmatrix} \quad (\text{II- 57})$$

Avec la définition des matrices **A** et **B** donnée par:

$$[A] = \begin{bmatrix} \left([R] + \Omega_r \frac{d[L]}{d\theta_r}\right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2}[I]^T \frac{d[L]}{d\theta_r} & f_v & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (II- 58)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 \\ 0 & J_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II- 59)$$

On se retrouve ainsi face à un système d'équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Pour parvenir à la solution, une méthode numérique doit être mise en œuvre, la méthode explicite de *Runge Kutta* s'avère la plus utilisée dans ces cas. Bien avant ça, nous devons définir les matrices A et B de manière à traduire l'état interne de la machine, à savoir, état sain ou état de défaut.

II.3.2 Transformation de Park:

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, il est usuel de faire appel à une transformation dite transformation de Park. Elle permet le passage du repère réel triphasé (a, b, c) au repère d'axe (h, d, q).

Le système de grandeurs triphasées est tel que la somme instantanée des grandeurs est nulle. Ceci permet d'annuler la composante homopolaire[13].. Par conséquent, le repère (h, d, q) peut être réduit à un repère biphasé (d, q).

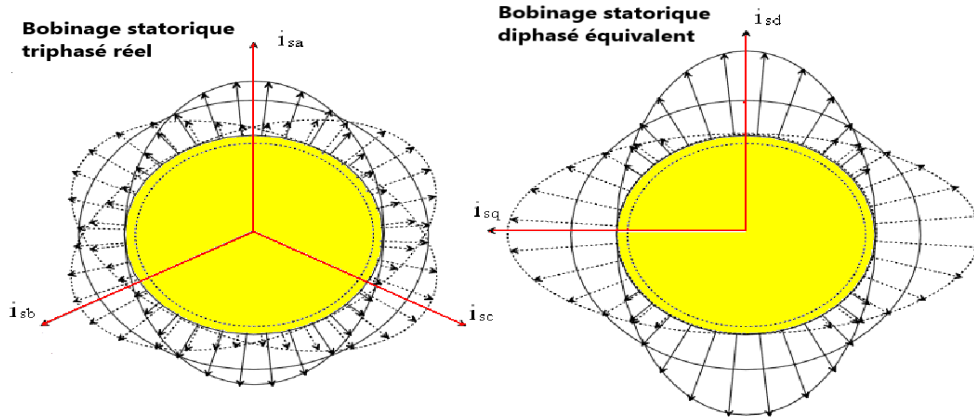


Figure II. 4. Transformation de PARK (a, b, c) à (d, q) [13].

La matrice de Park modifiée est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II- 60)$$

La dérivée de la matrice de Park est :

$$\frac{d}{dt}[P(\theta)] = -\omega \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta & \cos \theta \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II- 61)$$

On définit la matrice globale de Park de dimension $(N_r + 4) \times (N_r + 4)$ comme :

$$[T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0]^T & : & [1]_{(N_r+1) \times (N_r+1)} \end{bmatrix} \quad (II- 62)$$

Sachant que:

$[V] = [T][V_{tr}]$, avec : $[V_{tr}] = [v_{0s} \ v_{ds} \ v_{qs} : 0 \ 0 \ \dots \dots 0 : 0]^t$, le vecteur global des tensions de dimensions (N_r+4) , il contient les tensions statorique dans le repère de Park et les N_r tensions des mailles rotoriques, ainsi que la tension de l'anneau de court-circuit.

$[I] = [T][I_{tr}]$, avec : $[I_{tr}] = [i_{0s} \ i_{ds} i_{qs} : i_{r0} \dots i_{rk} \dots i_{r(N_r-1)} : i_e]^t$, le vecteur global des courants de dimensions (N_r+4) .

L'équation (II- 63) devient :

$$\begin{aligned} [T] \cdot [V_{tr}] &= [R] \cdot [T] \cdot [I_{tr}] + \frac{d[L]}{dt} [T] \cdot [I_{tr}] + [L] \frac{d[T]}{dt} [I_{tr}] + [L] \cdot [T] \frac{d[I_{tr}]}{dt} \\ [V_{tr}] &= \left([T]^{-1} [R] [T] + [T]^{-1} \frac{d[L]}{dt} [T] + [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} \right) [I_{tr}] + [T]^{-1} [L] [T] \frac{d[I_{tr}]}{dt} \\ [V_{tr}] &= (A + B + C) [I_{tr}] + D \frac{d[I_{tr}]}{dt} \end{aligned} \quad (II- 64)$$

Avec les termes A, B, C, D donnés par :

$$A = [T]^{-1} [R] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [R_s] [P(\theta)] & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [0] & : & [R_r] \end{bmatrix} \quad (II- 65)$$

$$B = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{sr}] \frac{d[P(\theta)]}{dt} & : & [0] \end{bmatrix} \quad (II- 66)$$

$$C = [T]^{-1} [L] \frac{d[T]}{dt} = \begin{bmatrix} [0] & : & [P(\theta)]^{-1} \frac{d[M_{sr}]}{dt} \\ \dots & \dots & \dots \\ [P(\theta)] \frac{d[M_{sr}]}{dt} & : & [0] \end{bmatrix} \quad (II- 67)$$

$$D = [T]^{-1} [L] [T] = \begin{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} [L_s] [P(\theta)] & : & [P(\theta)]^{-1} [M_{sr}] \\ \dots & \dots & \dots \\ [M_{rs}]^T [P(\theta)] & : & [L_r] \end{bmatrix} \quad (II- 68)$$

La mise en équation du modèle de la machine conduit à un système complet de dimension N_r+4 ;

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{0s} \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = [R_{tr}] \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \vdots \\ I_{r1} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \vdots \\ I_e \end{bmatrix} + [L_{tr}] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{0s} \\ \vdots \\ I_{r1} \\ \vdots \\ I_{r(N_r-1)} \\ \vdots \\ I_e \end{bmatrix} \quad (II- 69)$$

$[L_{tr}]$ et $[R_{tr}]$ sont les matrices globales des résistances et des inductances après la transformation de Park. A ces équations, on ajoute les équations électromagnétiques (II- 70) afin d'avoir la vitesse électrique et la position électrique θ_r du rotor.

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (C_e - C_r - k_0 \Omega_r) \\ \frac{d}{dt} \theta_r &= \Omega_r \end{aligned} \quad (II- 71)$$

II.4 Inductances mutuelles entre enroulements statoriques et rotoriques

Sachant que : $\theta = \theta' + \omega_r t$

Le champ magnétique dans l'entrefer dû au courant i_{sa} s'écrit en fonction de θ' lié au rotor de l'équation (II- 72), donne [20] [22]

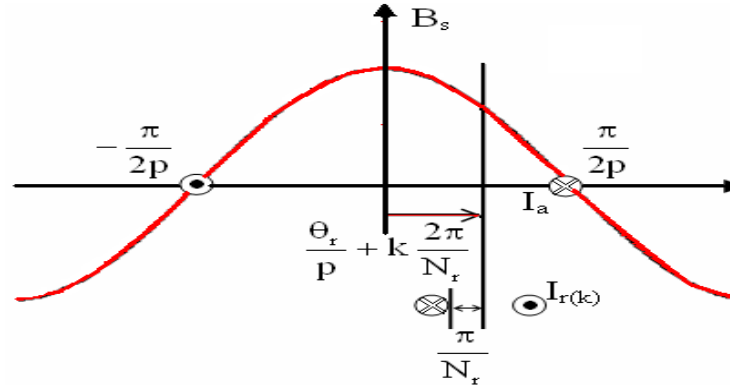


Figure II. 5.Position de la maille (k) par rapport à la bobine statorique de la phase "a" [20].

$$B_s(\theta') = \frac{2\mu_0 N_s i_{sa}}{e p \pi} \cos[(\theta' + \omega_r t)] \quad (II- 73)$$

D'où le flux traversant la maille k , produit par le courant i_{sa} , est donné par :

$$\phi_{rk\ sa} = \int_0^1 dz \int_{ka}^{(k+1)a} B_s(\theta') R \, d\theta' \quad (II- 74)$$

L'intégrale de l'équation ci-dessus conduit à [20] :

$$\phi_{rk\ sa} = L_{sr} i_{sa} \cos[\omega_r t + k a] \quad (II- 75)$$

L'inductance mutuelle entre la maille k et la phase "a" est donnée donc par la relation suivante :

$$M_{rk\ sa} = L_{sr} \cos(\omega_r t + k a) \quad (II- 76)$$

$$\text{Avec} : L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right) \quad (II- 77)$$

Et $a = p \frac{2\pi}{N_r}$ est l'angle électrique entre deux maille rotorique.

De même, les inductances mutuelles entre la $k^{\text{ème}}$ maille et les phases "b" et "c", sont exprimées par :

$$M_{rk\ sb} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (II- 78)$$

$$M_{rk\ sc} = L_{sr} \cos\left(\omega_r t + k a - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (II- 79)$$

Le tableau suivant, résume les expressions de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage.

INDUCTANCES	EXPRESSIONS
L'inductance principale d'une phase statorique.	$L_{sp} = L_{ms} = \frac{4\mu_0 N_s^2 R l}{e \pi p^2}$
L'inductance mutuelle entre phases statoriques	$M_s = -\frac{L_{sp}}{2}$
L'inductance totale d'une phase statorique	$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} = L_s = L_{sp} + L_{sf}$
L'inductance principale d'une maille rotorique	$L_{rp} = \frac{N_r - 1}{N_r^2} \mu_0 \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques non adjacentes	$M_{rr} = -\frac{\mu_0}{N_r^2} \frac{2\pi}{e} R l$
L'inductance mutuelle entre mailles rotoriques adjacentes	$M_{r_{k(k-1)}} = M_{r_{k(k+1)}} = M_{rr} - L_b$
L'inductance mutuelle entre une maille rotorique et une phase statorique "a".	$M_{rksa} = L_{sr} \cos(p \omega_r t + k a)$ $L_{sr} = \frac{4\mu_0 N_s R l}{e p^2 \pi} \sin\left(\frac{a}{2}\right)$ avec :

Tableau II. 1: Tableau récapitulatif de toutes les inductances de la machine asynchrone à cage [20].

II.5 Calcul des inductances en cas de court-circuit entre spires statorique

II.5.1 Exemple élémentaire

Soit le simple exemple élémentaire d'une bobine A'-X' à cinq spires occupant deux encoches tel que représente la (Figure.II.6) Lorsqu'un court-circuit apparaît entre les points de contact et a1 et a2 on obtient quelques spires en série et une spire additionnelle court-circuitée. Il en résulte moins de spires effectives dans le circuit de la phase; donc un affaissement de la FMM

résultante, et la création d'une nouvelle maille court-circuitée et couplée magnétiquement avec les autres circuits de la machine

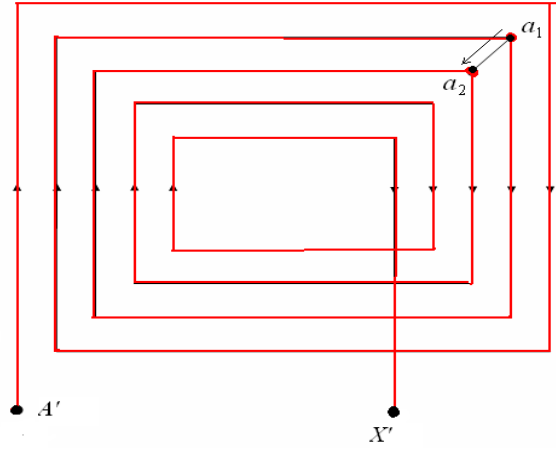


Figure.II.6 : Représentation élémentaire d'un court-circuit entre spires [20].

II.5.2 Système d'équations correspondant

La (Figure.II.6) représente le circuit statorique équivalent du nouveau système avec deux branches additionnelles, relatives aux spires court-circuitées et S_e contact relative à la branche de court-circuit.

R_{sd} représente la résistance effective de la branche court-circuitée, et est généralement petite, tandis que $R_{scontact}$ est la résistance de la branche de court-circuit qui doit être très grande dans l'état sain.

La simulation du court-circuit brusque consiste à faire annuler en un instant t_{cc} la résistance $R_{scontact}$. Il est à rappeler que la maille court-circuitée résultante est couplée magnétiquement avec les autres circuits de la machine, ce qui impose le calcul des nouvelles inductances toujours selon les notions préétablies. Aucun couplage ne sera envisagé avec la branche $scontact$ en raison de son caractère non inductif.

Quant au model mathématique, la formulation de base relative au système d'équations différentielles données par les équations (II- 80) et (II- 80) ne subit pas de grands changements, à part l'extension des vecteurs tension et courant en leurs nouvelles expressions données par

$$[V_s] = [V_{sA} \dots V_{sB} \dots V_{sC} \dots V_{sd} \dots V_{scontact}]^T \quad (II- 81)$$

$$[I_s] = [i_{sA} \dots i_{sB} \dots i_{sC} \dots i_{sd} \dots i_{scontact}]^T \quad (II- 80)$$

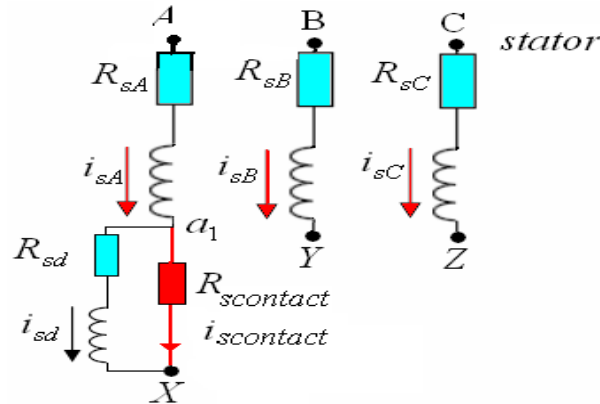


Figure.II.7: Représentation d'un circuit statorique contenant un court-circuit entre spires[20].

Et par conséquent, la réinitialisation des matrices inductances et résistances en tenant compte des branches nouvellement introduites [20]

II.6 Défaut rotorique

Défaut rotorique Pour que notre modèle reflète le cas réel ,nous avons ajouté à ce modèle un déséquilibre naturel (dû à la fabrication) dans le rotor puisqu'il n'y a pas réellement un rotor équilibré parfaitement Pour cela ; nous avons ajouté un léger défaut rotorique qui imite le maximum le cas réel .

Le type de panne que nous examinons est la rupture d'une ou plusieurs barres de rotor ou d'anneaux de court-circuit partiels. Le circuit rotorique présenté à la (Figure II.8) doit être reconsidéré afin de tenir compte des défauts rotoriques dans le modèle de la machine. (Figure II.9) Un diagramme montrant deux mailles adjacentes dans un état sain avec des barres cassées.

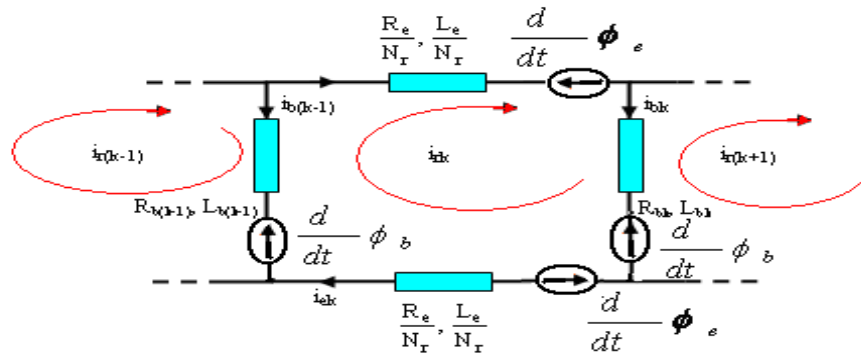


Figure.II.8: Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (moteur sain) [20].

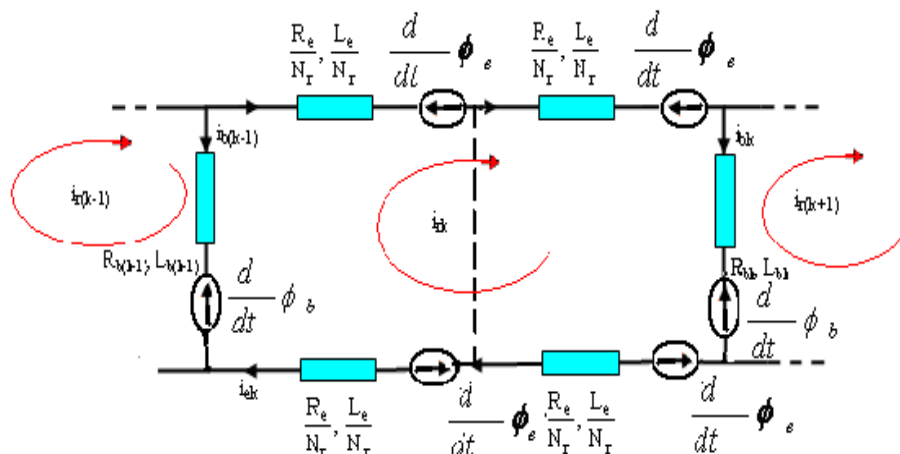


Figure.II.9: Schéma électrique équivalent simplifié d'une maille rotorique (rupture) d'une barre rotorique) [20].

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour simuler ce type de défaut dans le but de supprimer le courant à travers les barres concernées.

La première approche de modélisation consiste à reconstruire entièrement le circuit rotorique. Dans cette méthode, la barre de rotor défectueuse est retirée du circuit, ce qui signifie un recalcul des matrices de résistance $[R_r]$ et d'inductance $[L_r]$ de la machine à induction.

En effet, la suppression d'une barre de la cage nous donne des matrices $[R_r]$ et $[L_r]$ de rang inférieur à celle développée pour la machine saine.

La seconde approche envisageable consiste à augmenter artificiellement la valeur de la résistance de la barre ou de la portion d'anneaux incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.

En comparaison avec la première méthode, la structure du circuit électrique rotorique n'est pas modifiée car nous considérons, dans ce type de modélisation, qu'une rupture de barre n'altère pas les inductances propres et mutuelles de la cage rotorique.

Par conséquent, le programme de simulation s'adaptera à cette nouvelle contrainte et nous donnera l'évolution temporelle des différents signaux pour un fonctionnement de la machine avec ce type de défaut.

De plus, la simulation d'une barre partiellement cassée (barre fissurée de moitié par exemple) ne peut pas être envisagée, si nous utilisons la première méthode de modélisation alors qu'elle est tout à fait faisable avec la seconde [42]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté explicitement les étapes de construction du modèle mathématique de la machine asynchrone à cage d'écureuil adapté pour la simulation des ruptures de barres au rotor.

Nous avons tout d'abord adapté le modèle pour la simulation des ruptures de barres au rotor en présentant les hypothèses simplificatrices sur lesquelles repose le modèle multi-enroulement par la suite nous avons mis en équation et Calcul des inductances en cas de court-circuit entre spires statorique et résistance de notre machine.

Dans le chapitre suivant, des résultats de simulation de ce modèle pour différents essais (sain et défaillant) seront étudiés.

Chapitre III:

**Résultats expérimentaux
et de simulation**

III.1 Introduction

Comme a été mentionné dans le premier chapitre ,les défauts rotoriques sont causés par (cassure des barres, défaut d'excentricité,...).

Dans le présent chapitre, nous allons donner les résultats de la simulation effectuée, sur le modèle mathématique présenté dans le chapitre précédent correspondants au fonctionnement de la machine avec défaut.

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor. le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées.

nous allons faire des études comparatives entre les différentes méthodes de diagnostic afin de connaître les approches qui jouissent d'une la meilleure sensibilité face aux défauts rencontrés, pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.

III.2Théorie générale sur les harmoniques de la MAS:

Le champ d'entrefer d'un moteur à induction alimenté par un courant sinusoïdal est riche des différents harmoniques. L'analyse montre que ces harmoniques du flux d'entrefer qui sont dus aux interactions de la perméance d'entrefer et les harmoniques de la force magnétomotrice f.m.m.Il a été démontré que les harmoniques d'encoches rotoriques « Rotor Slots Harmonics» (RSH) sont générés dans la ligne de courant de stator pour une machine saine à des fréquences données par [35]:

$$f_{sh1,2}(k) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1-s) \right) f_s \right|_{k=1,2,3...} \quad (III- 1)$$

Nous remarquons que l'expression mathématiques (III.2) du flux direct et (III.3) du flux indirect montrent clairement que, en plus à la composante fondamentale, il existe aussi une série d'harmoniques appelée harmoniques d'encoches rotoriques d'ordre « h » et à des fréquences $f_{sh}(p, N_r, k)$

$$\psi_{sd} = L_{sc} I_{sd} + \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} N_r M_{srh} I_{rm} \cos(2\pi f_{sh} t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad (III- 2)$$

$$\psi_{sq} = L_{sc} I_{sq} - \sum_{h \in G} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2}} N_r M_{srh} I_{rm} \sin(2\pi f_{sh} t \pm h\varphi_h - \gamma) \quad (III- 3)$$

I_{rm} : la valeur du courant maximale rotorique

Notons aussi que la dérivée de l'expression mathématique du flux direct du stator (III.2) montre qu'il sera nul sauf en cas où « h » appartient à l'ensemble « G ». Pour cela seuls les RSH de l'ordre « h », qui appartiennent à l'ensemble « G », peut être détectés tel que [36]:

$$G = \left\{ \left(h = 1 \cup h = \left(\frac{\lambda N_r}{p} \pm 1 \right)_{\lambda=1,2,3,\dots} \right) \cap h = (6v \pm 1)_{v=1,2,3,\dots} \right\} \quad (III-4)$$

Mais dans le cas réel, il est très difficile de trouver une source d'alimentation parfaitement équilibrée, voire impossible, un bobinage bien centré ainsi qu'une géométrie idéalement symétrique. Un déséquilibre dans les tensions entraînera la création des courants de séquence négative (champ inverse) dans les enroulements statoriques qui donnent naissance à d'autres fréquences d'harmoniques dans les enroulements statoriques. Ce qui nous donne, enfin de compte, des harmoniques non seulement multiple de 3 mais impaire telles que : $f_s, 3f_s, 5f_s, 9f_s, \dots$ nous obtenons des harmoniques que ce soit pour le fonctionnement sain ou défectueux tel que [35]:

$$h = (2v + 1) \cdot |_{v=0,1,2,3,\dots} \quad (III-5)$$

En général, nous avons deux séries d'harmoniques :

1-une série d'harmoniques de temps « *Time harmonics* » (TH) créée par le non asymétrie de la f.m.m avec ($k=0$) de fréquences caractéristiques [37]:

$$f_{TH}(h) = hf_s \text{ ou } TH = hf_s \quad (III-6)$$

2- Une série d'harmoniques d'encoches rotoriques « *harmonics of rotor slots* » (RSH) de fréquences caractéristiques [35]:

$$f_{RSH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1-s) \right) f_s \right| \text{ ou } S^\pm = |(hf_s \pm kN_r f_r)| \quad (III-7)$$

Avec $h=1,3,5,\dots$

Ainsi, nous pouvons généraliser, notre étude, à la manière faite précédemment, sur le déséquilibre naturel de fabrication du rotor qui fait apparaître une série d'harmoniques « *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (RBFH) qui ressemblent à celles de cassure de barres rotoriques théorique.

De plus, il y a aussi le défaut naturel, d'excentricité statique et celui dynamique, qui produit l'excentricité mixte. Ceci entraîne aussi une série d'harmoniques d'excentricité mixte « *Eccentricity Fault Harmonics* » (EFH) [37].

3- Une série d'harmoniques de défaut de barres « *Harmonics of Rotor Bar Fault* » (RBFH) de fréquences caractéristiques [37] :

$$f_{RBFH}(h, k, s) = |(h \pm 2ks)f_s| \text{ or } R^\pm = |(h \pm 2ks)f_s| \quad (III- 8)$$

4- Une série d'harmoniques d'excentricité mixte « *Eccentricity Fault Harmonics* » (EFH) de fréquences caractéristiques [35]:

$$f_{EFH}(h, k, s) = \left| \left(h \pm \frac{kN_r}{p} (1 - s) \right) f_s \right| \text{ or } E^\pm = |(hf_s \pm kf_r)| \quad (III- 9)$$

Avec : $f_r = \left(\frac{N_r}{p} (1 - s) \right) f_s$: est. la fréquence rotorique. (voir Tab. III.1).

III.3 Etude du courant de stator avec ses harmoniques:

Nous allons focaliser notre étude autour des courants de phases, puisque le présent travail se base essentiellement sur l'analyse du spectre d'harmoniques existants. Ainsi, nous allons remplacer les harmoniques mentionnés ci-dessus (III.6) -(III.9) dans les expressions données par les courants instantanés circulant dans les trois phases "a", "b" et "c", de notre moteur asynchrone. Ces équations sont données par (III.10) [37]:

$\hat{I}_{THh}$, $\hat{I}_{S^\pm k}$, $\hat{I}_{R^\pm k}$ et $\hat{I}_{E^\pm k}$ sont, respectivement, le courant maximal de phase d'alimentation pour les TH , RSH, RBFH et EFH (ampères)(voir Tab. III.1), et finalement , t : est le temps réel (secondes).avec $m = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ et $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

$$\begin{cases} i_{sa}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m [\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^\pm h} \cos(2\pi S^\pm t) + \hat{I}_{R^\pm k} \cos(2\pi R^\pm t) \\ \quad + \hat{I}_{E^\pm k} \cos(2\pi E^\pm t)]] \\ i_{sb}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos\left(2\pi THt - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^\pm h} \cos\left(2\pi S^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) \right. \right. \\ \quad \left. \left. + \hat{I}_{R^\pm k} \cos\left(2\pi R^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) + \hat{I}_{E^\pm k} \cos\left(2\pi E^\pm t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right] \\ i_{sc}(t)_{sain} = \sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos\left(2\pi THt - \frac{4\pi}{3}\right) + \sum_{k=1}^n \left[\hat{I}_{S^\pm h} \cos\left(2\pi S^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) \right. \right. \\ \quad \left. \left. + \hat{I}_{R^\pm k} \cos\left(2\pi R^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) + \hat{I}_{E^\pm k} \cos\left(2\pi E^\pm t - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \right] \end{cases} \quad (III- 10)$$

Tableau III.1: Expression générale des différentes harmoniques du courant statorique[35].

Types d'harmoniques	Leurs fréquences caractéristiques	Leurs causes
Harmoniques de temps (TH):	$TH = hf_s$	Imposés par la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage
Harmoniques des encoches rotoriques (RSH)	$S^\pm = (hf_s \pm N_r f_r) $	Causés par la structure du rotor (distribution discrète des barres de rotor dans les encoches rotoriques)
Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)	$R^\pm = (h \pm 2ks)f_s $	Dus à l'asymétries du rotor de la cage rotorique
Harmoniques des défauts d'excentricité (EFH)	$E^\pm = (hf_s \pm kf_r) $	Dus à l'excentricité mixte naturelle du rotor

transformation de Park est utilisée pour passer du système triphasé (a-b-c) au système biphasé (dq). L'expression de transformation est présentée par [35].

$$i_{sd} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) i_{sa}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sb}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sc}(t) \quad (III- 11)$$

$$i_{sq} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_{sb}(t) - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_{sc}(t) \quad (III- 12)$$

Dans le cas idéal, où il y a seulement l'harmonique fondamental, les courants de vecteurs de Park $i_{sq}(t)$ et $i_{sd}(t)$ dans les Eqs (III.11) et (III.12) peuvent être simplifiées comme suit [39]

$$i_{sd}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \sin(2\pi f_s t) \quad (III- 13)$$

$$i_{sq}(t)_{sain} = \frac{\sqrt{6}}{2} \hat{I}_{TH1} \cos(2\pi f_s t) \quad (III- 14)$$

Mais dans le cas réel de fonctionnement, où il existe naturellement le déséquilibre des tensions de la source d'alimentation ou l'asymétrie du bobinage, l'asymétrie du rotor de la cage rotorique et l'excentricité mixte naturelle du rotor, et après le remplacement dans l'Equation (III.13) et (III.14), nous trouvons les expressions suivantes [35], [37]:

$$\begin{aligned} i_{sd}(t)_{sain} &= \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \sin(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm h}} \sin(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm k}} \sin(2\pi R^{\pm}t) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \hat{I}_{E^{\pm k}} \sin(2\pi E^{\pm}t) \right] \right] \right] \\ i_{sq}(t)_{sain} &= \frac{\sqrt{6}}{2} \left[\sum_{h=1}^m \left[\hat{I}_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}_{S^{\pm h}} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm k}} \cos(2\pi R^{\pm}t) \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \hat{I}_{E^{\pm k}} \cos(2\pi E^{\pm}t) \right] \right] \right] \end{aligned} \quad (III- 15)$$

Maintenant, on va faire la visualisation expérimentale de cette théorie.

III.3.1 Analyse du spectre MCSA:

III.3.1 Défaut de rupture de barres rotoriques:

S'il y aurait un défaut rotorique, nous pouvons constater en visualisant le spectre du courant [35][37].

a)- La plupart des TH s'amplifient, au contraire, il y a d'autres leurs amplitudes diminuent tels que : $5f_s$, $13f_s$, $15f_s$.

b)- La plupart des RSH a une diminution remarquable à l'exemple de : $|3f_s - N_r f_r|$, $|15f_s - N_r f_r|$, $|11f_s - N_r f_r|$ et $|17f_s - N_r f_r|$.

c)- La majorité écrasantes des RBFH, qui représente les signatures théoriques des barres cassées du rotor, est également augmentée à l'exception de quelques RBFH qui se trouvent autour des TH : $5f_s, 13f_s, 15f_s$

Tel que $(3 \pm 4s)f_s, (5 - 4s)f_s, (5 - 2s)f_s, (13 - 2s)f_s, (15 - 2s)f_s$

Cependant l'augmentation considérable des autres comme $(1 \pm 2s)f_s$ offrent une bonne signature pour la détection des cassures de barres.

d)- La majorité des EFH, qui représentent les signatures théoriques de l'excentricité entrefer, sont augmentées avec des valeurs remarquables [37]. Alors, on déduit que les EBFH et EFH sont sensibles au défaut rotorique pour cette méthode. Dans cette étude, nous allons ignorer l'augmentation très faible du glissement durant le défaut ($s' \approx s$). Par conséquent, nous obtenons l'expression suivante du courant de stator en cas de défaut statorique ou rotorique:

$$i_{sa}(t)_{d\acute{e}aut} = \sum_{h=1}^m [\hat{I}'_{THh} \cos(2\pi THt) + \sum_{k=1}^n [\hat{I}'_{S^{\pm}h} \cos(2\pi S^{\pm}t) + \hat{I}_{R^{\pm}k} \cos(2\pi R^{\pm}t) + \hat{I}'_{E^{\pm}k} \cos(2\pi E^{\pm}t)]] \quad (III. 16)$$

Avec

$$\hat{I}'_{THh} \neq \hat{I}_{THh}, \hat{I}'_{S^{\pm}h} \neq \hat{I}_{S^{\pm}h}, \hat{I}'_{R^{\pm}k} \neq \hat{I}_{R^{\pm}k} \text{ and } \hat{I}'_{E^{\pm}k} \neq \hat{I}_{E^{\pm}k} \quad (III. 17)$$

(s' : est le glissement en cas de défaut)

III.4. Etude comparative entre la méthode classique MCSA et celle avancée MSCSA

III.4.1. Première méthode en utilisant l'indice (de Diagnostic) partiel relatif

Cette méthode est utilisée par [45] puisqu'il peut donner une excellente comparaison entre les différentes approches étudiées. Cette méthode nous donne un résultat global de toutes les différences d'amplitudes entre l'état sain et l'état défaillant.

Notre calcul analytique s'étendra à la fréquence 500 Hz ou 550 Hz, en tenant compte des harmoniques dont les amplitudes sont plus importantes.

Dans notre étude, on va utiliser deux harmoniques TH Time Harmonics (harmonique de temps) et RBFH Harmonics of Rotor Bar Fault (Harmoniques des défauts de barres rotoriques)

$$IPR_{AP.H} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{AP.H}} [\text{Amplitude}(AP.H)_i]}{N_{AP.H}} \right)_{\text{moteur avec défaut}}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{AP.H}} [\text{Amplitude}(AP.H)_i]}{N_{AP.H}} \right)_{\text{moteur sain}}} \quad (III. 16)$$

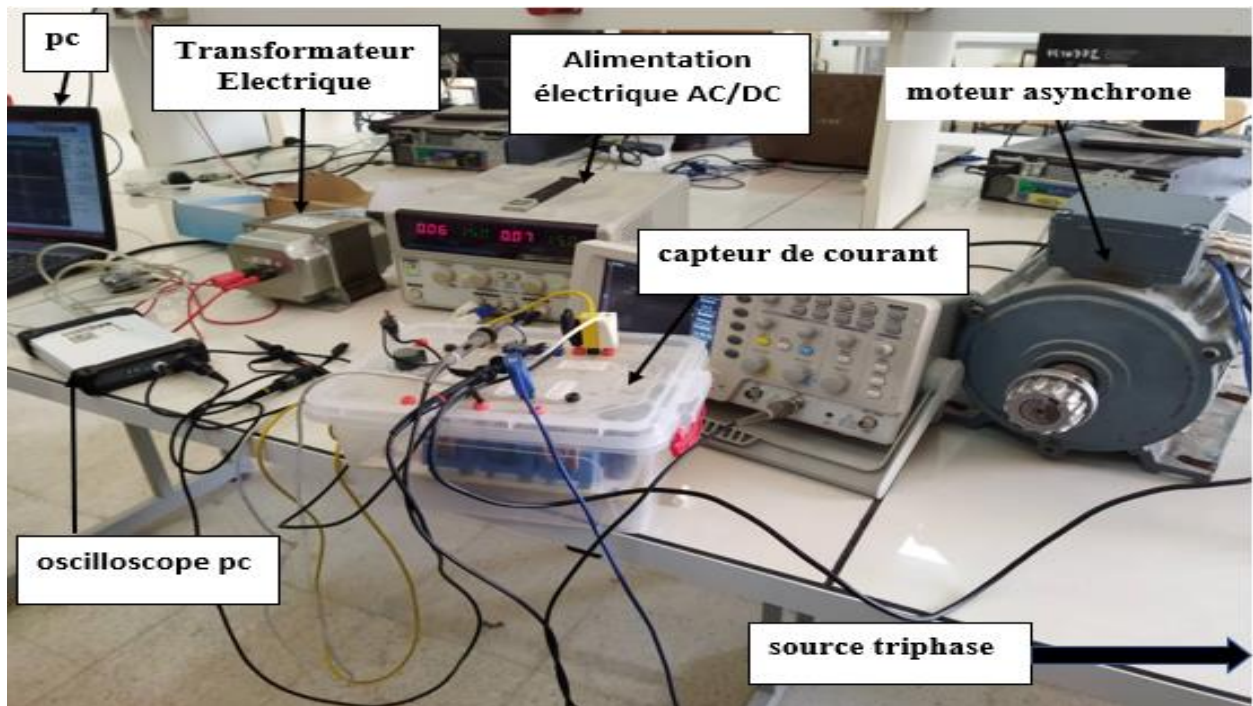


Figure III. 2: Installation expérimentale moteur avec cassure de barres et de portions d'anneaux résultats expérimentaux relative au courant moteur

III.4.1.1. Harmoniques de temps (TH)

III.4.1.1.1.Méthode MCSA

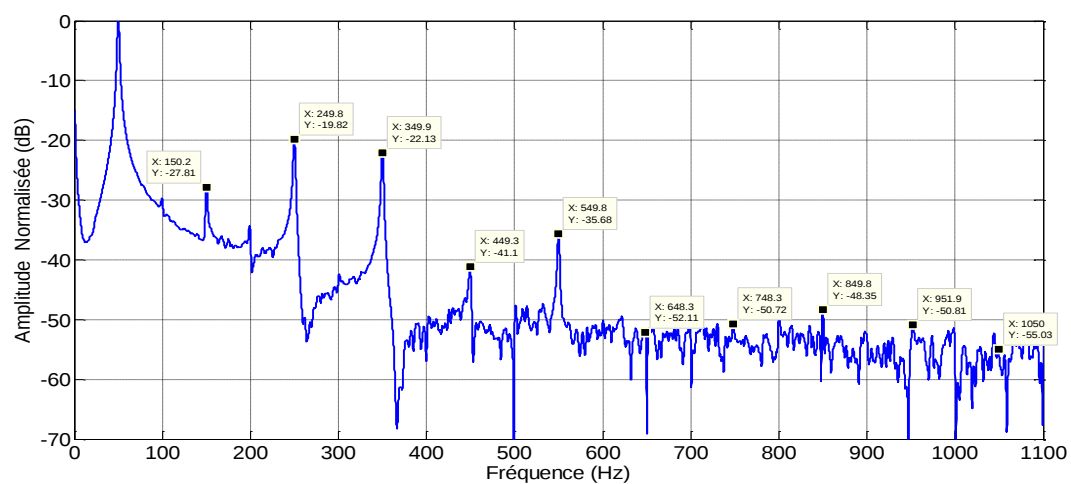


Figure III 2: Spectre expérimental du courant statorique MCSA harmoniques de temps (moteur sain)

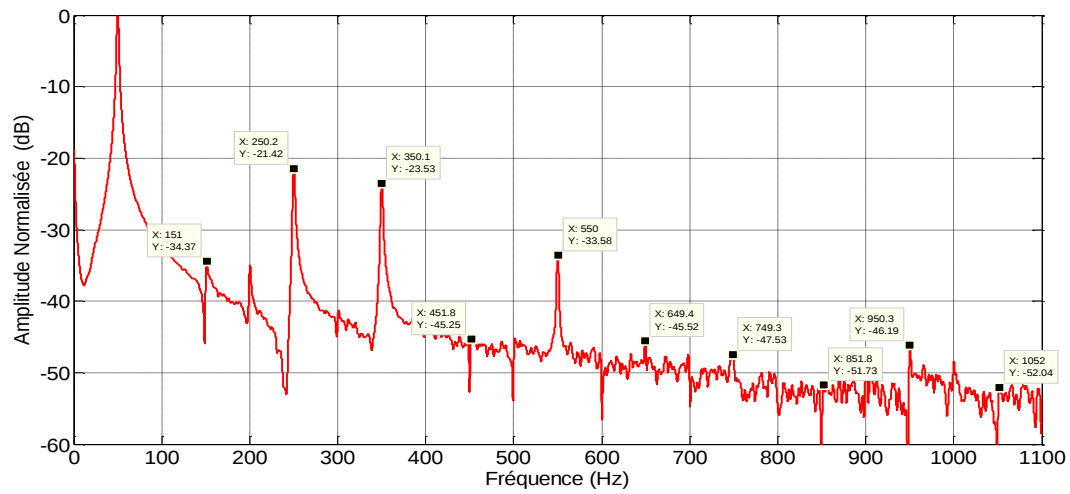


Figure III 3: Spectre expérimental du courant statorique MCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique)

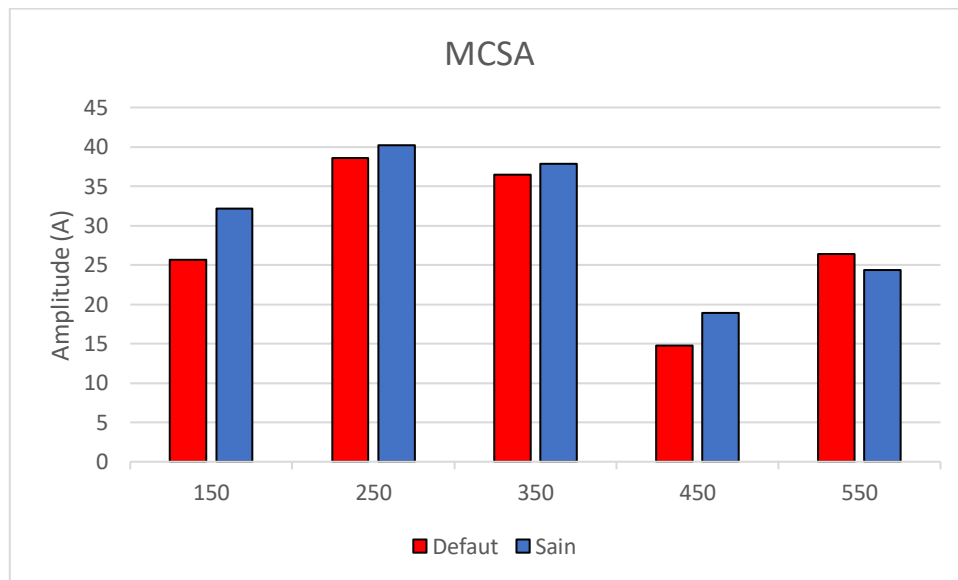


Figure III 4 : Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA

• Interprétation des résultats

La Figure III.2 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 150 Hz à 550 Hz dans le cas d'une machine saine.

La Figure III.3 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 150Hz à 550 Hz dans le cas d'une machine avec barres cassées

La Figure. III. 4 nous montrent la variation de l'amplitude des harmoniques de temps pour le cas d'un moteur sain et avec moteur avec barres cassées en utilisant la technique avancée MCSA

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques en fonction du rang de cet harmonique Peut être :

- Une augmentation comme le rang 11 pour la fréquence 550 Hz
- Une baisse pour les rangs 3, 5, 7 et 9 pour les fréquences 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz et 450 Hz

III.4.1.1.2.Méthode MSCSA

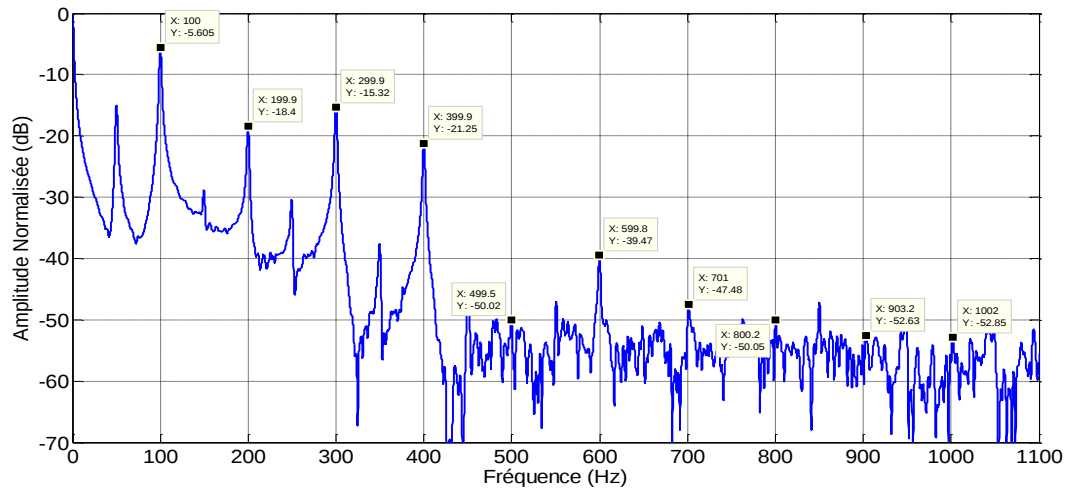


Figure III 5: Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur sain)

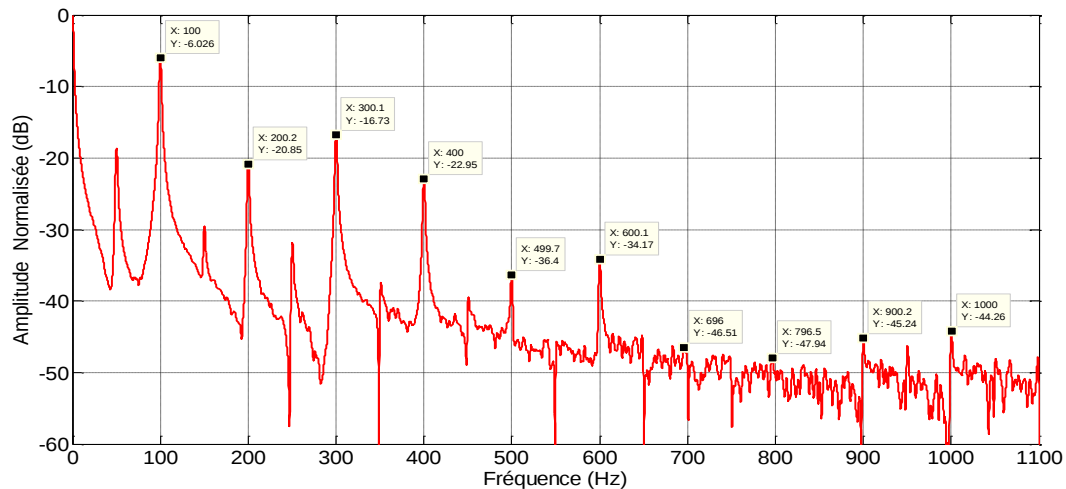


Figure III 6: Spectre expérimental du courant statorique MSCSA harmoniques de temps (moteur avec défaut rotorique)

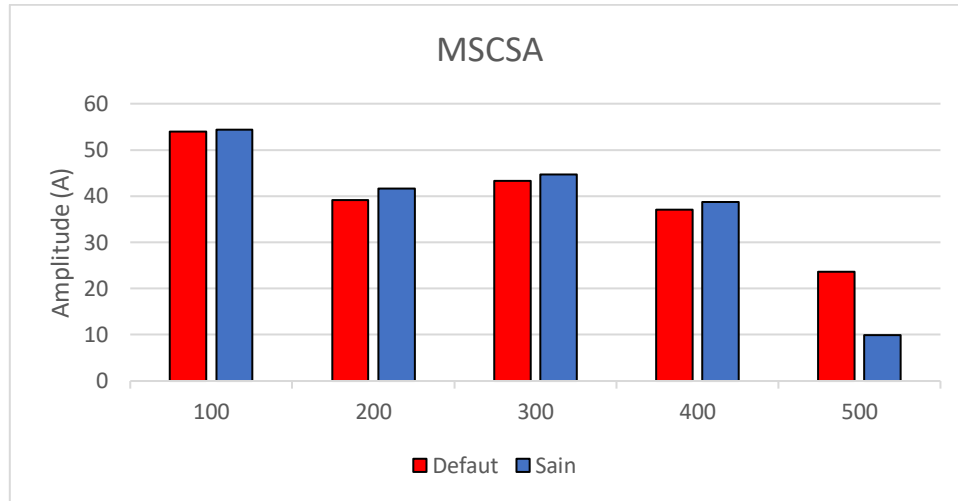


Figure III 7 : Représentation des amplitudes d'harmoniques de temps de la technique MCSA

• Interprétation des résultats

La Figure III.5 , nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 100 Hz à 500 Hz dans le cas d'une machine saine.

La Figure III.6, nous fait observer les cinq harmoniques, où il représente 5 harmoniques contrastées en amplitudes différentes entre 100Hz à 500 Hz dans le cas d'une machine avec 3 barres cassées

La Figure. III.7,nous montrent la variation de l'amplitude des harmoniques de temps pour le cas d'un moteur sain et avec moteur avec 3 barres cassées en utilisant la technique avancée MSCSA

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques en fonction du rang de cet harmonique peut être :

- Une augmentation comme le rang 11 pour la fréquence 500 Hz
- Une baisse pour les rangs 3, 5, 7 et 9 pour les fréquences 100 Hz, 200 Hz , 300 Hz et 400 Hz

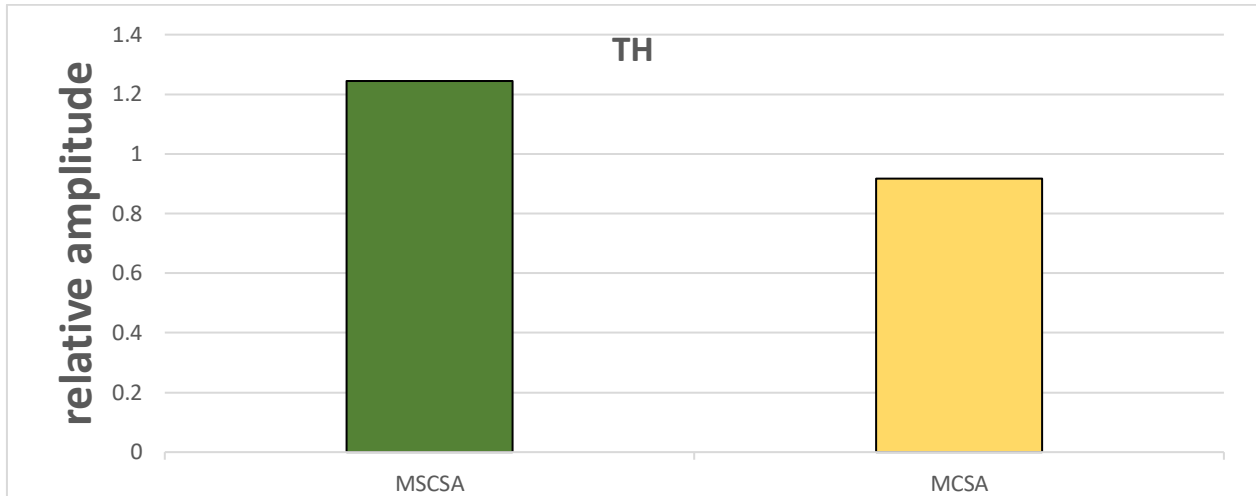


Figure III 8 : Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA en utilisant l'harmonique de temps (TH)

- **Interprétation des résultats**

La Figure III. 8 nous montrent la différence relative entre les amplitudes des harmoniques de temps des techniques MCSA et MSCSA où l'on note une différence positive donnée par Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques de temps TH .

Cette différence, nous montre clairement que le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques de temps TH donnée par l'Indice partiel relatif.

III.4.1.2 Harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH)

- **Méthode MCSA**

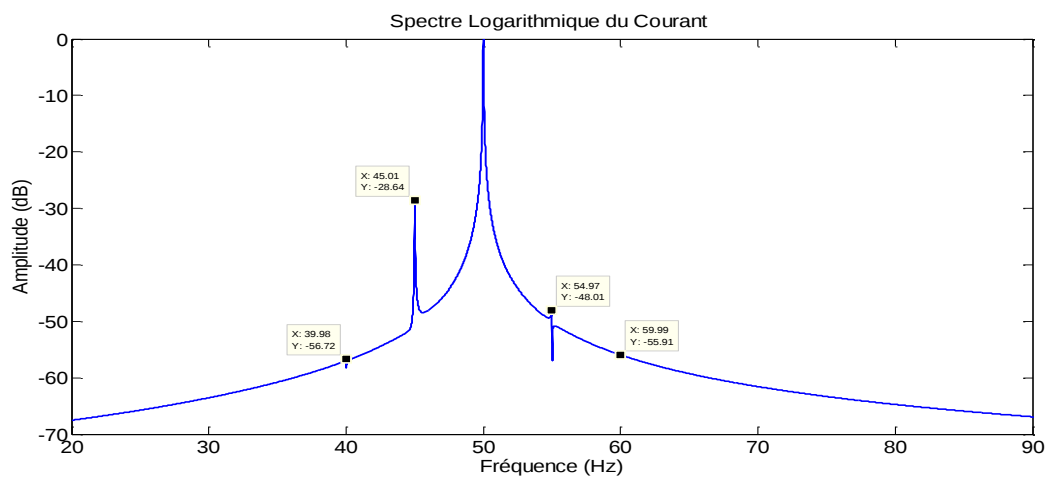


Figure III 9: Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) pour un (moteur sain)

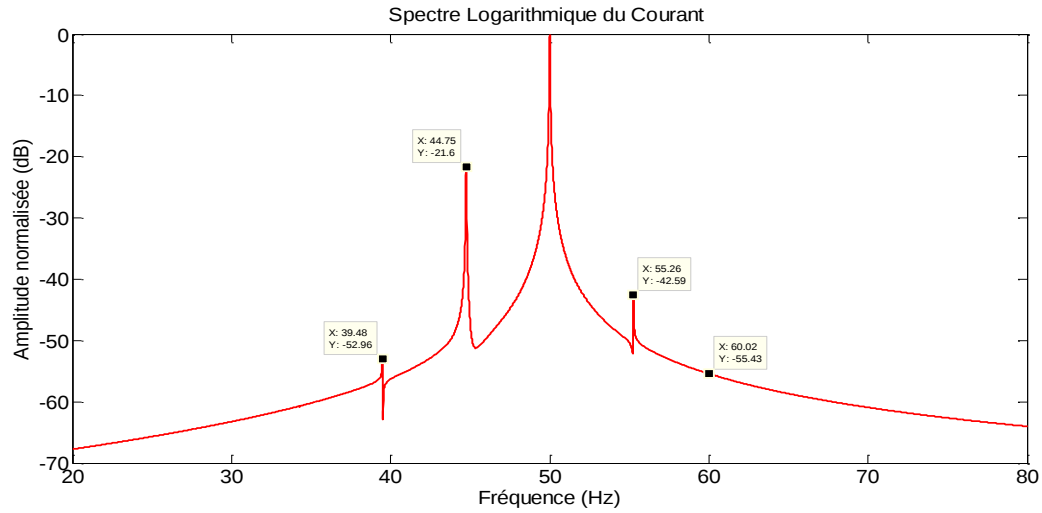


Figure III 10: Spectre de simulation du courant statorique MCSA avec 4 Harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)

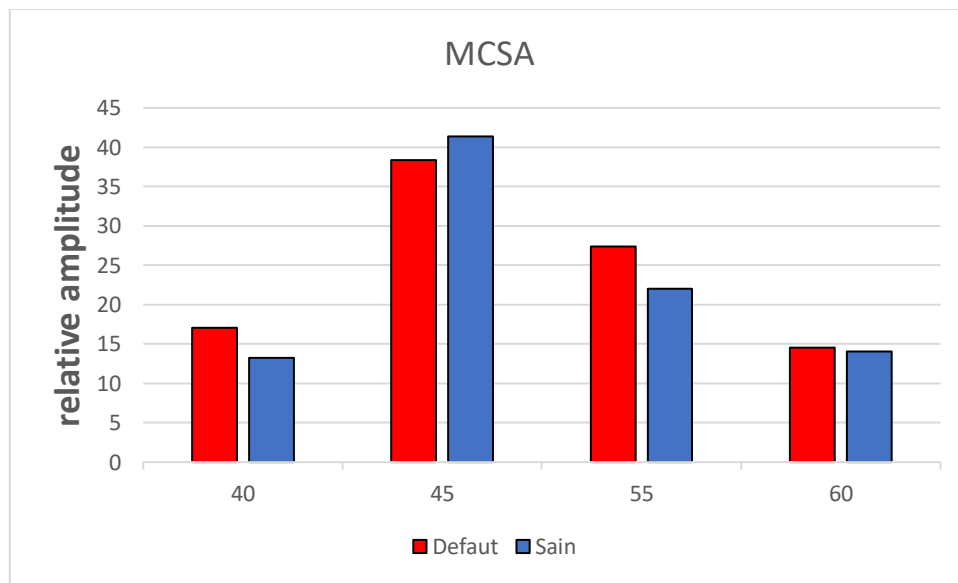


Figure III 11 : Représentation des amplitudes d'harmoniques (RBFH) pour MCSA

• Interprétation des résultats

La Figure III. 9 montrent que les harmoniques étudiés est entre les fréquences (40Hz à 60 Hz) dans le cas d'une machine saine en utilisant la technique avancée MCSA.

La Figure III. 10 montrent que les harmoniques étudiés est entre les fréquences (40Hz à 60 Hz) dans le cas d'un défaut rotorique en utilisant la technique avancée MCSA.

La Figure. III. 11 nous montrent la variation de l'amplitude des (RBFH) pour le cas

d'un moteur sain et avec moteur avec cassure de 3 barres en utilisant la technique avancée MCSA.

On observe une variation de l'amplitude des harmoniques.

On observe une variation des amplitudes des raies en fonction de la valeur du nombre $k=1,2,3,\dots$ $R^\pm = |(h \pm 2ks)f_s|$ appartenant à l'harmonique du rang 1 peut être :

- Une augmentation pour les raies donc $k=1,3$ et 4
- Une baisse pour la raie $k=2$

• Méthode MSCSA

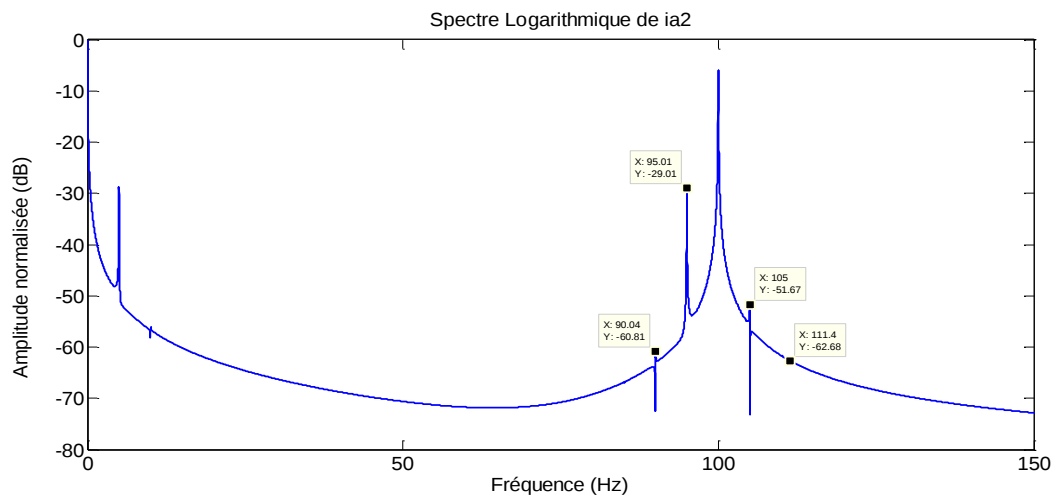


Figure III 12: Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur sain)

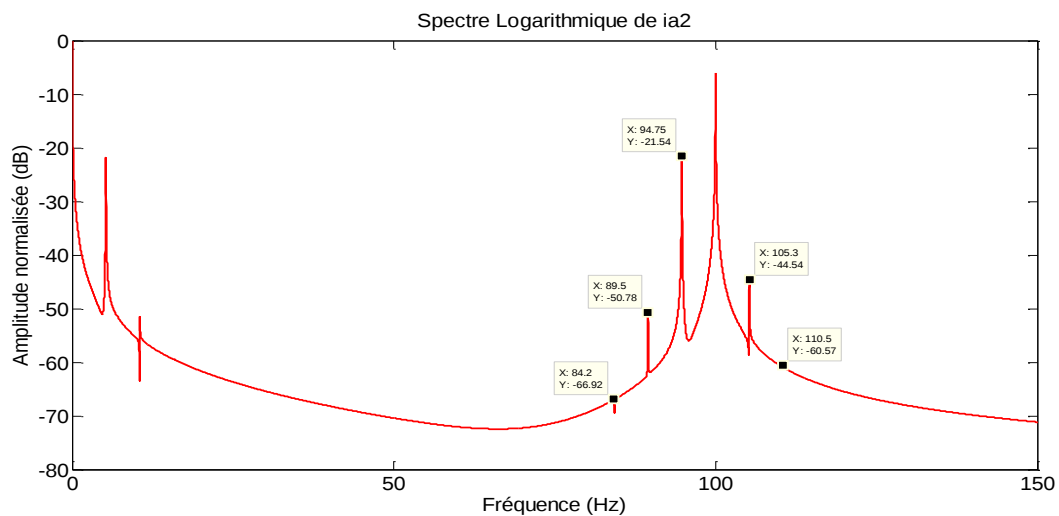


Figure III 13: Spectre de simulation du MSCSA avec ses harmoniques (RBFH) (moteur avec défaut rotorique)

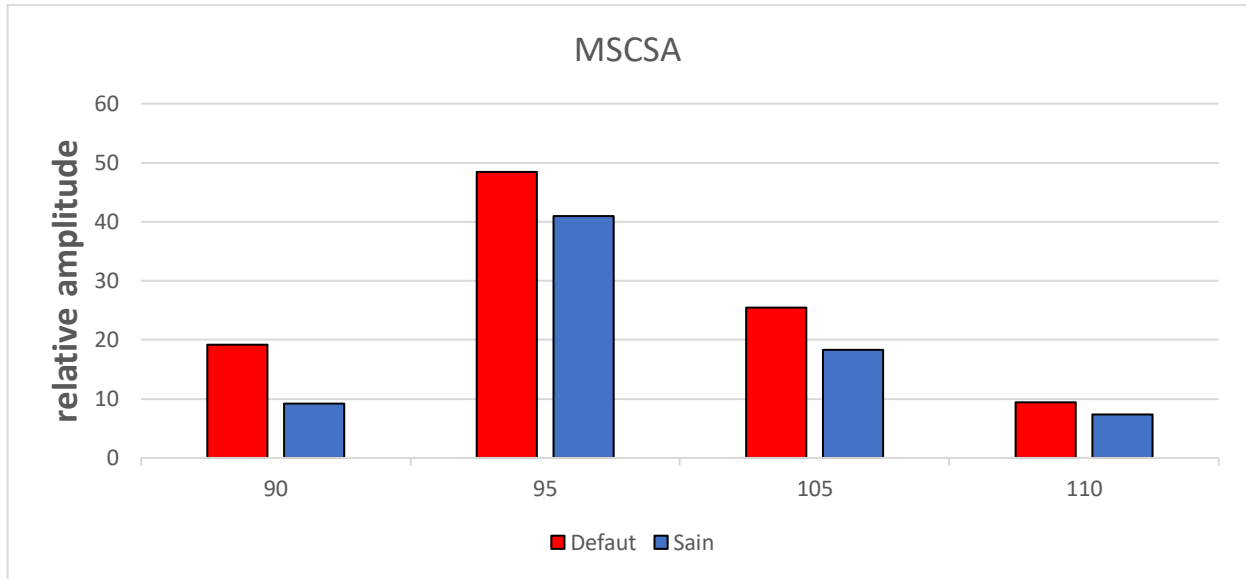


Figure III 14: Représentation des amplitudes harmoniques (RBFH) pour MSCSA

• Interprétation des résultats

La Figure III.12 montrent que les harmoniques (RBFH) étudiés se situent entre les fréquences (90Hz à 110Hz) dans le cas d'une machine saine par la technique MSCSA avancée.

La Figure III.13 montrent que les harmoniques (RBFH) étudiés se situent entre les fréquences (90Hz à 110Hz) dans le cas d'un moteur avec défaut rotorique par la technique MSCSA avancée.

La Figure. III. 14 nous montrent une augmentation de toutes les amplitudes des harmoniques (RBFH) pour le moteur avec cassure de 3 barres par rapport d'un moteur sain et avec moteur avec cassure de 3 barres en utilisant la technique avancée MSCSA.

On observe une variation des amplitudes des harmoniques (RBFH) en fonction de la valeur du nombre $k = 1, 2, 3, \dots$. $R^{\pm} = |((h - 1) \pm 2ks)2f_s|$ appartenant à l'harmonique du rang $h=3$ peut être :

- Une augmentation totale pour des amplitudes des harmoniques (RBFH) donc $k = 1, 2, 3$ et 4

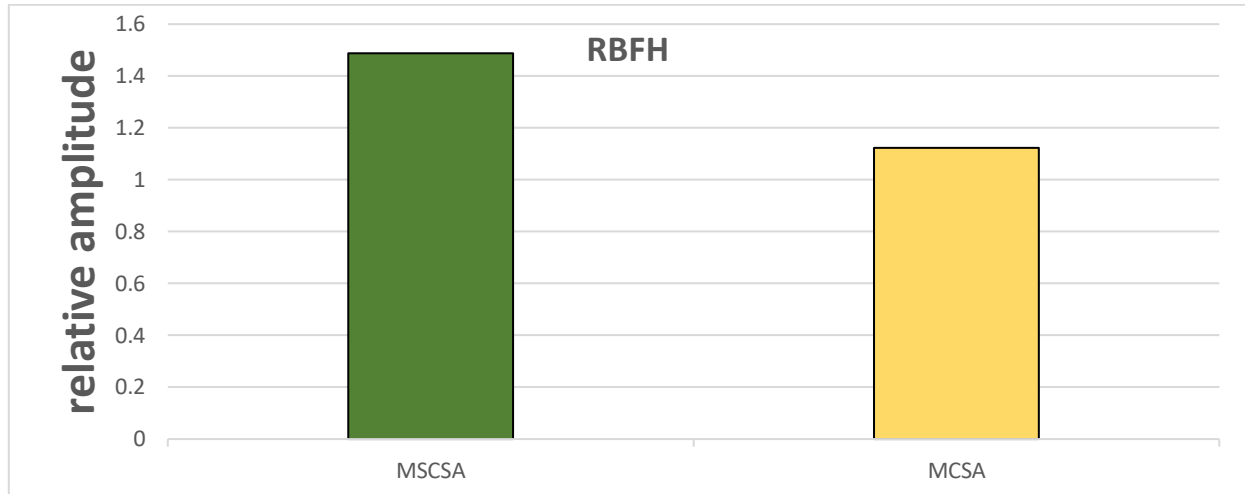


Figure III 15:Indice partiel relatif des techniques MCSA et MSCSA d'après l'harmonique RBFH

- **Interprétation des résultats**

La Figure III.15 nous montrent la différence relative entre les amplitudes des harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) des techniques MCSA et MSCSA où l'on note une différence positive donnée par Indice partiel relatif des technique MCSA et MSCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) .

Cette différence, nous montre clairement que le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) donnée par l' Indice partiel relatif

III.4.1.3 utilisant l'indice (de diagnostic) global relatif

Enfin, on retrouve les « index relatifs globaux » (GRI) qui vont nous donner une sensibilité globale pour chaque approche.

$$IGR_{AP} = \frac{IPR_{AP.TH} + IPR_{AP.RBFH}}{2} \quad (III- 16)$$

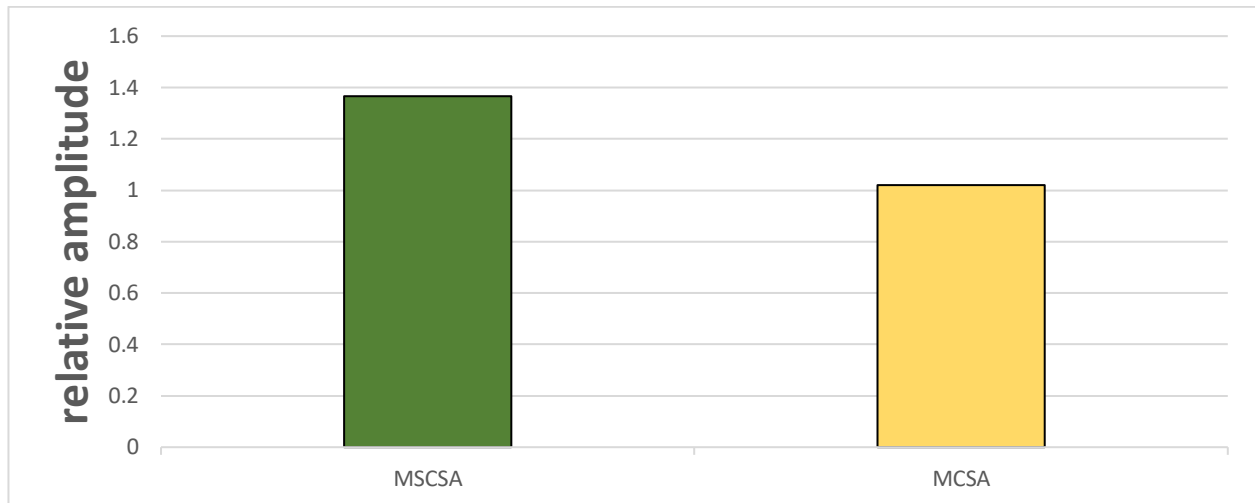


Figure III 16:Indice global relatif le plus sensible de technique (TH) et (RBFH)

- **Interprétation des résultats**

D'après la Figure III.16 nous remarquons que l'Indice global relatif de la technique MSCSA est plus sensible que la technique MCSA

Cette étude nous pouvons l'utiliser pour faire un système de diagnostic automatique plus fiable en se basant sur les points fort de chaque technique de diagnostic.

III.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats expérimentaux et de simulation de la détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. , pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.

On a trouvé que la rupture d'une barre provoque une modulation de l'enveloppe du courant statorique. Les relevés spectraux sont toujours riches en harmoniques indiquant la multitude de phénomènes ou éventuellement, de problèmes définissant l'état de la machine.

Les résultats ont prouvé ce que nous avons vu dans l'étude analytique, la richesse du spectre du courant statorique en harmoniques à la présence de défaut et même à l'état sain. De plus, on a fait une étude comparative entre deux techniques de diagnostic, la première est la technique classique MCSA et la deuxième la technique avancée MSCSA. Cette étude comparative a deux niveaux : premièrement avec l'indice partiel relatif et la deuxième avec l'indice global relatif en exploitant deux types d'harmoniques (TH) et (RBFH). une étude comparative dont le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

- le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) et harmoniques de temps (TH) donnée par l' Indice partiel relatif.
- l'Indice global relatif de la technique MSCSA est plus sensible que la technique MCSA

Cette étude est très bénéfique pour l'étude de diagnostic et nous donne une excellente analyse pour améliorer d'autres travaux de diagnostic dans cet axe de recherche. Ces résultats de simulation ou expérimentaux mettent en valeur notre étude et qui offre un ajout important dans ce domaine de diagnostic.

Conclusion Général

Conclusion Général

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés. nous avons focalisé l'étude sur les moteurs à cage pour deux raisons :

La première est parce que les moteurs asynchrones à cage sont les plu subtilisés, tandis que la deuxième réside dans le fait que d'un point de vu structure multi enroulement, les moteurs à rotors bobinés constitues un cas particulier des moteurs à cage.

Dans le premier chapitre, nous avons rappelé les principaux éléments de constitution de la machine asynchrone à cage. rappel des différents défauts qui peuvent affectés le bon fonctionnement des machines asynchrones triphasées à cage, ainsi que leurs causes et leurs signatures spectrales. Selon la littérature et la brève présentation des diverses méthodes du diagnostic, nous avons constaté que l'analyse du courant statorique est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité et son efficacité de prévoir un défaut dès lors que ses premiers signes commencent à apparaître, ce qui nous a incité à adopter cette technique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté un modèle permettant la simulation de moteur asynchrone triphasée à cage. ce modèle nous a permet de bien modéliser et simuler les défauts de cassure de barres rotoriques. en présentant les hypothèses simplificatrices sur lesquelles repose le modèle multi-enroulement par la suite nous avons Mise en équations et Calcul avec prise en compte des harmoniques d'espace. Les résultats de simulation ont confirmé les performances de notre modèle.

Dans le troisième chapitre .nous avons les résultats expérimentaux et de simulation de la détection des défauts dans les moteurs asynchrones triphasés à cage. dans lequel nous avons travaillé pour différents régimes de fonctionnement sain et défaillants.les barres casées et leurs influences sur l'enveloppe du courant statorique .les relevés spectraux sont toujours riches en harmoniques indiquant la multitude de phénomènes définissant l'état de la machine.nous avons fait une étude comparative entre deux techniques de diagnostic : la première est la technique classique MCSA et la deuxième la technique avancée MSCSA. deux types d'étude des harmoniques : les harmoniques de temps TH et les harmoniques RBFH, le but est de sélectionner les meilleurs indicateurs donnant la bonne information sur l'état de la machine.

- le MSCSA est plus sensible que MCSA par rapport aux harmoniques des défauts de barres rotoriques (RBFH) et harmoniques de temps (TH) donnée par l' Indice partiel relatif.
- l'Indice global relatif de la technique MSCSA est plus sensible que la technique MCSA

Nous avons réalisé cette étude dans le but d'aboutir à un résultat qui offre un ajout important dans ce domaine Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- [1] A. Allal, "Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines asynchrones." magister enelectrotechnique, universite ferhat abbas-setif, 2010.
- [2] M. Ammar, "Surveillance et diagnostic des défauts des machines électriques : applications aux moteurs asynchrones" Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955-Skikda, 2012.
- [3]Y. BABECHE,"Diagnostic des machines électriques par la méthode des éléments finis". Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [4] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones : modèles et outil paramétriques dédiés à la simulation et à la détection des défauts", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 1999.
- [5]B. Besma."Analyse et détection des défauts dans la machine asynchrone à base des techniques intelligentes". Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [6]L. Kerszenbaum et C. F. Landy, "The existence of large inter bar currents in the three phase squirrel cage motors with rotor-bar and en-ring faults" IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-103, n°7, pp.1854- 1862, July 1984.
- [7] Y. Laamari, "Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques" Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.
- [8] S. Merahi , and Naouel Hamdi. "Diagnostic de défauts des machines électriques." (2020).
- [9]Chelaghema, M Lamine, A. Encadreur Rezig, and Said Encadreur "Touati. Pronostic des défauts statoriques et rotoriques des machines asynchrones". Diss. Université de Jijel, 2019.
- [10]S.HAJJI;"Modélisation, observation et commande de la machine asynchrone";Cotutelle de thèse entre l'Université de Caen Basse-Normandie (France)et l'Université de Sfax(Tunisie) ;2009
- [11] A. Allal, B. Chetate, High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product. *Journal of Fundamental and, Applied Sciences*, 11(2) (2019) 994-1022.

- [12] A. ABDELKEBIR "Diagnostic d'un moteur à Induction en utilisant la transformée en ondelettes" Thèse de MASTER , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA- 20 /05/2017
- [13] L. LABIOD et F. BOUTADJINE "Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation)." (2019).
- [14] C. Hakima. "Détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes". Diss. Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [15] A. Ceban, " Méthode globale de diagnostic des machines électriques,"Thèse de doctorat, Université de Lille,2012.
- [16] T. Boileau, " Contribution à la continuité de service des actionneurs synchrones à aimants permanents.Tolérance au défaut de capteur mécanique: détection de défauts électriques," , Thèse de doctorat, Université deLorraine, 2010.
- [17] A. Chahmi, " Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic. Energie électrique,"Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2017.
- [18] M. E. K. Oumaamar., "Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques et mécaniques de la machine asynchrone avec alimentation équilibrée ou déséquilibrée.,"Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [19] R. Bousseksou., "Modélisation analytique des machines Asynchrone application au diagnostic," , Mémoire de magister, Université de Constantine, 2007.
- [20] Ghouggal, A. "Diagnostic de la machine asynchrone triphasée: modèle dédié à la détection des défauts» mémoire de magister." Université de Batna (2005).
- [21] S. Zouzou, " Détection des défauts statoriques dans la machine synchrone à aimants permanents par les techniques avancées". Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [22] N. Yassa, "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spores et des cassures de barres d'anneaux". Diss. Tizi ouzou, 2009.
- [22] A. Allal, B. Chetate, "A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads". *Front. Energy*, 10 (2) (2016)176–191.
- [24]K.Ilyes; Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle; université d'Annaba 2014

- [25] A. Allal, A. Khechekhouche, Z. Driss, Induction machines diagnosis by the time's harmonics, *International journal of energetica* 5 (2) (2020), 32-36.
- [26] A. .Abed. "Contribution à l'étude et au diagnostic de la machine asynchrone ", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2002.
- [27] S. Belhamdi, "Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques" De Comande. Diss. Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [28] A. Ghoggal, "Contribution à la modélisation de la machine asynchrone triphasée dédiée au diagnostic". Diss. Université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [29] A allal and A khachkhouché .Diagnosis of induction motor faults using the motor current normalized residual harmonic analysis method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, volume 14, p108219, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108219>
- [30] Y. Han, Y. H. Song, "Condition Monitoring Techniques for Electrical Equipment – A Literature Survey", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, January 2003,
- [31] J. R. Cameron and al., "Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors", in *Proc. IEE*, vol. 33 no.3 (1986),
- [32] J. Penman and al., "Detection and location of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, n. 4, December 1994,
- [33] S. Nandi and al., "Novel Frequency Domain Based Technique to Detect Incipient Stator Inter-Turn Faults in Induction Machines Using Stator Induced Voltage After Switch-Off," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 1, pp. 101–109, Jan./Feb. 2002.
- [34] S. Mohamed. Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones. Diss. Université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [35] A. Allal, and C. Boukhemis "A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads." *Frontiers in Energy* 10.2 (2016): 176-191.

- [36] M. BOUCHERMA, M. Y. KAIKAA ,A. KHEZZAR ," Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics" effect, Journal of Electrical Engineering , Vo l 57 (No.4), 2006, p 193-199 .
- [37] M. SAHRAOUI , A. GHOGGAL, S. GUEDIDI , et al. ",Detection of inter-turn shortcircuit in induction motors using Park–Hilbert method, International Journal of System" Assurance Engineering and Management , Vol 5 (No.3),2014,p 337-351.
- [38] T. SRIBOVORNMONKOL ,"Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations", Master's Thesis ,Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden , 2006.
- [39] J. ZAREI , J. Poshtan , "An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection", Tribol. Int., Vol 42(No.2), 2009, p 213-219.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.002>
- [40]A.KHATRAOUI, Z.MANSOUR "Diagnostic Des Machines Asynchrones Triphasées", Thèse de MASTER ACADEMIQUE , UNIVERSITE Echahid Hamma Lakhdar D'El-oued soutenu en Mai 2017.
- [41] Naji M. Al Sayari .Dynamic Analysis of Cage Rotor Induction Motor Using Harmonic Field Analysis and Coupling Inductances Method, A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences,2011
- [42]G. Didier “ Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone enprésence de défaillances ”.Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré,Nancy I, 2004.

ANNEXES

Annexe:

Nous soussignons les étudiants de ce mémoire

MESBAHI Abdelouahab

ZELLOUMA Moussa

NEMSI Mohammed Amine

que tous les résultats sont obtenus avec l'aide de l'encadreur : **Allal Abderrahim**

Pour cela, notre encadreur peut utiliser ses résultats dans n'importe quel domaine