

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed KHEIDER Biskra
Faculté de la science et de la technologie
Département : Génie Electrique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة الكهربائية
المرجع :

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de

Master 2 en : **Electrotechnique**

Option : **Machine Electrique**

Etude et modélisation des machines électriques

Présenté par :
ABDI Azeddine

Soutenu publiquement le : 30 Mai 2016

Devant le jury composé de:

ALLOUI Lotfi	Professeur	U. de Biskra	Rapporteur
Rezig Mohamed	MMA	U. de Biskra	Président
KHANE Med Lotfi	MCB	U. de Biskra	Examineur

Remerciement

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la force de m'avoir permis d'arriver à ce stade là.

Je remercie mes parents d'avoir été très proches de moi tout au long de la préparation de ce diplôme.

J'exprime vivement ma gratitude et ma profonde reconnaissance à Monsieur le **Pr ALLOUI Lotfi**, (Professeur à l'université de Biskra), mon encadreur, qui n'a épargné aucun effort, et qui n'a jamais cessé de m'apporter un soutien scientifique et moral. Ses idées pertinentes et le temps qu'il m'a accordé ont favorisé de mettre ce thème sur pied et ce mémoire a pu voir enfin le jour.

Je tiens à exprimer également mes respects et mes remerciements à Monsieur le **Pr. Mimoune S. M** (Professeur à l'Université de Biskra), et monsieur **Dr. Sahraoui M** (maîtres de conférence à l'université de Biskra), pour leurs conseils très bénéfiques et fructueux qui m'ont guidé pour bien préparer et améliorer le contenu de ce travail.

Je tiens à remercier très vivement Monsieur **Dr. KHANE Med Lotfi**, qui a honoré avec leurs remarques et leurs recommandations objectives qui seront très utiles par la suite. et aussi Monsieur **REZIG Mohamed** pour avoir accepté de présider ce jury.

Finalement, je saisis cette occasion pour témoigner ma grande reconnaissance à tous ceux qui m'aident de près ou de loin à la réalisation de cette mémoire.

ABDI. A

Dédicace

A la mémoire de mon père

A ma mère

A mes frères et sœurs

A ma femme

A mes enfants

A mes amis

ABDI. A

Sommaire

Introduction générale	
Chapitre I : état de l'art	
I-1 Introduction	10
I-2 Étude bibliographique	11
I-3 Eléments de constitution de la machine asynchrone	12
I-3-1 le stator	12
I-3-2 le rotor	14
I-3-3 Les organes mécaniques	15
I-4 Principe de fonctionnement:	17
I-5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone	19
I-6 Les défaillances des machines asynchrones	19
I-6-1 Défaillances mécaniques	20
I-6-2 Défaillances des roulements	20
I-6-3 Défaillances du flasque	20
I-6-4 Défaillances de l'arbre	21
I-7 Défaillances électriques	22
I-7-1 Défaillances au stator	22
I-7-1-1 . Défauts d'isolant dans un enroulement	23
I-7-1-2. Court-circuit entre spires	23
I-7-1-3. Court-circuit entre phases	23
I-7-1-4. Court-circuit phase/bâti	23
I-8 Au niveau du rotor	23
I-8-1 Ruptures de barres	24
I-8-2 . Ruptures d'anneaux	24
I-8-3 . Excentricité statique et dynamique	24
I-9 Méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter les défauts électriques et/ou mécaniques	24
I-9 -1 Analyse temps-fréquence et temps-échelle	24
I-9 -2 Analyse temps-fréquence	25
I-9 -3 Analyse temps-échelle	26
I-9 -4 Analyse cepstrale	27
I-9 -5 Analyse spectrale à haute résolution	27
I-10 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique	27
I-10-1 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes	28
I-10-2 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park	29
I-10-3 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables	30

I-10-4	Analyse fréquentielle des courants statoriques et du flux de dispersion	31
I-10-5	Analyse fréquentielle du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique	31
I-10-6	Analyse fréquentielle de la tension de neutre	31
I-10-7	Analyse fréquentielle de la puissance instantanée	32
I-11	Technique additionnelle	33
I-12	Conclusion	35
Chapitre II : modélisation de la MAS		
II-1	Introduction	37
II.2.	Méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques	37
II.2.1	Première Méthode	37
II.2.2	Deuxième Méthode	38
II.2.3.	Troisième Méthode	38
II.2.4	Méthode Classique « calcul de LIWSCHITZ »	38
II.2.5.	Procédés actuelles adoptées	40
II.3	Méthodes de modélisation	40
II.3.1	Méthode des éléments finis	41
II.3.2	Méthode des réseaux de perméance	41
II.3.3	Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés	41
II.3	Modèle de la machine en absence de défaillance	42
II.3.1	Hypothèses de départ	43
II.4	Paramètres représentatifs des défauts	44
II-5	La transformation de Fourier rapide	47
II-6	Conclusion	48
Chapitre III : modélisation de la MAS		
III-1	Introduction	50
III-2	Historique	50
III-3	Description du model de moteur asynchrone a simulé (géométrie et circuit)	51
III-3-1	Géométrie du stator et le rotor	52
III-3-2	Les dents statorique et rotorique	52
III-3-3	Type de bobinage	53
III-4	La définition du domaine de calcul de la Champ électromagnétique	54
III-5	Circuit d'alimentation	57
III-6	La machine simulée	58
III.4	simulation de la machine asynchrone en magnetotransitoire (vitesse non imposée)	59
III-4-1	1er cas la machine à vide	59
III-5	Conclusion	65
Chapitre IV : Modélisation et simulation de la MAS triphasée à cage avec défaut de cassure de barres		
IV-1	Introduction	67
IV-2	Quand une barre rotorique est cassée, que se passe t-il ?	67
IV-4	Conclusion	70

Liste des symboles et abréviations

P	: Nombre de pair de pôles.
R	: Le nombre des barres rotoriques.
G	: Glissement.
f_s	: Fréquence d'alimentation.
f_r	: Fréquence rotorique.
f_{RSHs}	: Fréquences d'harmoniques d'encoches rotoriques.
ρ	: Résistivité du matériau.
μ	: Perméabilité magnétique du matériau.
A	: Potentiel vecteur magnétique.
J_s	: Densité de courant dans les encoches statoriques.
λ	: Rang des harmoniques du temps.
n_d	: Ordre de l'excentricité dynamique.
Y	: Circuit connecté en étoile-étoile avec neutre non-relié.
YN	: Circuit connecté en étoile-étoile avec neutre relié.
Δ	: Circuit connecté en étoile-triangle.
V_{des}	: Tensions déséquilibrées.
Ω_s	: Vitesse synchrone.
Ω_r	: Vitesse rotorique.
Ω	: Vitesse de glissement.
$\bar{\Omega}$: Valeur moyenne de Ω_r
f_{mm}	: Force magnétomotrice.

Vu sa grande solidité et son faible coût, le moteur asynchrone à cage reste l'élément réussite de la plupart des équipements industriels. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,.... Malgré toutes ces aptitudes, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent restreindre la durée de vie de celui-ci, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes provoquent des pertes économiques considérables, il est donc primordial de mettre en œuvre des systèmes de surveillance afin d'éviter les arrêts inattendus [5]

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée au remarquable développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements [1].

Cependant, nul système n'est à l'abri d'une défaillance, par conséquent, ceci exige la mise en œuvre de systèmes de prévoyance et de détection de défauts de manière précoce. Aussi depuis quelques années, et grâce à l'apport considérable de l'outil informatique et du matériel numérique, il est devenu possible de créer des systèmes de supervision et de diagnostic. Leur rôle est de signaler la présence des défauts dans le processus.

Actuellement, la plupart des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, quoi que robustes, ces machines subissent des perturbations auxquelles elles sont sensibles. Les principaux défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator (dus aux vieillissements des isolants), les dégradations des anneaux au rotor et tous les problèmes de barres (ruptures ou imperfections). Le premier type de défaut peut être détecté par l'observation des paramètres électriques du stator (inductances et résistances). Pour les défauts rotoriques, le modèle est plus complexe dans le sens que le défaut doit être ramené vers ou signalé par une grandeur mesurable extérieure au rotor lui-même. D'où l'importance que revêt un modèle dédié à la détection de défauts.

Grâce à sa grande flexibilité, la simulation est l'outil privilégié pour évaluer les performances et le comportement des systèmes sous des conditions extrêmes ou en mode de défaillance. Il faut noter que la simulation ne peut exister sans modélisation, en effet, la

simulation n'est autre que la mise en application d'un modèle bien déterminé. En outre, l'un des objectifs les plus importants, dans le cadre du diagnostic, concerne la mise au point de modèles de simulation les plus fiables possibles, représentant le fonctionnement défaillant de la machine. L'étape de modélisation s'avère donc indispensable pour la caractérisation et la maîtrise des phénomènes qui peuvent y apparaître.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, que ce soit dans le but de dimensionnement, de la commande ou du diagnostic. La diversité des objectifs a fait apparaître plusieurs techniques de modélisation et d'outils de simulation, dont chaque type de modélisation est plus ou moins adapté à un domaine plus que les autres [2].

Dans cette thèse on s'intéresse la modélisation de la machine asynchrone, pour la simulation de la rupture de barres à l'aide d'un outil informatique. Pour cela, le mémoire a été organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présenterons les éléments constitues la machine asynchrone ; le stator, le rotor et aussi les organes mécaniques, après on a essayé d'expliquer en bref le mode de fonctionnement de la machine asynchrone. Par suite on présente les statistiques des défaillances de la machine asynchrone à cage d'écureuil, finalement on a expliqué quelques Méthodes de diagnostic actuellement utilisées.

Le deuxième chapitre, on a présenté les méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques et après on détermine le principe de la transformation de Fourier rapide qui est un algorithme est couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes.

Dans le troisième chapitre, nous montrerons dans un premier temps les résultats de la simulation du moteur asynchrone, dans les différentes conditions de fonctionnement, sans défauts. Dans un second temps, à fin d'adopter une grandeur mesurable comme outil de détection des défauts rotoriques une analyse spectrale du courant statoriques sera présentée.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons l'analyse spectral du courant statoriques (à l'aide de la transformée de Fourier rapide) afin de mettre en évidence la présence des harmoniques caractérisant le défaut de barres. Nous montrerons par la suite l'influence du nombre de barres cassées sur ces harmoniques.

I-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons le système étudié qui se limite, dans notre cas, à la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir rappelé les éléments de constitution de cette machine, nous effectuons une analyse des différents défauts pouvant survenir sur chacun d'eux. Nous présentons ensuite divers outils issus des techniques de traitement du signal pouvant être utilisés pour la détection d'un défaut électrique et/ou mécanique. Pour finir, nous discutons des méthodes de diagnostic actuellement appliquées à la machine asynchrone en précisant leurs avantages et leurs inconvénients.

I-2 Étude bibliographique

La machine asynchrone a vu son premier jour en 1887 par Nicolas Tesla, à l'année suivante Ferraris Galileo développa la théorie des machines tournantes, l'année d'après a connu la construction du premier moteur à cage d'écureuil par Michail Ossipowitsch et Doliwo-Dobrowolski. En 1912, Paul Boucherot découvrit le rotor à encoches profondes et le stator à double cages afin de résoudre le problème d'appel de courant et celui du couple de démarrage. À cette époque, la génératrice asynchrone ou généralement la machine asynchrone était rarement utilisée, car la faiblesse de cette dernière est son auto-excitation, l'amorçage de la génératrice nécessite de l'énergie réactive. Deux méthodes seulement peuvent fournir cette énergie, soit la technique passive qui se base sur un banc de capacités, ou la technique active qui nécessite la présence d'un dispositif (circuit électronique de puissance) pour contrôler la génératrice.

Pour la première méthode, elle a été développée par plusieurs chercheurs; en 1935 Basset avait travaillé sur les capacités d'excitation des génératrices asynchrone, quatre ans après Wagner a continué sur le même travail, mais malgré ça, la génératrice asynchrone restait un produit non commercialisé jusqu'aux années cinquante.

La méthode de contrôle active a vu son jour grâce à l'avènement de l'électronique de puissance. Cette méthode permet de régulariser la tension et ainsi que la fréquence, après cet événement la machine asynchrone a envahi plusieurs domaines (transport, industrie...). De nombreuses recherches ont été orientées sur la régulation de la machine [1].

I-3 Eléments de constitution de la machine asynchrone

On se propose, dans cette partie, de donner quelques précisions sur les éléments de constitution des machines asynchrones. Cette description va nous permettre 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: [2]

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.

I-3-1 Stator,

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont, pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont, pour les machines de puissance plus importantes, 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.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la figure I-1 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge. est reliée l'alimentation électrique. Nous pouvons visualiser la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.

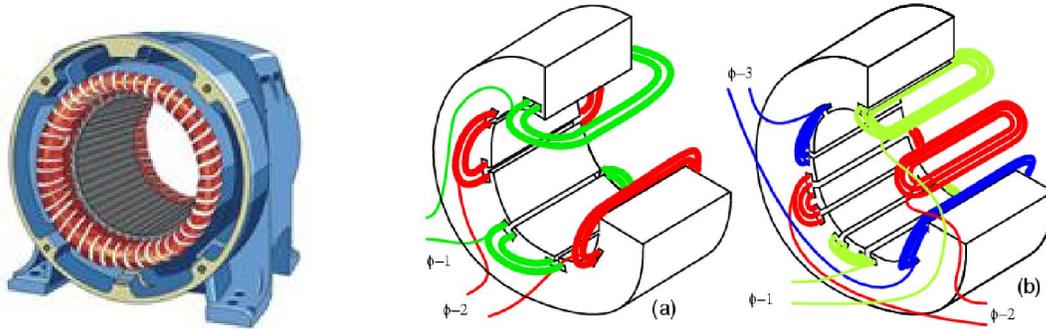


Figure I-1: stator de la MAS

I-3-2 Rotor

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors de machines asynchrones peuvent être de deux types : bobinés ou à cage d'écurieil.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine.

En ce qui concerne les rotors à cage d'écurieil, les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. Il existe différentes structures de rotor à cage qui dépend principalement de la taille du moteur et de l'application qu'il en sera fait.



Figure I-2: Rotor de la MAS

Nous pouvons visualiser l'arbre sur lequel les tôles sont empilées, les deux anneaux de court-circuit ainsi que les barres d'aluminium formant la cage d'écureuil. Très souvent, ces barres sont uniformément inclinées pour limiter les harmoniques et ainsi diminuer très fortement le bruit lors de l'accélération de la machine asynchrone. L'isolation des barres avec les tôles magnétiques n'est en général pas nécessaire du fait de la faible tension induite aux bornes de chacune d'entre elles. De plus, la résistivité de l'alliage utilisé pour la construction de cette cage est suffisamment faible pour que les courants ne circulent pas à travers les tôles magnétiques, sauf lorsque la cage rotorique présente une rupture de barre [4]. Le rotor de la machine asynchrone est aussi pourvu d'ailettes de ventilation pour permettre un refroidissement de la cage le plus efficace possible comme le montre la figure I-3

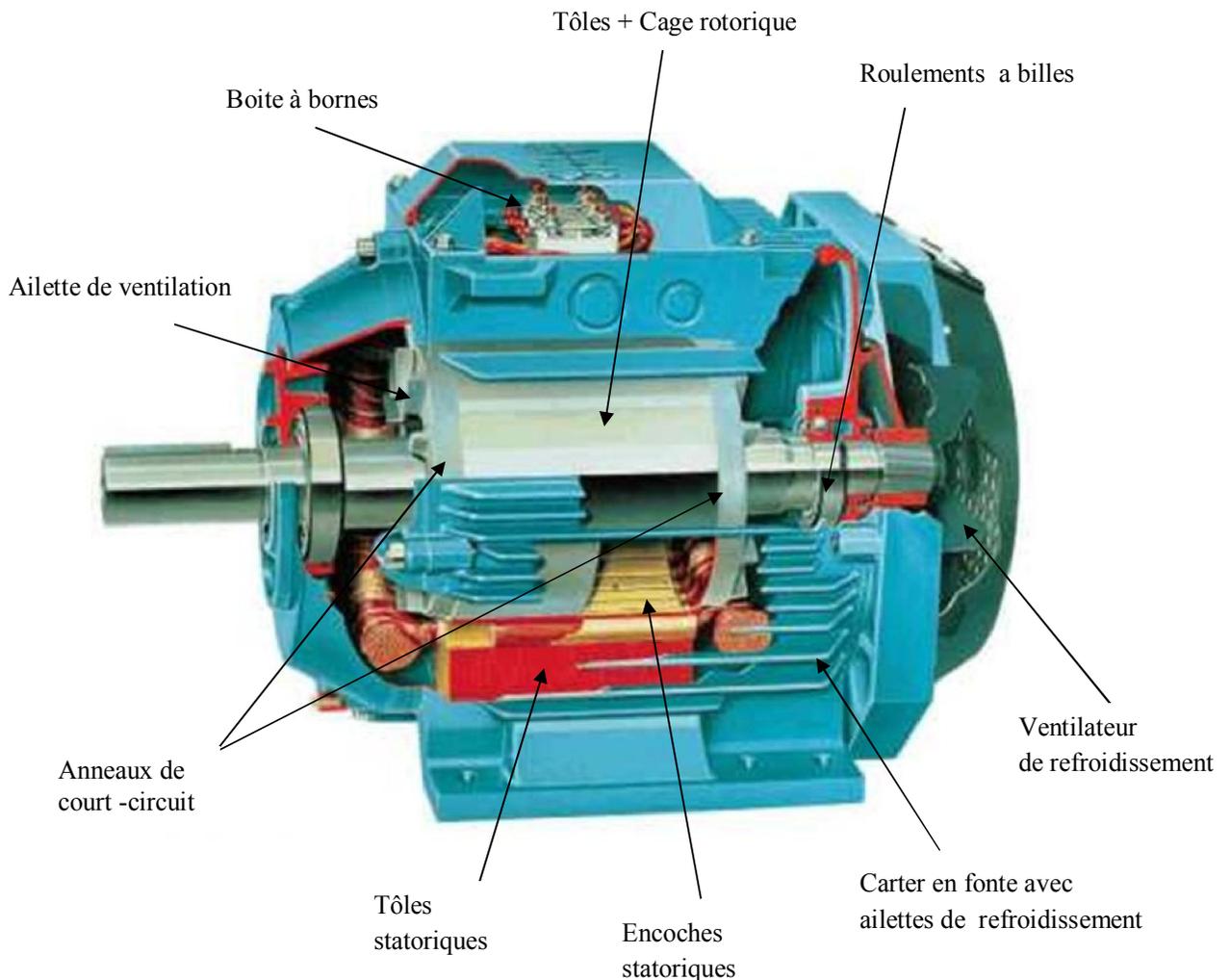


Figure I-3: Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil

I-3-3 Les 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). Il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

Afin d'assurer la variation de vitesse des moteurs électriques mais aussi la conversion de l'énergie, de nombreuses machines se voient associer un convertisseur. Ainsi, de nos jours, on trouve dans un grand nombre de procédés industriels, des associations entre des convertisseurs statiques et des machines électriques (pompage, levage,...). Cela permet de fournir aux moteurs des tensions et des courants de fréquence variable servant à commander la machine en couple ou en vitesse [3]

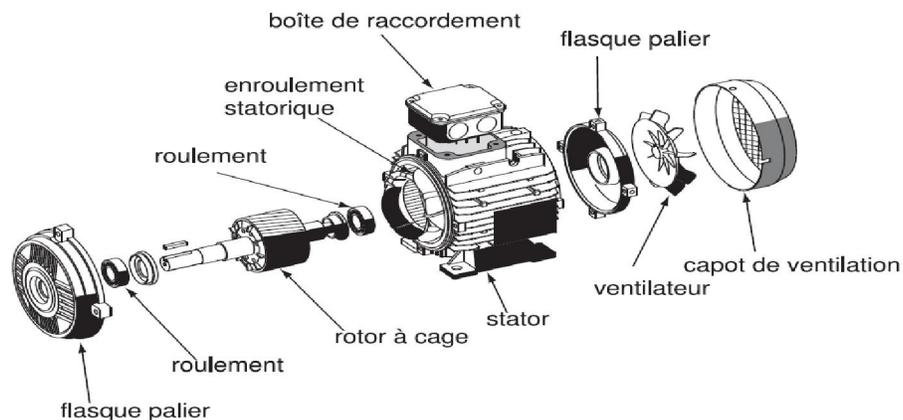


Figure I -4: les composants d'un moteur asynchrone

I-4 Principe de fonctionnement:

Pour appréhender le fonctionnement de la machine asynchrone, on considère l'expérience du flux coupé en fonctionnement générateur que l'on modifie de la façon suivante, cette fois les conducteurs de longueur l sont fixés entre eux et court-circuités par des barres conductrices extrêmes formant ainsi un rail .

En outre, le champ magnétique se déplace rapidement au dessus de cet ensemble (figure 1-5).

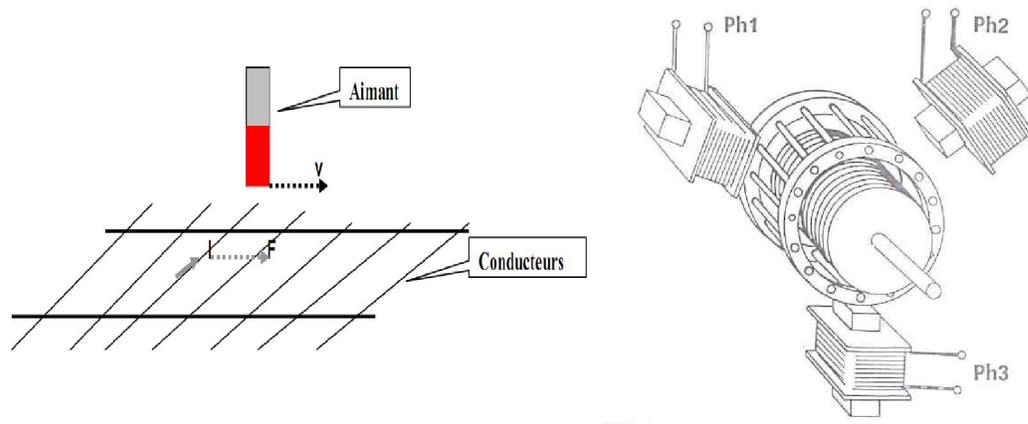


Figure I-5: Déplacement du champ magnétique

D'après la loi du Faraday, une tension est induite dans chaque conducteur coupé par le champ magnétique.

$$e = -Blv \quad (2.16)$$

Une première conséquence apparaît. Comme chaque conducteur est court-circuité, un courant i se met à circuler dans le conducteur qui est momentanément en dessous du champ magnétique (ou de l'aimant), comme ce courant traverse le champ magnétique, d'après la loi de Laplace, une force mécanique est appliquée sur ce conducteur. Cette force entraîne le conducteur dans le sens de déplacement du champ magnétique. Si ces conducteurs sont mobiles, ces derniers accélèrent et à mesure qu'ils atteignent de la vitesse, la vitesse à laquelle le champ magnétique est coupé par ces conducteurs ralentit et la tension induite diminue, de même que le courant i . Cet effet de la loi de Lenz a pour conséquence de diminuer la force de Laplace. Ainsi si les conducteurs se déplaçaient à la même vitesse que le champ magnétique,

la tension induite, le courant i et la force s'annuleraient. La vitesse du rotor est donc légèrement inférieure à la vitesse du champ magnétique.

Dans une machine asynchrone à cage, le rail dans l'exemple présenté à la figure I-4 en dessus est recourbé pour former la cage d'écureuil et le déplacement du champ magnétique devient un champ tournant créé par trois bobines/enroulements au stator. Les bobinages au stator sont alimentés par un système triphasé de courant de même pulsation et engendrent des flux statoriques. De part le théorème de Ferraris [9], un champ magnétique tournant est créé dans l'entrefer (et se reboucle dans la carcasse du rotor et du stator). Sa vitesse encore appelée la vitesse du synchronisme est égale à la pulsation du système triphasé équilibré de courants qui parcourent ces enroulements, pour le stator de la machine asynchrone étudiée, le champ magnétique généré par le stator tourne de un tour par période des grandeurs électriques; dans le cas où le stator serait composé d'un nombre de paire de pôle par phase quelconque (p), la vitesse de synchronisme serait donc $\Omega_s = \omega_s / p$.

Comme expliqué précédemment, la vitesse de l'arbre de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme en régime établi, $\Omega_r \neq \Omega_s$ les conducteurs du rotor sont alors soumis à un champ magnétique variable qui tourne par rapport à eux-mêmes à la vitesse relative $\Omega_r = \Omega_s - \Omega$.

Il en résulte l'induction de f.é.m. dans ces conducteurs de pulsation $\omega_r = p \Omega_r$

Les enroulements au stator étant en circuit fermé sur eux-mêmes pour les machines à cage, les f.é.m. induites vont donner naissance dans le circuit rotorique fermé à des courants rotoriques de même pulsation. Ces courants créent à leur tour un champ magnétique rotorique qui tourne par rapport au rotor à la vitesse $\Omega_r = \omega_r / p$

Étant donné que le rotor tourne à la vitesse Ω_r , la vitesse du champ magnétique par rapport au stator est $\Omega + \Omega_r = \Omega_s$

Le champ magnétique généré par les enroulements du rotor et le champ magnétique généré par les enroulements du stator tournent donc à la même vitesse du synchronisme et s'associent pour créer « un champ magnétique résultant » dans l'entrefer. Ainsi, les phénomènes physiques engendrés par le circuit statorique, y compris ceux induits par le circuit rotorique vont générer des grandeurs électriques au niveau du circuit statorique à la pulsation ω_s . Les grandeurs électriques propres au circuit rotorique seront toutes à la pulsation ω_r .

I-5 Etude statistique des défaillances de la machine asynchrone

Les défaillances peuvent être d'origines diverses, électriques, mécaniques ou bien encore magnétiques. Leurs causes sont multiples et peuvent se classer en trois groupes.

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

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

✓ les vices de fabrication et les erreurs humaines : défauts de fabrication, composants défectueux, protections inadaptées, mauvais dimensionnement de la machine, etc.

Une étude statistique, effectuée en 1988 par une compagnie d'assurance allemande de systèmes industriels sur les pannes des machines asynchrones de moyenne puissance (de 50 kW à 200kW) a donné les résultats suivants (figure I-5)[3] :

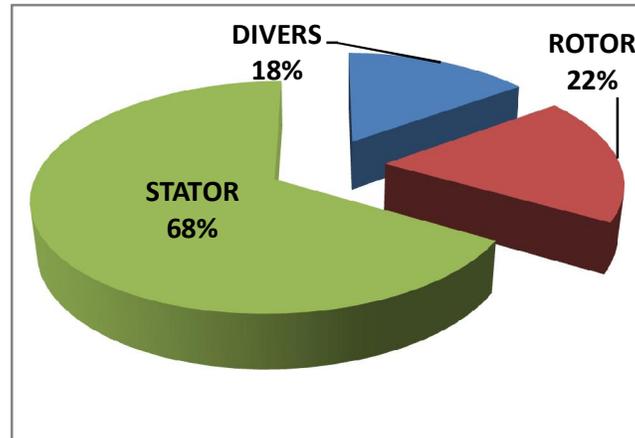


Figure I-6 : Proportion des défauts

figure 1.6: La répartition des pannes dans les différentes parties du moteur

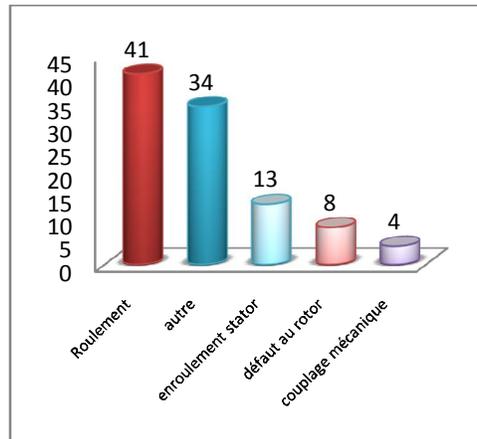


Figure 1.7. Répartition des pannes sur les machines de faibles et moyennes puissances

Une autre étude statistique faite sur des machines de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) donne des résultats qui sont présentés sur la figure 1.8.

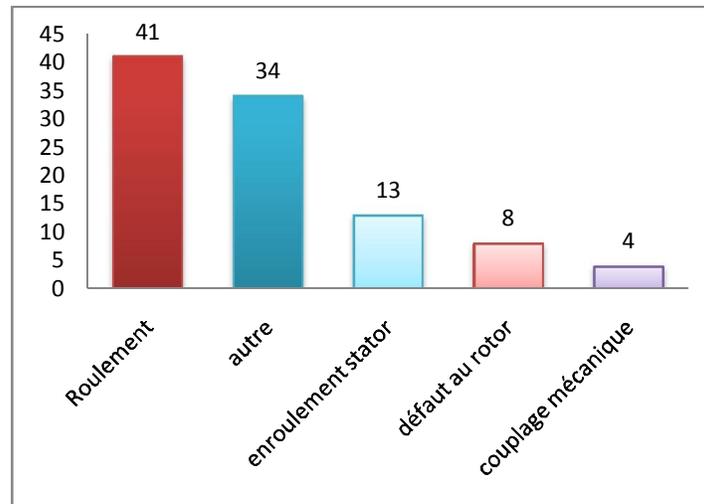


Figure 1.8. Répartition des pannes sur les machines de fortes puissances

Les contraintes mécaniques sont plus grandes pour ces types de machines ce qui explique le taux élevé des pannes dues aux roulements. Celles-ci exigent une maintenance mécanique accrue.

I-6 Les défaillances des machines asynchrones

Bien que la machine asynchrone soit réputée robuste, elle peut parfois présenter différents types de défauts. Ces défauts se déclarent dans les différentes parties de la machine en commençant par la connexion des phases statoriques et en finissant par l'accouplement mécanique du rotor à la charge. Ainsi, dans le but d'une présentation synthétique, nous les avons classés dans deux familles principales : les défauts mécaniques et les défauts électriques. Ces défauts sont donc rappelés brièvement dans l'organigramme de la figure I-6

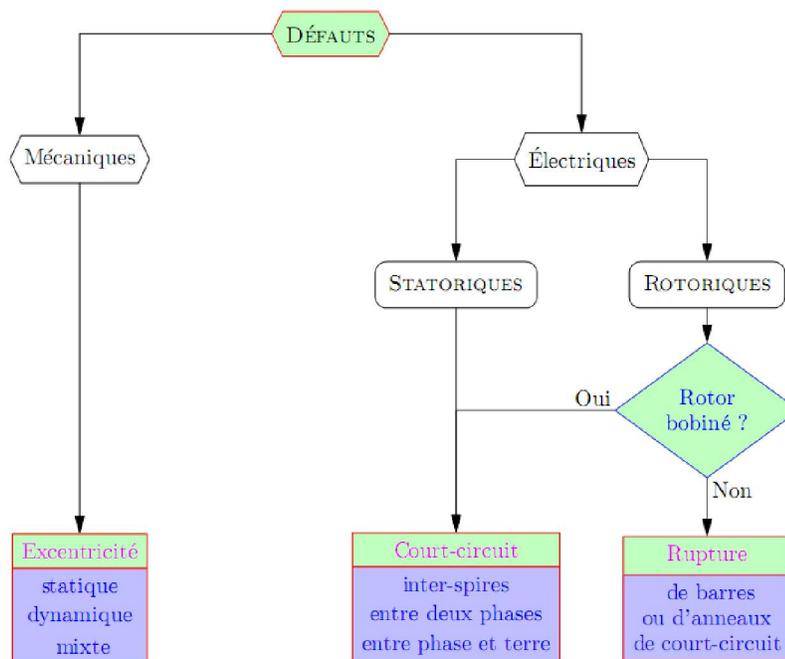


Figure I-9 : Organigramme de défauts statoriques et rotoriques[5]

I-6-1 Défaillances mécaniques

Les défaillances d'ordre mécaniques sont, en général, les plus rencontrées parmi tous les défauts que compte la machine asynchrone. Ces défauts peuvent apparaître au niveau des roulements à billes, des flasques ou encore de l'arbre moteur. Nous énumérons, dans la suite du document, certains de ces défauts sans pour autant en donner les détails. Nous pouvons trouver dans la littérature des ouvrages très complets qui traitent de ces divers problèmes.

I-6-2 Défaillances des roulements

Les roulements à billes jouent un rôle très important dans le fonctionnement de tout type de machines électriques. Les défauts de roulements peuvent être causés par un mauvais choix de matériau à l'étape de fabrication. Les problèmes de rotation au sein de la culasse du roulement, causés par un roulement abîmé, écaillé ou usuré, peuvent créer des perturbations au sein de la machine. Nous savons que des courants électriques circulent au niveau des roulements d'une machine asynchrone ce qui, pour des vitesses importantes, peut provoquer la détérioration de ces derniers. La graisse, qui permet la lubrification et la bonne rotation des roulements peut, dans certaines applications, se rigidifier et causer une résistance à la rotation. L'analyse vibratoire de la machine ou l'analyse harmonique des courants statoriques permet de détecter ce type de défaillances.

I-6-3 Défaillances du flasque

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

I-6-4 Défaillances de l'arbre

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

Les milieux corrosifs peuvent aussi affaiblir la robustesse de l'arbre de la machine. Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, une analyse par ultrason, une analyse fréquentielle des courants absorbés ou simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine permet de détecter ce type de défaillance.[2]

I-7 Défaillances électriques

I-7-1 Défaillances au stator

Pour le stator, les défaillances sont principalement dues à un problème :

- thermique (surcharge,...)
- électrique (diélectrique,...)
- mécanique (bobinage,...)
- environnemental (agression,...)

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

I-7-1-1 . Défauts d'isolant dans un enroulement

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

- dégradation de l'isolant à la fabrication.
- tension de l'enroulement supérieure à la limite du matériau d'isolation.
- vibrations mécaniques.
- courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une
- surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation.
- vieillissement naturel des isolants. Tous les matériaux isolants ont une durée de vie limitée. Même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- fonctionnement dans un environnement sévère.

I-7-1-2. Court-circuit entre spires

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

Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut.

I-7-1-3. Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phases, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et/ou à la disjonction par les protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases engendre un déséquilibre sans provoquer la fusion des conducteurs.

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases.

I-7-1-4. Court-circuit phase/bâti

Le bâti a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit.[3]

I-8 Au niveau du rotor

Un rotor bobine peut être touché par les mêmes défauts que le stator. Pour un rotor à cage les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit Bonnett et Soukup (1992). Ces ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple,

- thermique (surcharge,...)
- électromagnétique (force en $B^2(t)$,...)
- résiduel (déformation,...)
- dynamique (arbre de transmission,...)
- mécanique (roulement,...)
- environnemental (agression,...)

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

I-8-1 Ruptures de barres

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

Ainsi, 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.

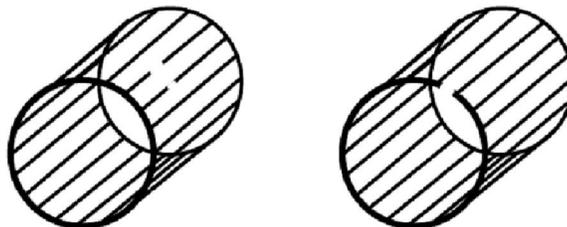


Figure 1.10. Défaut de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

I-8-2 . Ruptures d'anneaux

La rupture de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter [Yah 95], ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité,...) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure.

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

I-8-3 . Excentricité statique et dynamique

Parfois, la machine électrique peut être soumise à un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor, figure I.8).

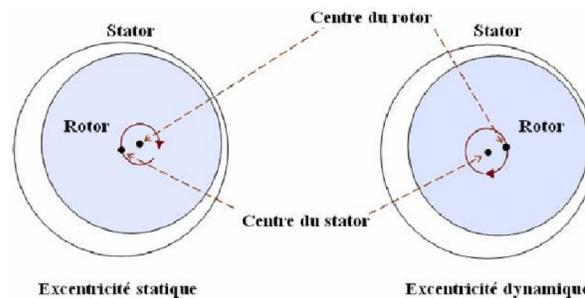


Figure I.11 Défaut de l'excentricité du rotor

I-9 Méthodes de diagnostic actuellement utilisées pour détecter les défauts électriques et/ou mécaniques

I-9 -1 Analyse temps-fréquence et temps-échelle

La non-stationnarité des signaux est une propriété très courante mais difficile à maîtriser. Si nous prenons le cas d'une machine asynchrone, certaines utilisations obligent cette dernière à

fonctionner sous des couples de charges variant très souvent dans le temps. C'est pour cette raison que des techniques de traitements temps-fréquence et temps-échelle ont vu le jour.

I-9 -2 Analyse temps-fréquence

Le courant du moteur asynchrone peut être assimilé à un signal non-stationnaire dans certaines applications (variation aléatoire du couple de charge modifiant la valeur efficace du courant absorbé). De plus, nous savons que les techniques qui utilisent la transformée de Fourier ne sont pas suffisantes pour représenter ce type de signal. Durant ces dernières années, l'avancement des méthodes statistiques de surveillance de signaux a fourni des outils efficaces pour traiter les signaux non-stationnaires. En particulier, les transformations temps-fréquence donnent un cadre mathématique optimal pour l'analyse des signaux non-stationnaires. Par exemple, la transformation de Wigner-Ville permet d'obtenir une représentation temps-fréquence permettant d'effectuer un diagnostic relativement précis de l'état du système analysé. Cette transformation est une fonction réelle qui dénie une distribution d'énergie dans le plan temps-fréquence. Le temps de calcul d'une telle représentation peut être prohibitif et l'interprétation de l'image résultante est souvent difficile, ce qui rend la détection de défaut complexe. C'est pour cette raison qu'en 1999, une méthode d'analyse temps-fréquence adaptative pour détecter les barres rotoriques cassées et les défauts de roulements a été proposée. L'idée clé dans cette méthode est de transformer le courant du moteur en une représentation temps-fréquence pour capturer la variation dans le temps des composantes spectrales comme nous le montre la figure I.8. Ensuite, une analyse statistique du spectre fréquentiel est effectuée pour distinguer les conditions de défaut par rapport aux conditions de fonctionnement normales du moteur.

Puisque chaque moteur a une géométrie distincte, une approche particulière est alors utilisée. Dans cette approche, l'algorithme est programmé pour identifier le fonctionnement normal du moteur avant la détection réelle du défaut [2].

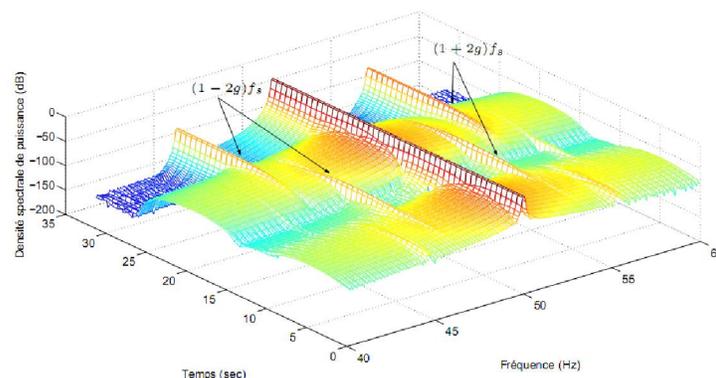


Figure. I.12 : Représentation temps-fréquence du courant statorique lors d'une variation du couple de charge (Résultats de simulation avec une barre cassée) [4]

I-9 -3 Analyse temps-échelle

Ce mode d'analyse est utilisé pour détecter des phénomènes qui se déroulent sur des échelles de fréquences différentes rencontrées dans un signal. L'idée fondamentale est de décomposer le signal à l'aide de fonctions analysantes particulières construites à partir d'une ondelette mère oscillante et à moyenne nulle. A partir de l'ondelette mère, il est possible de créer des ondelettes analysantes centrées autour d'une valeur et à échelle variable limitée.

Une technique de fenêtrage avec une région de taille variable est utilisée pour améliorer l'analyse du signal, ce signal pouvant être par exemple le courant statorique du moteur asynchrone. L'analyse par ondelettes permet l'utilisation d'intervalles de temps longs, pour avoir une information basse fréquence la plus précise possible, et d'intervalles de temps plus courts, pour avoir une information riche en hautes fréquences. La capacité d'exécuter l'analyse locale est un des dispositifs les plus intéressants de la transformation en ondelettes. L'utilisation des ondelettes pour la surveillance des défauts et le diagnostic des moteurs asynchrones est un avantage car cette technique permet d'améliorer l'analyse du courant statorique pendant les phases transitoires. Les ondelettes peuvent être utilisées pour une analyse localisée dans le domaine temps-fréquence ou temps-échelle. C'est par conséquent un outil adéquat pour la surveillance et le diagnostic de défaut des machines électriques lorsqu'il est indispensable de les utiliser à vitesse variable.

I-9 -4 Analyse cepstrale

Le mot "cepstre" a été initialement proposé par Bogert en 1963. Le cepstre est un anagramme du mot spectre. La raison de ce choix est que nous obtenons le cepstre en effectuant une analyse spectrale supplémentaire sur le spectre fréquentiel du signal observé. En d'autres mots, le cepstre est défini comme étant la puissance spectrale du logarithme du spectre de la puissance. L'intérêt du cepstre est de pouvoir détecter une périodicité dans le spectre de fréquence d'un signal et de la transformer en un pic unique sur l'échelle des fréquences. Pour être capable de distinguer une périodicité dans un spectre, il est nécessaire qu'un nombre suffisant de périodicités suffisamment espacées soit présent dans le spectre. Le cepstre est plus particulièrement utilisé dans les analyses vibratoires des machines tournantes. Les principales applications concernent la détection des défauts dans les roulements, les turbines ou encore les engrenages.

I-9 -5 Analyse spectrale à haute résolution

Les méthodes, dites à haute résolution (HR) fréquentielle, restent en pratique largement sous employées par rapport aux méthodes plus classiques qui reposent, comme nous l'avons vu précédemment, sur le calcul de la transformée de Fourier. Les principaux obstacles à l'utilisation plus large des méthodes HR sont essentiellement liés au choix des paramètres libres (en particulier l'ordre du modèle) et à la dégradation des performances de ce type de méthodes en présence de signaux complexes (grand nombre de composantes, très proches et d'amplitudes très différentes). Ce type d'analyse est utilisé lorsque le nombre d'échantillons du signal est relativement faible (nombre de points compris entre quelques dizaines et quelques centaines). En effet, pour un nombre de points fixé, les méthodes hautes résolutions permettent d'obtenir une meilleure résolution fréquentielle par rapport à une analyse par transformée de Fourier classique. Notons aussi que les méthodes à haute résolution requièrent des hypothèses sur la nature du bruit et sur le modèle du signal.

I-10 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique

Cette méthode de diagnostic utilise les paramètres structuraux d'un modèle de connaissance et extrait par la suite les paramètres du système à partir des lois de connaissance pour détecter et localiser les défaillances. Le point essentiel dans l'efficacité de cette méthode est le choix du modèle de connaissance. En eet, le type de défaut que l'on voudra détecter sera fonction du modèle utilisé.

Les premiers travaux relatant de l'estimation de paramètres ont débuté avec des modèles relativement simples utilisés depuis plusieurs années pour la commande des machines électriques. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certain cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance. L'étape suivante est donc nécessairement le passage à un modèle de connaissance plus n de la machine, tout en gardant la possibilité d'identifier les paramètres souhaités. Ces modèles peuvent être des modèles triphasés, qui s'affranchissent de l'hypothèse d'une machine magnétiquement équilibrée, ou encore des modèles à n phases, capables de refléter le fonctionnement de la machine sur une large bande de fréquences [2].

I-10-1 Diagnostic des défauts par reconnaissance des formes

Les méthodes de diagnostic qui utilisent la reconnaissance des formes sont peu nombreuses à ce jour. Un vecteur de paramètres, appelé vecteur de forme, est extrait à partir de plusieurs

mesures. Les règles de décisions adoptées permettent de classer les observations, décrites par le vecteur de forme, par rapport aux différents modes de fonctionnement connus avec et sans défaut.

Pour classer ces observations, il faut obligatoirement être en mesure de fournir les données pour tel ou tel mode de fonctionnement (fonctionnement avec un rotor sain à 0% de charge ou alors fonctionnement avec une barre cassée à 100% de charge par exemple). Pour cela, il faut disposer d'une base de données, ce qui permettra ensuite de construire la classe correspondante au défaut créé (possible pour les machines de petites et moyennes puissances). Une autre voie consisterait à calculer les paramètres du vecteur de forme en effectuant des simulations numériques de la machine étudiée (indispensable pour les moteurs de fortes puissances). Dans la dernière configuration, il faut un modèle comportemental de la machine relativement précis pour obtenir des paramètres les plus proches possibles de la réalité. Le choix de la classe à laquelle appartient le vecteur de forme mesuré s'effectue par exemple grâce à des algorithmes de type k-PPV (k plus prochesvoisins) ou par une approche utilisant les frontières de séparation.

I-10-2 Diagnostic des défauts par analyse du vecteur de Park

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des moteurs asynchrones triphasés. Une des plus connues et des plus appropriées repose sur le calcul des courants dits de Park. En fonction des courants de phase $i_{sa}(t)$, $i_{sb}(t)$ et $i_{sc}(t)$, les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes :

$$\begin{aligned} i_d(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{6}} i_{sc}(t) \\ i_q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sb}(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} i_{sc}(t) \end{aligned}$$

Cette méthode de détection donne des résultats satisfaisants lorsque la machine fonctionne à son couple nominal. Dans le cas d'un fonctionnement à vide, les courbes obtenues ne permettent pas de diagnostiquer un défaut rotorique car l'épaississement créé par la rupture d'une ou plusieurs barres ne modifie quasiment pas l'épaisseur du cercle de base. En 1998, une nouvelle implantation de l'approche par vecteur de Park a été proposée. En présence d'une barre cassée, le courant absorbé par le moteur asynchrone contient des composantes latérales de part et d'autre de sa composante fondamentale dont les fréquences sont données par la relation $(1 \pm 2k) f_s$ (dans cette relation, k représente le glissement de la machine et f_s la fréquence fondamentale des courants statoriques). Ces composantes seront, par conséquent,

aussi présentes dans les courants de Park $i_d(t)$ et $i_q(t)$ (équations I.18 et I.19). Dans ces conditions, il est très simple de montrer que le spectre du module des courants de Park

$(\sqrt{i_d(t)^2 + i_q(t)^2})$ contient une composante continue générée par la composante fondamentale du courant statorique plus des composantes de fréquence $2kf_s$. De cette façon, le spectre des courants de Park, en éliminant préalablement la composante continue, ne contiendra que les composantes spécifiques au défaut de la machine. Il sera alors plus facile de détecter ces composantes et de diagnostiquer la présence d'un défaut rotorique. La figure I.9(a) montre qu'en absence de défaut, le spectre du module du vecteur de Park est caractérisé par l'absence de composantes spectrales significatives. En revanche, l'analyse du spectre fréquentiel de ce vecteur lorsque la cage d'écuriel est défaillante (figure I.9(b)) montre la présence des composantes spécifiques au défaut rotorique aux fréquences $2kf_s$.

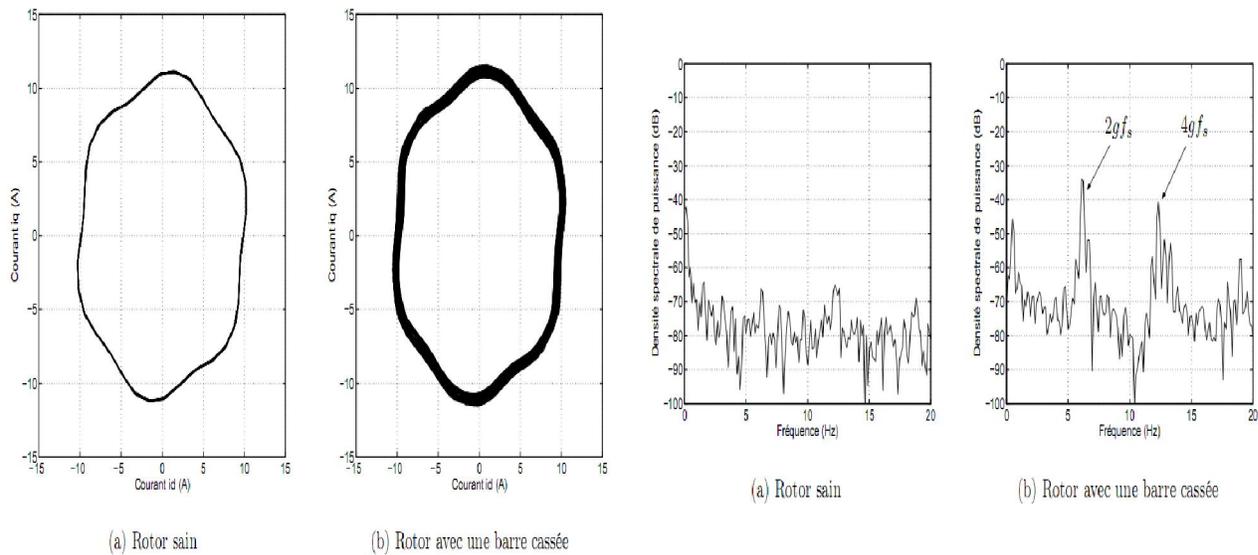


Fig. I.13 Vecteur de Park des courants statoriques pour 100% de charge avec une alimentation non sinusoïdale (Résultats expérimentaux)

Fig. I.14 : Spectre fréquentiel du module du vecteur de Park des courants statoriques pour 100% de charge (Résultats expérimentaux)

I-10-3 Diagnostic des défauts par le suivi des grandeurs mesurables

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est le plus souvent utilisée pour le diagnostic de défaut rotorique. Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être :

- les courants absorbés ;
- le flux de dispersion ;
- la tension d'alimentation ;
- la tension de neutre (neutre alimentation - neutre machine) ;
- le couple électromagnétique ;
- la vitesse rotorique ;
- les vibrations.

Beaucoup de travaux ont été effectués sur les vibrations de la machine asynchrone. La plupart des défauts connus peuvent être détectés avec ce type d'approche. Cependant, l'équipement nécessaire pour l'acquisition des signaux reste encore coûteux.

I-10-4 Analyse fréquentielle des courants statoriques et du flux de dispersion

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

Nous savons que le suivi de l'amplitude des composantes caractéristiques de fréquence ($f \pm 2k g$)fs dans le spectre du courant permet de se renseigner sur l'état de la cage rotorique. A titre d'exemple, nous présentons sur les figures I.10(a) et I.10(b) le spectre du courant statorique lorsque la machine fonctionne avec un rotor sain et un rotor défaillant (une barre cassée). Nous apercevons une nette augmentation de l'amplitude de ces composantes, ce qui traduit la présence d'un défaut au sein de la cage d'écureuil. Certains auteurs se sont penchés sur l'analyse du ux de dispersion de la machine asynchrone pour la détection des courts-circuits entre spires statoriques. Ils ont montré que l'apparition de ce type de défaut induisait des composantes additionnelles dans le spectre fréquentiel du flux de dispersion. Cette nouvelle approche permet de détecter, tant un défaut statorique, qu'un défaut rotorique en utilisant un capteur de flux relativement peu coûteux.

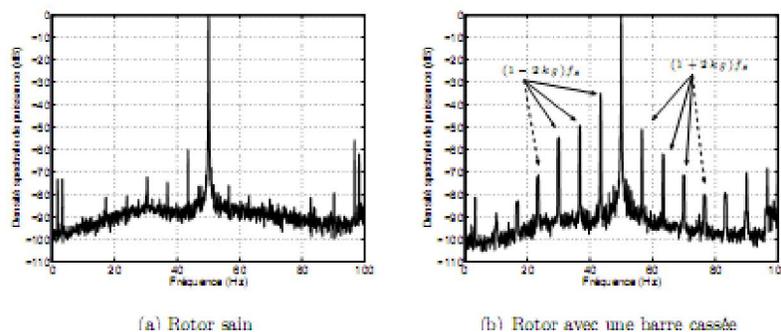


Fig. I.15 : Spectre du courant statorique (Résultats expérimentaux)

I-10-5 Analyse fréquentielle du couple électromagnétique et de la vitesse rotorique

Lorsqu'une rupture de barre apparaît, les spectres fréquentiels de la vitesse rotorique et du couple électromagnétique laissent paraître des composantes supplémentaires situées aux fréquences $2kf_s$. Cependant, il s'est avéré que l'analyse de ces composantes ne nous renseigne pas aussi bien sur le défaut rotorique que celles présentes dans le spectre du courant statorique (augmentation des amplitudes moins significative). De plus, l'acquisition de ces deux signaux nécessite un équipement assez coûteux par rapport à un simple capteur de courant, ce qui limite leur utilisation pour le diagnostic de défauts des machines asynchrones. Certains systèmes reconstruisent une image du couple électromagnétique à partir des tensions et des courants mesurés sur la machine, mais cette approche reste moins efficace que les méthodes précédemment citées.

I-10-6 Analyse fréquentielle de la tension de neutre

En 1998, Cash a utilisé la tension présente entre le neutre de la source d'alimentation et le neutre de la machine asynchrone (*à condition que la machine soit couplée en étoile sur l'alimentation*) pour détecter des courts-circuits entre spires dans le bobinage statorique [31]. Une analyse similaire a été effectuée par nos soins dans le but de détecter un défaut rotorique dans les machines asynchrones.

Nous avons montré que l'information donnée par la tension présente entre les deux neutres était pertinente pour le diagnostic des défauts rotoriques. Cette technique a tout d'abord été testée sur différents essais de simulation pour être ensuite validée sur de essais expérimentaux. L'information la plus significative pour permettre un diagnostic est la fréquence $f_{bt}^{\pm} = [3(1-g) \pm g]f_s$. La fréquence de la cage rotorique se situe au niveau des composantes harmoniques de fréquence

Nous présentons sur les figures I.11(a) et I.11(b) le spectre fréquentielle de cette tension lorsque la machine asynchrone fonctionne avec une cage saine et une cage présentant une barre cassée (essai effectué à charge nominale).

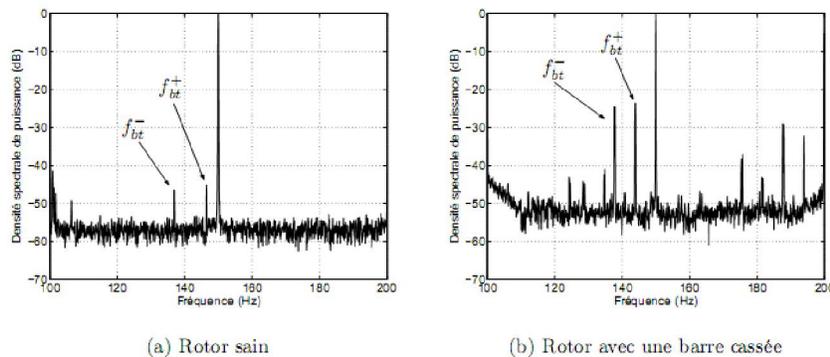


Figure. I.16 : Spectre de la tension de neutre (Résultats expérimentaux)

Nous avons remarqué, à partir des essais expérimentaux, que l'augmentation de l'amplitude de ces composantes est plus significative que celle présente à la fréquence $(1-2g)fs$ dans le spectre fréquentiel du courant statorique lorsque le défaut rotorique apparaît. De plus, l'acquisition de ce signal reste aussi simple que le courant statorique. Cependant, il est préférable que le neutre de la source d'alimentation ne doit pas être trop éloigné de celui de la machine.

I-10-7 Analyse fréquentielle de la puissance instantanée

La quantité d'information donnée par la puissance instantanée d'une phase, qui n'est autre que le produit de la tension d'alimentation et du courant absorbé par le moteur, est plus importante que l'analyse du courant seul. En effet, en plus de la composante fondamentale et des deux composantes latérales, le spectre de la puissance instantanée contient une composante additionnelle située à la fréquence de défaut comme le montre la relation suivante :

$$p_s(t) = p_{s0}(t) + \frac{mV_{LL}I_L}{2} \left[\cos\left((2\omega_s - \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left((2\omega_s + \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + 2 \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \cos(\omega_f t) \right]$$

avec

$$p_{s0}(t) = V_{LL}I_{LL} \left[\cos\left(2\omega_s t - \varphi - \frac{\pi}{6}\right) + \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

Dans cette expression, $P_s(t)$ représente la puissance instantanée d'une phase statorique, m l'indice de modulation, V_{LL} la valeur RMS de la tension entre phase, I_L le courant de ligne et ω_f la pulsation d'oscillation (pulsation de défaut) exprimée en radians. Les termes ω_s et φ représentent respectivement la pulsation des courants d'alimentation exprimée en radians et l'angle de déphasage entre le courant absorbé par le moteur et la tension.

Les figures I.12(a) et I.12(b) montrent clairement la présence de ces composantes basses fréquences lorsque la cage de la machine présente une défaillance (essais effectuées à charge nominale). Le fait de retrouver ces composantes dans une bande fréquentielle bornée facilite leur détection et permet donc d'améliorer le diagnostic de défaut. Cette représentation rappelle celle obtenue avec l'analyse fréquentielle du module du vecteur de Park mais la différence, avec l'analyse de la puissance, réside dans le fait que seule l'acquisition d'un courant et d'une tension est nécessaire. Ce type de signal est aussi utilisé pour détecter les défauts d'origine mécanique (variation du couple de charge par exemple) ou encore les courts-circuits entre spires statoriques.

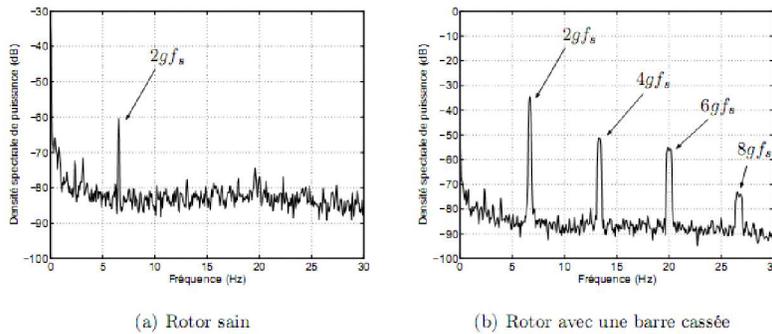


Fig. I.17 : Spectre de la puissance instantanée (Résultats expérimentaux)

I-11 Technique additionnelle

Récemment, une technique intéressante a été proposée par *J. Milimonfared* pour la détection de barres cassées dans les moteurs asynchrones. Cette technique est basée sur un test d'ouverture de phase lorsque la machine asynchrone fonctionne à vide. Au moment où les trois phases statoriques de la machine sont déconnectées de l'alimentation, nous savons que les courants rotoriques induisent des tensions dans les bobinages statoriques. Lorsque le rotor de la machine est sain, la force magnétomotrice produite par les courants des barres rotoriques après la déconnexion de la source d'alimentation est à prédominance sinusoïdale. Par conséquent, les tensions générées dans les bobinages statoriques ne contiennent pas ou peu d'harmoniques significatifs, mise à part l'harmonique fondamental ou encore les harmoniques créés par l'encochage rotorique. Si la cage d'écureuil présente une ou plusieurs barres cassées, la tension induite dans les bobinages statoriques n'est plus sinusoïdale ce qui provoque l'apparition de composantes harmoniques supplémentaires spécifiques au défaut rotorique.

Nous donnons aux figures I.13(a) et I.13(b) les spectres fréquentiels de la tension composée U_{ab} présente aux bornes de la machine lors d'une déconnexion de la source d'alimentation. Comme prévu par les auteurs, nous avons une augmentation de l'amplitude des composantes harmoniques de rang $(6m \pm 1)$ ($m = 0; 1; 2 : : :$) lorsque la cage rotorique présente une défaillance. La quantification du défaut reste cependant difficile étant donné que le spectre de la tension composée obtenue pour un rotor sain présente des composantes harmoniques de fréquences identiques.

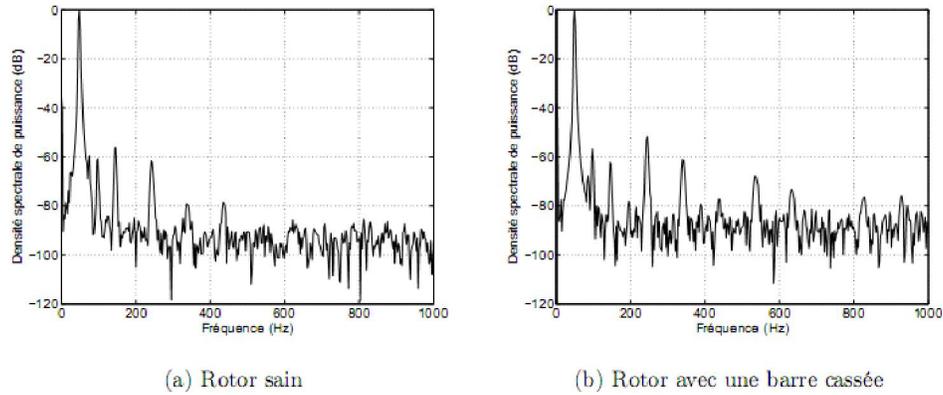


Fig. I.18 : Spectre de la tension composée U_{ab} après déconnexion de la source d'alimentation
(Résultats expérimentaux)

Cependant, la technique proposée est intéressante puisqu'elle se dégage des perturbations (harmoniques de temps) et des déséquilibres générés par la source d'alimentation. De plus, cette méthode requiert peu de points pour le calcul de la transformée de Fourier car il ne faut prendre que les premières périodes de la tension composée pour considérer le signal comme étant stationnaire.

Le principal inconvénient est l'impossibilité d'utiliser cette méthode sur des machines faisant partie intégrante d'un système de production. Cette technique peut cependant être intéressante pour le diagnostic des défauts rotoriques dans une entreprise de fabrication de machines électriques (diagnostic de la machine en sortie de chaîne de production par exemple). La détection d'un défaut naissant avec cette technique reste, à l'heure actuelle, encore difficile.

I-12 Conclusion

Nous avons montré que les principaux éléments de constitution d'une machine asynchrone triphasée peuvent présenter des défaillances qui induisent, pour la plupart d'entre elles, un arrêt intempestif de la machine asynchrone. C'est pour pallier ce problème que le diagnostic de défaut a pris une importance de plus en plus grandissante dans les milieux industriels. Cet essor a fait naître des techniques de diagnostic dans le but de se prémunir de ces arrêts imprévisibles. Nous avons vu que la détection d'un défaut, qu'il soit mécanique ou électrique, s'effectue majoritairement par la surveillance de l'amplitude de composantes spécifiques dans le spectre fréquentiel d'une grandeur mesurable. C'est pour cette raison que nous avons présenté quelques estimateurs classiques de la densité spectrale de puissance d'un signal temporel.

Dans la continuité de la présentation, nous avons abordé les méthodes de détection existantes en discutant de leurs atouts et de leurs faiblesses. Dans la majorité des cas étudiés, les techniques conventionnelles de diagnostic, qui utilisent la transformée de Fourier rapide, suffisent. Cependant, il s'avère que lorsque le signal à analyser est non-stationnaire, les transformations temps-fréquence et temps-échelle fournissent un outil plus adapté pour la détection et le diagnostic de défauts. En effet, ces techniques montrent quelques avantages dans des applications particulières où la vitesse rotorique change rapidement.

II-1 Introduction

vu sa grande solidité et son faible cout , le moteur asynchrone à cage reste l'élément réussite de la plupart des équipements industriels. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointes comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,... Malgré toutes ces aptitudes, un certains nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, Electriques, mécaniques et d'environnement) peuvent restreindre la durée de vie de celui-ci, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor

II.2. METHODES DE DIMENSIONNEMENT ET CALCUL DES MACHINES ELECTRIQUES

Ils existent plusieurs méthodes pour le dimensionnement des machines électriques, c'est un domaine très large dont l'approche utilise beaucoup d'hypothèses.

Tout au long de notre recherche nous nous sommes trouvés devant plusieurs sortes de procédés propres à chacun des concepteurs, la méthode en général ne change pas puisque on remarque toujours un même cheminement qui autorise a dimensionner le stator suivi par un calcul du rotor. Les caractéristiques statiques et dynamiques sont calculées d'après les schémas équivalents de la machine.

Par la suite nous vous proposons une liste de quatre méthodes de calcul non exhaustives rencontrées dans notre recherche bibliographique

II.2.1 Première Méthode

Cette méthode proposée par Marcel JUFER et Jean-Claude SABONNADIÈRE, repose sur le calcul en utilisant pour commencer les formules de dimensionnement du Fer statorique ensuite ils entament le calcul rotorique : Le dimensionnement du circuit magnétique, est basé sur les contraintes suivantes :

* Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à limité les chutes de potentiel et les pertes fer, tout en diminuant le volume et la masse du fer; puis définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique.

* Le diamètre d'alésage et la longueur active sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution sera admise sinusoïdale.

II.2.2 Deuxième Méthode

Cette deuxième méthode à caractère pédagogique utilisé à l'école polytechnique de MONREAL est une méthode à but didactique, La méthode suggérée offre une certaine marge de manœuvres, des compromis doivent être faits pour le choix de certains paramètres comme le diamètre d'alésage du moteur par exemple, le résultat obtenu doit quelquefois faire l'objet de changement afin de satisfaire les exigences visées, Cette méthode inclue aussi les dispersions due à la disposition en biais des encoches rotoriques.

II.2.3. Troisième Méthode

Cette procédure réuni le calcul et la conception assistée par ordinateur d'une machine à induction, et emprunte différentes phases de calcul suivant un ordre chronologique. Cette approche est basé sur le principe de conception de G.KOUSKOFF et LIWSCHITZ. Sauf qu'on impose les données géométriques d'une machine industrielle déjà existante, comme contraintes auxquelles nous devons nous soumettre. Les résultats numériques du calcul sont comparés avec ceux donnés par la méthode des essais classiques puis traités par une analyse dynamique simulée du comportement de la machine en vue de mettre au point la corrélation et la concordance de ces résultats de conception avec ceux délivrés par le constructeur du moteur à induction étudié.

II.2.4 Méthode Classique « calcul de LIWSCHITZ »

Cette méthode sera développée dans le deuxième chapitre, elle sera à la base de nos calculs lors du dimensionnement des machines.

II.2.5. Procédés actuelles adoptées

En génie électrique, la conception d'un appareil ou d'un circuit comporte des aspects spécifiques dus aux lois de l'électromagnétisme ou de l'électronique et qui caractérisent son fonctionnement intime. Ces aspects spécifiques doivent pouvoir être analysés et ensuite pris en compte dans des logiciels spécialisés qui permettent une analyse fine des aspects électriques ou électromagnétiques de l'appareil à concevoir.

Cependant, les effets électriques dans un milieu donné induisent inévitablement des contraintes thermiques et mécaniques qui influent sur le comportement de l'appareil ; ils doivent donc être étudiés soigneusement.

Le calcul et l'analyse des régimes transitoires ainsi que les défauts dans les systèmes simulés et particulièrement dans les machines à induction restent abordé par beaucoup de publications, la plupart des articles traitent les défauts et les différents effets indésirables tels que l'étude des harmoniques et les effets des encoches rotoriques dans la machine électrique.

Exemple, l'article de A. Canova qui utilise la modélisation par élément finis avec le logiciel flux2D pour le calcul des harmoniques dues aux encoches du rotor d'un moteur asynchrone.

Enfin, les impératifs de fabrication impliquent l'immersion de ces progiciels spécifiques dans un ensemble intégré dans lequel les outils généraux de définition géométrique (modeleurs), et ceux de l'élaboration des circuits électroniques qui permettent de préparer les plans et liasses pour la fabrication.

Quelques articles exposent l'expérience de l'institut polytechnique de Grenoble dans l'enseignement de ces logiciels comme le progiciel industriel flux2D, il montre l'intérêt didactique de ces derniers dans la compréhension et l'interprétation des différents phénomènes magnétiques ainsi que leurs domaine d'application dans l'industrie. [15].

Ces logiciels sont très utiles pour l'étude et la modification des différents paramètres de la machine, ces paramètres peuvent variés selon les performances désirés, ils englobent tout aussi bien les dimensions géométriques, pour tous ce qui est magnétique « saturation, courants de Foucault ...etc. », ou bien l'alimentation d'un circuits représentant la partie électrique.

Exemple :

- Les paramètres géométriques :
- Le dimensionnement de l'entrefer [16].
- La forme des encoches rotoriques [17].

Les paramètres magnétiques et électriques en jouant sur les matériaux : comme pour l'étude d'un rotor d'une machine à induction, ici le paramètre modifié ce sont les

matériaux magnétiques. Il ressort de cette analyse que les méthodes et techniques générales de la CAO s'appliquent intégralement à la conception du matériel électrique lorsqu'on les complète par quelques outils spécifiques du type calcul de champs ou simulation des circuits de puissance à semi-conducteurs.

II.3 Méthodes de modélisation

A ce jour, les modèles qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écurueil peuvent être décomposés en deux parties bien distinctes :

- les modèles dits "physiques" ;
- les modèles dits "comportementaux".

En ce qui concerne les modèles physiques, ce sont les lois régissant l'électromagnétisme qui sont utilisées pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone. Ces modèles sont divers et peuvent varier en complexité et/ou en précision selon la méthode de modélisation utilisée. Nous ne les citerons pas tous mais nous pouvons énoncer les plus populaires dont ceux basés sur :

- la méthode des éléments finis
- la méthode des réseaux de perméance ;
- la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés.

Les modèles comportementaux, quant à eux, reprennent les modèles physiques en y incluant des paramètres supplémentaires. Ces paramètres permettent la détection, et pour certains d'entre eux, la localisation du défaut observé. Nous introduisons alors une description exhaustive de ces différentes méthodes de modélisation pour permettre une compréhension adéquate des problèmes propres à chacune d'entre elles.

II.3.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une approche qui requiert un temps de calcul important. Le circuit magnétique de la machine est découpé en plusieurs éléments de dimension faible pour permettre de considérer le matériau magnétique linéaire sur les surfaces correspondantes. L'utilisation des équations de Maxwell, à partir des formes locales, permet de résoudre le problème. La résolution analytique correspondante est complexe et ne permet de traiter le phénomène de saturation que de façon approchée. De nombreux logiciels ont vu le jour pour

permettre d'aborder cette approche di-cile. Nous pouvons citer Flux2D, Flux 3D ou encore Maxwell. Le but principal de ces logiciels est, rappelons le, de déterminer la cartographie du champ magnétique présents dans les machines électriques dans l'objectif d'optimiser le dimensionnement de ces dernières.

II.3.2 Méthode des réseaux de perméance

La méthode des réseaux de perméance est basée sur la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine asynchrone. Chaque tube ainsi obtenu est caractérisé par sa perméance suivant qu'il se trouve dans le fer ou dans l'air. A partir de cette décomposition, on construit un réseau dit de perméance. Ces réseaux peuvent être assimilés à un circuit électrique habituel à la différence près que ce sont les flux et les différences de potentiels magnétiques qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiels électriques. Cette approche permet de prendre en compte les caractéristiques du fer utilisé pour la construction de la machine asynchrone. En effet, le calcul des différentes perméances ne peut se faire qu'en fixant une valeur précise pour la perméabilité relative du fer μ_r . Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variables selon la position du rotor de la machine.

II.3.3 Méthode des circuits électriques magnétiquement couplés

Les inductances propres et mutuelles entre le stator et le rotor de la machine prennent une place importante dans cette méthode de modélisation car elles contiennent la signature des différents phénomènes pouvant apparaître au sein de la machine asynchrone. Une modélisation précise de ces inductances mènera à un apport d'informations supplémentaires sur les signaux tels que le courant statorique ou encore la vitesse rotorique. Cette approche offre un bon compromis en terme de précision du modèle et de temps de calcul. De plus, ce type de modélisation permet de prendre en compte un certain nombre de défauts d'origine électromagnétique tels que les défauts de court-circuit entre spires statoriques, les défauts de type rupture de barre rotorique et/ou de portion d'anneau de court-circuit. Nous pouvons aussi intégrer à ce type de modèle les défauts d'excentricité statique et dynamique.

II.3 Modèle de la machine en absence de défaillance

Dans notre étude, nous utiliserons la méthode des circuits électriques magnétiquement couplés pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone. Les travaux déjà effectués au sein de notre équipe depuis 1996 et les facilités apportées par cette approche pour étudier les

défauts magnétiques nous ont semblé être les plus adéquates pour analyser l'influence d'une rupture de barre sur le fonctionnement de la machine asynchrone. Dans cette méthode, les inductances peuvent être calculées soit en utilisant les fonctions de bobinage comme l'ont fait les laboratoires du GREAH et du LEII, en sachant que cela impose une connaissance précise de la forme du bobinage de la machine, soit en utilisant une décomposition en séries de Fourier de l'induction d'entrefer de la machine. Cette dernière approche nous a semblé la plus adéquate étant donné que nous n'avons pas les informations nécessaires pour calculer les inductances de la machine par la méthode des fonctions de bobinage. En effet, le calcul de ces inductances par une décomposition en séries de Fourier ne nécessite pas de connaissance précise du bobinage de la machine car les termes relatifs à l'étalement, au raccourcissement, à l'inclinaison du bobinage sont intégrés au calcul des inductances à travers des coefficients spécifiques. Ce type de modélisation permet donc de prendre en compte les harmoniques des inductances souhaités (simulation possible au fondamental de l'induction ou avec les harmoniques d'espace les plus importants).

Tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses qui font l'objet de la suite de cette partie. Nous développerons ensuite les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques pour permettre la résolution numérique du modèle proposé.

II.3.1 Hypothèses de départ

Le premier objectif de cette modélisation est de mettre en évidence l'influence des défauts électriques sur les grandeurs temporelles de la machine asynchrone (courants, vitesse, couple, ...). Pour ce faire, il est indispensable de poser certaines hypothèses qui ont pour but de faciliter la mise en équations des circuits électriques de la machine. Cependant, étant donné que le modèle de la machine asynchrone à cage est développé en vue de la surveillance et du diagnostic, il faut imposer un minimum d'hypothèses si nous voulons que le vecteur de sortie (grandeurs temporelles) soit le plus exploitable possible.

Dans l'approche proposée, nous avons supposé la linéarité du circuit magnétique (perméabilité relative du fer très grande devant 1). Cette hypothèse nous a permis d'introduire le concept d'inductance propre et mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques.

L'effet de peau, dans cette approche, a été négligé. Nous avons supposé que les barres rotoriques étaient isolées les unes des autres ce qui permet d'éliminer les courants inter-barres et leurs effets au sein même de la cage rotorique. De plus, les pertes fer de la machine, les effets

capacitifs et les effets thermiques ont été négligées dans la construction du modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le modèle exposé prend en compte les harmoniques d'espace du bobinage statorique les plus importants ainsi que l'inclinaison des barres rotoriques. Les harmoniques de temps créés par un réseau d'alimentation triphasé ou par un convertisseur statique ont été incorporés dans la modélisation de l'alimentation de la machine asynchrone [2].

II.4 Paramètres représentatifs des défauts

Les paramètres caractéristiques de la machine asynchrone peuvent servir de très bons indicateurs de défaut. Nous présentons dans ce qui suit, à partir des informations recueillies dans la littérature, ceux qui sont représentatifs des défauts rencontrés au niveau de la machine.

L'une des défaillances les plus couramment étudiées dans la machine asynchrone à cage d'écureuil est la rupture des barres rotoriques. Bien qu'elle soit identifiable à partir de l'analyse spectrale des courants statoriques on sait maintenant, grâce à l'estimation et à la surveillance de l'évolution d'autres paramètres, détecter l'occurrence de ce défaut. En effet, l'estimation par filtre de Kalman étendu ou par observateur grand gain non linéaire de la résistance R_r et du flux rotor Θ_r , permet de voir que ceux-ci sont très sensibles aux défauts du rotor. La variation de R_r est d'autant plus importante que le nombre de barres cassées augmente.

Toutefois, le seul paramètre R_r ne permet pas de détecter la présence d'une ou plusieurs barres défectueuses. La valeur de cette résistance est liée à la variation de température du rotor et donc il suffirait que n'importe quel défaut pouvant entraîner une élévation de température apparaisse pour qu'elle varie. Cette ambiguïté persiste même si la valeur estimée est comparée à un seuil défini pour un fonctionnement à température ambiante.

L'expression d'une résistance en fonction de la température est donnée par :

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (\text{II-17})$$

Avec :

- R_0 : la valeur de R à $T_0 = 25^\circ\text{C}$
- α : le coefficient de température de la résistance
- ΔT : la variation de la température

Ainsi, estimer un jeu de paramètres peut servir non seulement à mieux interpréter les observations mais aussi à élargir le champ d'investigation à d'autres types de défaut.

Dans son étude, utilise l'identification des paramètres issus du modèle de Park pour détecter l'occurrence d'un défaut, suivi d'analyses fréquentielles pour distinguer les défauts du stator des défauts du rotor. Enfin l'estimation des paramètres à partir du modèle triphasé de la machine lui permet de reconnaître la phase statorique en défaut.

Ces études portent sur les défauts tels que les barres cassées et la réduction de spires ou les courts-circuits dans les enroulements statoriques. Les paramètres estimés sont les suivants [4]:

- Pour le modèle de Park :

$$\Theta = [R_s \ R_r \ L_{fs} \ L_r]$$

- Pour le modèle triphasé :

$$\Theta' = [R_{sa} \ R_{sb} \ R_{sc} \ L_{fsa} \ L_{fsb} \ L_{fsc} \ R_r \ L_{rp}]$$

Les paramètres issus du modèle triphasé sont estimés à partir des paramètres du modèle de Park de la manière suivante :

$R_{s3} = R_{sp}$, $R_{r3} = R_{rp}$, $L_{rp} = 3/2 L_{rp3}$, les indices 3 et p étant mis respectivement pour "triphasé" et "Park".

En terme de détection et de localisation des défauts, l'auteur tire les enseignements suivants :

- Un défaut au stator entraîne l'augmentation de R_s et la diminution de R_r
- Un défaut au rotor entraîne la diminution de R_s et l'augmentation de R_r

L'identification est confirmée par l'analyse spectrale des résidus de comparaison entre les paramètres réels et estimés:

- L'apparition d'une raie à $f = n \cdot f_s$ est causée par un défaut au stator ($n \geq 1$)
- L'apparition d'une raie à $f \ll f_s$ est causée par un défaut au rotor

Sachant que les fréquences fondamentales des courants statoriques et rotoriques sont respectivement égales à f_s et $g \times f_s$ (où g est le glissement).

Dans le cas d'un défaut au stator (réduction de spires ou court-circuit) tous les paramètres issus du modèle triphasé changent mais seulement deux sont rigoureusement corrélés avec l'origine du défaut. Par exemple pour une réduction du nombre de spires sur la phase b : il y a une diminution de

R_{sb} et L_{fsb} alors que les couples (R_{sa}, R_{sc}) et (L_{fsa}, L_{fsc}) augmentent.

Pour détecter un nombre plus faible de spires en court-circuit (jusqu'à 0,7% du nombre total de spire par phase), fait une approche de type circuit qui met en évidence le fait qu'un court-circuit se traduit non seulement par la création d'une bobine fictive supplémentaire notée B_{cc} (figure 1.5) mais aussi par la diminution du nombre de spires dans la phase concernée [4].

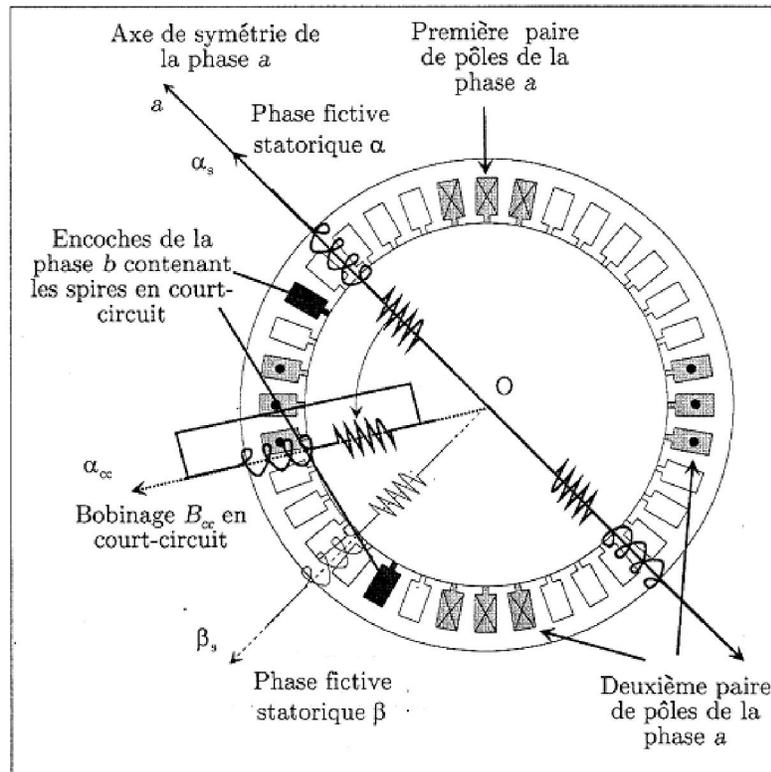


Fig. II. 1. Représentation schématique des encoches stator. Localisation des spires en court-circuit. La bobine fictive B_{cc} est représentée dans le repère $\alpha\beta$

Ainsi au modèle usuel de Park vient s'ajouter le paramètre α (à ne pas confondre avec l'axe α issu de la transformation diphasée) qui est le rapport entre le nombre n_{cc} de spires en court-circuit et le nombre total n_s de spires en série par phase du stator.

$$\alpha = \frac{n_{cc}}{n_s}$$

L'expression (II-18) de $\theta_{cc}(t)$ est obtenue en considérant le schéma équivalent monophasé par phase de la machine asynchrone, et en introduisant la notion de flux magnétisant θ_{msf} et le flux de fuite θ_{fs} [4].

$$\Phi_{cc}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{Q}(p\gamma) \left(\alpha l_{ms} \cdot \mathbf{i}_s(t) + \alpha L_m \mathbf{P}(p\theta) \cdot \mathbf{i}_r(t) + \left(l_{ms} + \frac{3}{2} l_{fs} \right) \cdot \alpha^2 \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \mathbf{i}_{cc}(t) \right) \quad (\text{II-18})$$

$$\text{où } \mathbf{Q}(p\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(p\gamma)\cos(p\gamma) & \cos(p\gamma)\sin(p\gamma) \\ \cos(p\gamma)\sin(p\gamma) & \sin(p\gamma)\sin(p\gamma) \end{bmatrix}, \quad l_{ms} \text{ et } l_{fs} \text{ sont respectivement les}$$

inductances magnétisante et de fuite que l'on aurait en l'absence de défaut θ est l'angle mécanique entre le stator et le rotor et \mathbf{P} la matrice de rotation.

Le système d'équation suivant résume le comportement électrique de la machine :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s(t) = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s(t) + \frac{d}{dt}(\phi_{ms}(t) + \phi_{fs}(t)) \\ 0 = -\frac{3}{2} \frac{\mathbf{R}_s}{\alpha} \cdot \mathbf{i}'_{cc}(t) + \mathbf{Q}(p\gamma) \frac{d}{dt} \phi_{ms}(t) \\ 0 = -\mathbf{R}_r \mathbf{i}'_r(t) + \frac{d}{dt} \phi_{ms}(t) - p\dot{\theta} \cdot \mathbf{P}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \phi_{ms}(t) \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

$i'_{cc}(t)$ et $i'_r(t)$ sont les courants de B cc et du rotor ramené au primaire (en considérant le schéma équivalent monophasé par phase de la machine).

Pour la représentation d'état les paramètres estimés a, b, c et d sont :

$$a = \frac{\mathbf{R}_s}{\sigma \mathbf{L}_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \mathbf{T}_r}, \quad b = \frac{\mathbf{L}_s(1-\sigma)}{\mathbf{T}_r}, \quad c = \frac{1}{\sigma \mathbf{L}_s}, \quad d = \frac{1}{\mathbf{T}_r} \text{ et } \alpha.$$

Ce qui donne donc le vecteur des cinq paramètres, $\lambda_0 = [a, b, c, d, \alpha]$. L'influence du défaut sur le comportement entrée/sortie de la machine vient du fait que, dans la représentation d'état, le vecteur de sortie est fonction de l'entrée de commande par l'intermédiaire de α .

Avec \mathbf{Y} le vecteur des courants diphasés mesurés et \mathbf{U} le vecteur des tensions diphasées d'alimentation (obtenus par la transformation de Concordia), la représentation d'état est la suivante [4] :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(\omega, \lambda_0) \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B}(\lambda_0) \cdot \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}(\lambda_0) \cdot \mathbf{X} + \frac{3}{2} \frac{\alpha}{\mathbf{R}_s} \cdot \mathbf{P}(p\theta) \mathbf{Q}(p\gamma) \mathbf{P}(-p\theta) \mathbf{U} \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

Ainsi, ce paramètre évolue de manière plus importante que $\mathbf{R}_s, \mathbf{L}_s, \mathbf{T}_r$ et σ . Surtout lorsqu'il s'agit d'un nombre faible de spires en court-circuit. Dans le terme caractérisant la relation entrée/sortie est simplifié et donc, dans l'équation d'état le vecteur de sortie \mathbf{Y} s'exprime de la manière suivante :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}(\lambda_0) \cdot \mathbf{X} + \alpha \omega_s \frac{\mathbf{U}}{|\mathbf{U}|^2} \quad (\text{II-21})$$

Le rapport entre le nombre spires en court-circuit et le nombre total de spires dans une phase étudié est compris entre 1.5% et 16%. Cependant, cette approche reste sensible à la présence de défauts rotor [4].

II-5 La transformation de Fourier rapide (sigle anglais : *FFT* ou *Fast Fourier Transform*)

FFT Est un algorithme de calcul de la transformation de Fourier discrète (TFD).

Sa complexité varie en $O(n \log n)$ avec le nombre n de points, alors que la complexité de l'algorithme « naïf » s'exprime en $O(n^2)$. Ainsi, pour $n = 1024$, le temps de calcul de l'algorithme rapide peut être 100 fois plus court que le calcul utilisant la formule de définition de la TFD.

C'est en 1965 que James Cooley et John Tukey publient l'article qui « lance » définitivement l'adoption massive de cette méthode en traitement du signal et dans les télécommunications. On a découvert par la suite que l'algorithme avait déjà été imaginé par Carl Friedrich Gauss en 1805, et adapté à plusieurs reprises (notamment par Lanczos en 1942) sous des formes différentes.

Cet algorithme est couramment utilisé en traitement numérique du signal pour transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel, en particulier dans les analyseurs de spectre. Son efficacité permet de réaliser des filtrages en modifiant le spectre et en utilisant la transformation inverse (filtre à réponse impulsionnelle finie). Il est également à la base des algorithmes de multiplication rapide (Schönhage et Strassen, 1971), et des techniques de compression numérique ayant mené au format d'image JPEG (1991).

Soient x_0, \dots, x_{n-1} des nombres complexes. La transformée de Fourier discrète est définie par la formule suivante :

ou en notation matricielle :

$$\begin{pmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{n-1} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & w^{n-1} & w^{2(n-1)} & \dots & w^{(n-1)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{pmatrix}, w = e^{-\frac{2\pi i}{n}}$$

Évaluer ces sommes directement coûte $(n-1)^2$ produits complexes et $n(n-1)$ sommes complexes alors que seuls $(n/2)(\log_2(n) - 2)$ produits et $n \log_2(n)$ sommes sont nécessaires avec la version rapide. En général, de tels algorithmes dépendent de la factorisation de n mais contrairement à une idée répandue, il y a des transformées de Fourier rapides de complexité $O(n \log n)$ pour tous les n , même les n qui sont des nombres premiers.

Comme la transformée de Fourier inverse discrète est équivalente à la transformée de Fourier discrète, à un signe et facteur $1/n$ près, il est possible de générer la transformation inverse de la même manière pour la version rapide.

Remarque : on peut reconnaître ici une matrice de Vandermonde en la matrice $n \times n$.

II-6 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté Méthodes de modélisation les machine d'induction et aussi les modèles permettant d'identifier les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone ou de développer des observateurs étendus permettant de suivre en ligne ces grandeurs.

Nous expliquons en bref La transformation de Fourier rapide, ce transfert in nous permettons explique les spectres et explique les pique qui on vas interprété dans les chapitre partique (chapitre IV)

Les paramètres résistances, inductances, inductances mutuelles et la vitesse peuvent servir de bons indicateurs de défaut dès lors qu'ils sont correctement estimés.

III-1 Introduction

Avant de commencer la simulation dans cette partie on va commencer de donner un détail sur la société qui a créé ce logiciel

III-2 Historique

1971 : Création de la société CEDRAT (Communauté d'Etude et de Développement Régional et Aménagement du Territoire), par un groupe d'agronomes, d'ingénieurs et d'économistes.

1977 : Création de l'entreprise CEDRAT recherche, société d'ingénierie en électrotechnique (Label SRC : société de recherche sous contrat).

1986 : Fondation de la société américaine MAGSOFT.

1992 : Séparation des activités de la société et création d'une entité supplémentaire CEDRAT Développement.

CEDRAT est alors un groupe dont les 3 entreprises liées sont :

CEDRAT (Développement et commercialisation de logiciels, gestion administrative du groupe).

CEDRAT Développement (Aménagement du territoire).

CEDRAT Recherche (Bureau d'études en électrotechnique).

2001 : CEDRAT Recherche change de nom et devient CEDRAT Technologie.

2004 : CEDRAT se sépare de CEDRAT Développement consacré à l'environnement et au développement rural afin de pouvoir réunir un même domaine de compétence sous la même enseigne.

2006 : Achat de 33.6% de la société Adapted Solutions par CEDRAT.

2011 : Séparation de la société CEDRAT TECHNOLOGIE de la société CEDRAT.SA

Aujourd'hui, la société s'appelle CEDRAT SA et elle est spécialisée dans les solutions logicielles, le groupe a pris une dimension internationale grâce à sa filiale américaine Magsoft, créée en 1986, et à la société allemande Adapted Solutions, détentrice du logiciel Portunus, qui a rejoint le groupe en 2006 ainsi qu'à son réseau de distributeurs

III-3 Description du model de moteur asynchrone a simulé (géométrie et circuit)

Dans ce chapitre en étudié la simulation d'une machine asynchrone triphasé à les caractéristiques suivante :

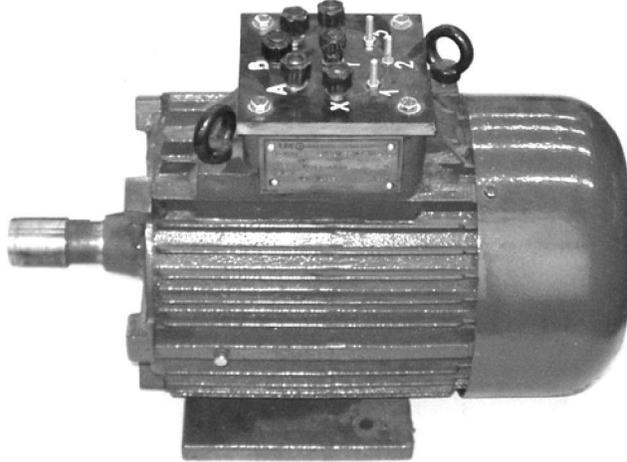


Figure III-1: moteur asynchrone a simulé

Paramètre	valeur
Nombre des dents Statorique	24
Nombre des dents rotorique	20
Diamètre extérieur du stator	212 mm
Diamètre intérieur du stator	120 mm
Diamètre extérieur du rotor	119 mm
Diamètre intérieur du rotor	40 mm
L'entrefer	0.5 mm
La surface moyenne magnétisante	125 mm
Paire de pole	2 (P =1)
Puissance nominale (P_n)	= 7,5 KW
Tension nominale (V_n)	380 V (montage utilisé en Δ)
Fréquence nominale (f_n)	= 50 Hz

Tableau III-1 : paramètre globale de la machine

III-3-1 Géométrie du stator et le rotor

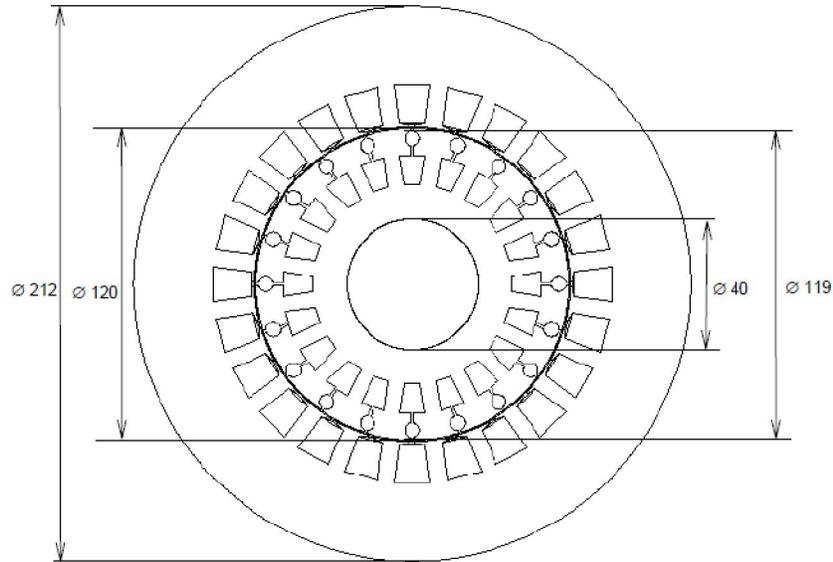
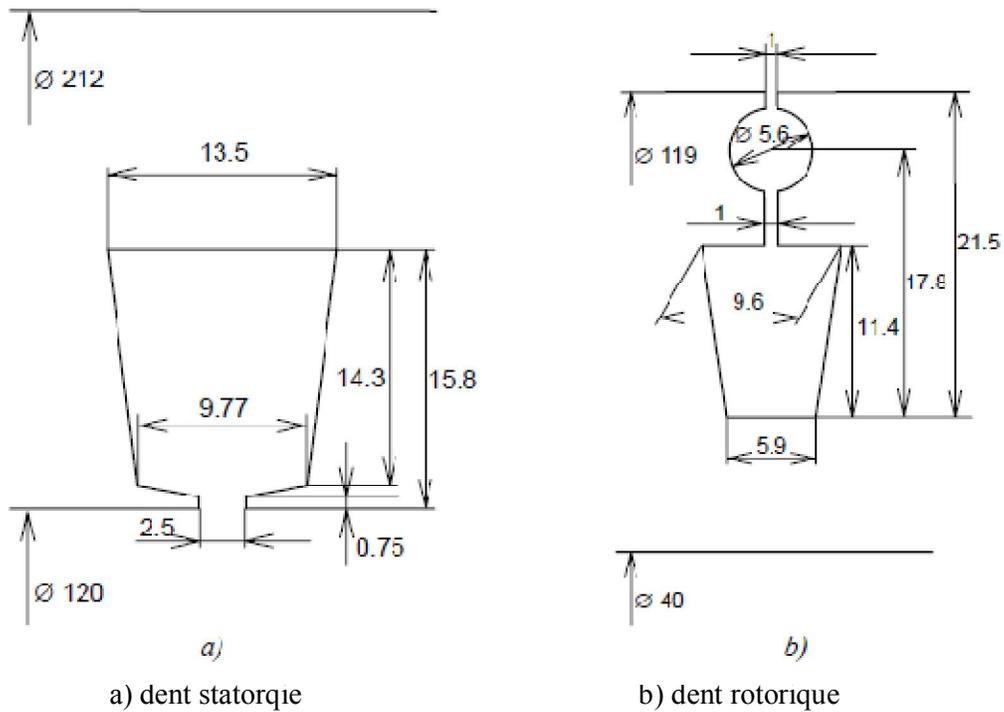


Figure III-2 : la géométrie de la machine a simulé

III-3-2 Les dents statorique et rotorique



a) dent statorique

b) dent rotorique

Figure III-3 : la géométrie de la dent statorique et la dent rotorique

III-3-3 Type de bobinage

Dans ce model on utilise caractéristique de bobinage suivante :

Pour le stator :

- Type de bobinage : double couche centré
- Nombre de spire : 104
- Pas raccourci 8 / 12
- nombre de tour par phase : $w = 208$ tour
- les bobines sont connectées en série dans chaque phase du moteur

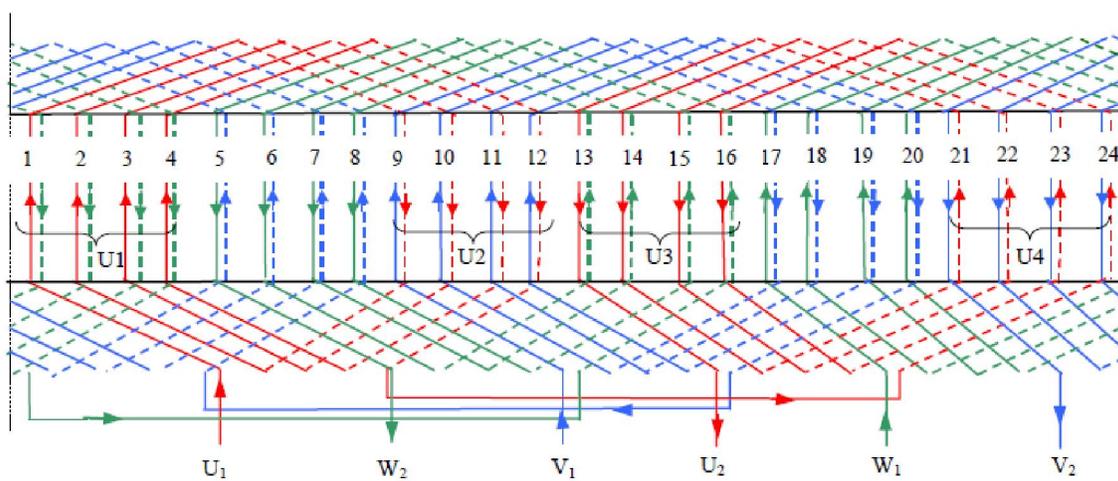


Figure III-4: type de bobinage du stator

Pour le rotor :

- On utilise une cage d'écureuil doublé fabriqué en fonte d'aluminium
- Les valeurs de résistances correspondant à la température nominale du moteur, de 155°C.

III-4 La définition du domaine de calcul de la Champ électromagnétique

Le domaine FLUX2D de calcul du champ électromagnétique dans la figure III-4 contient les éléments suivants régions, avec des propriétés physiques distinctes:

- STATOR , un non-conducteur région magnétique;
- ROTOR , un non-conducteur région magnétique;
- ENTREFER , la zone annulaire non magnétique et non conducteur entre le stator et le rotor armatures;
- ISOLATION, la région non magnétique et non conducteur remplissant les dent du stator entre le enroulement et entrefer;
- U1, U2, U3 et U4,, non-conducteurs, les régions conductrices non magnétiques bloqués, placés dans le dentdu stator, caractérisant les quatre groupes de têtes d'enroulement de phaseU1 - U2 du bobinage du stator, Figure III-5;
- V1, V2, V3 et V4, non magnétique, non conducteur, les régions de conducteur torsadé, compris dans dentdu stator, caractérisant les quatre groupes de têtes d'enroulement de la phase V1 - V2 du bobinage du stator;
- W1, W2, W3 et W4, non magnétique, non conducteur, régions conducteurs bloqués, inclus dans dents du stator, caractérisant les quatre groupes de têtes d'enroulement de phaseW1 - W2 du bobinage du stator;
- BAR1, BAR2,, Bar 20, non-magnétiques, des régions semi-conductrices, placées dans le rotor 20 fentes.

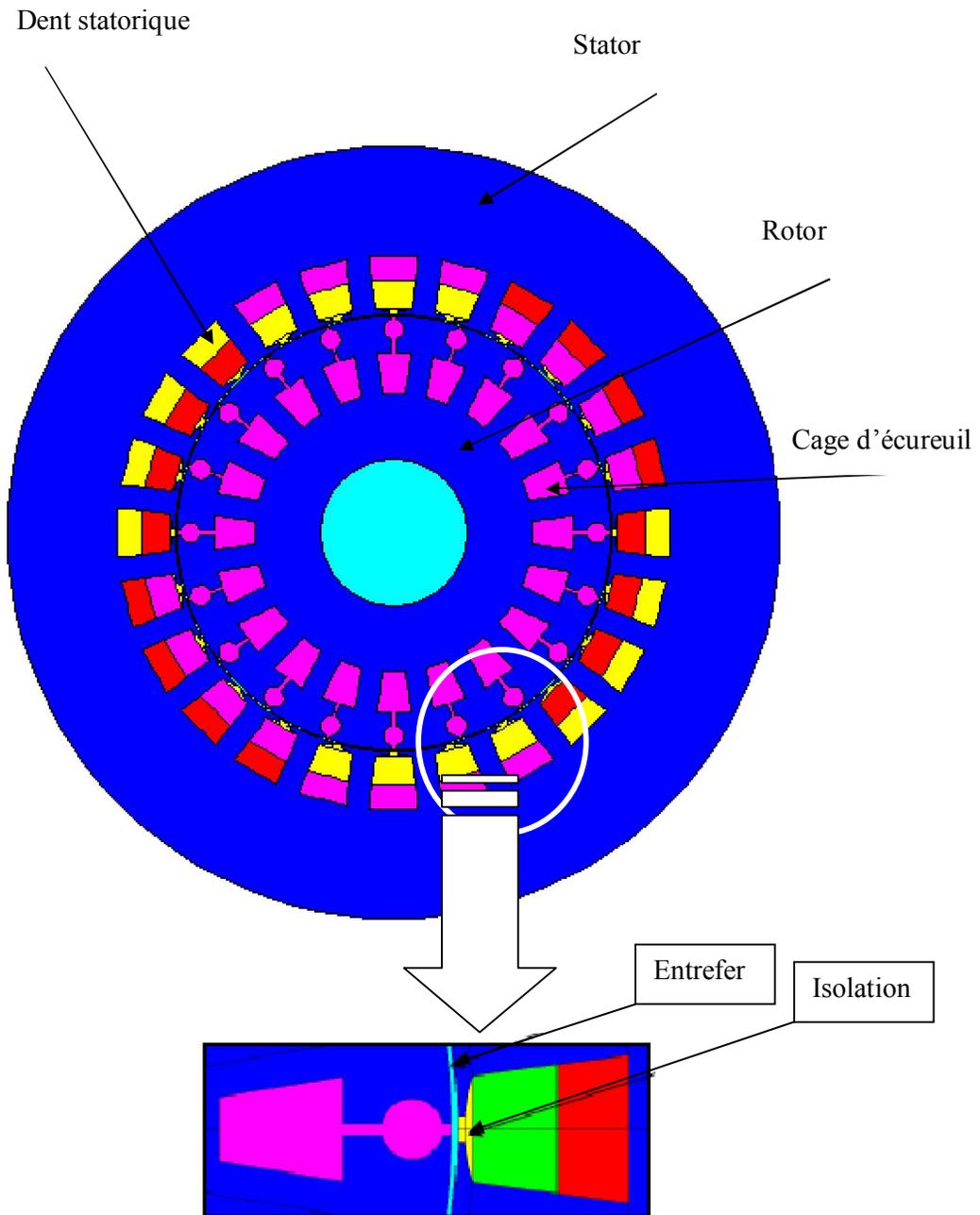


Figure III-5 : domaine du Champ électromagnétique

Les paramètres géométriques détaillés du moteur [8]:

Paramètre	Valeur
rayon d'arbre	20
Nombre de barres de rotor	20
rayon Rotor	59.5
largeur du bas de la dent de rotor	5.9
largeur extérieur de la dent de rotor	9.6
Profondeur de la barre de rotor trapézoïdale	11.4
Rayon de barre de rotor circulaire	2.8
ouverture de l'isthme Rotor	1
Distance du centre de la barre de rotor circulaire	17.8
Distance du l'entrefer en bas de la barre trapézoïdale	21.5
Distance de l'entrefer au fond de la dentde rotor	60
rayon intérieur du stator	106
rayon extérieur stator	85
moyen rayon stator	2.5
ouverture de l'isthme stator	0.75
épaisseur d'isolation du stator	0.75
largeur intérieur de la dent de stator	9.77
largeur du bas de la dent de stator	13.5
Profondeur de la dent de stator	14.3
Nombre de dent du stator	24

Tableau III-2 : paramètre détaillés du moteur

AVEC :

Moment d'inertie : $J= 0.034 \text{ kgm}^2$

Couple résistance : $C_r= 15 \text{ N.m}$

Vitesse initiale : $N = 0 \text{ tr/ min}$

III-5 Circuit d'alimentation

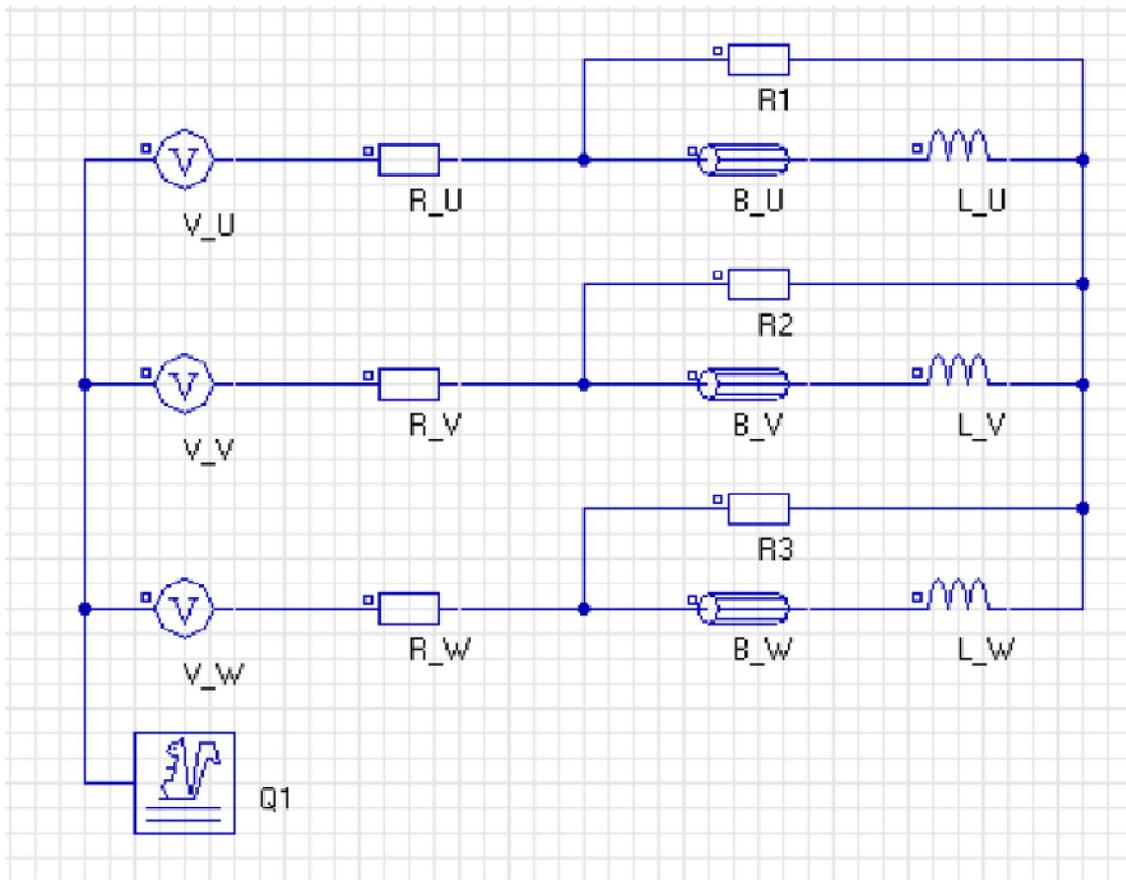


Figure III-6 : circuit d'aimantation

Les paramètres du circuit électrique qui aimanté la machine a simulé [8]

$$R1 = R2 = R3 = 1e+6 \Omega$$

$$R_U, R_V, R_W = 0.9 \Omega$$

$$L_U, L_V, L_W = 4.04 \text{ mH}$$

$$R_{\text{cage d'écureuil}} = 0.904e-6 \Omega$$

$$L_{\text{cage d'écureuil}} = 1.06e-8 \text{ H}$$

$$V_U = 380 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{TIME} - 112 \cdot \pi / 180)$$

$$V_V = 380 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{TIME} + 128 \cdot \pi / 180)$$

$$V_W = 380 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{TIME} + 8 \cdot \pi / 180)$$

$$\text{Nombre de barre de la cage d'écureuil} = 20$$

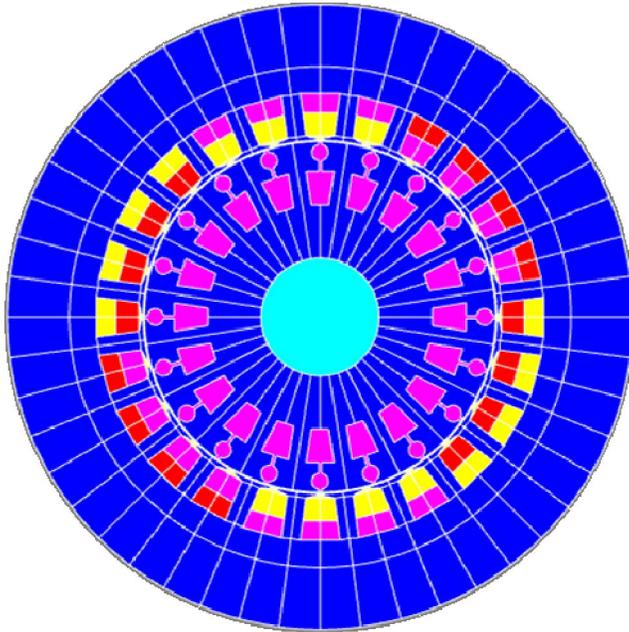
III-6 La machine simulée

Figure III-7 : structure de la machine simulé

Mail

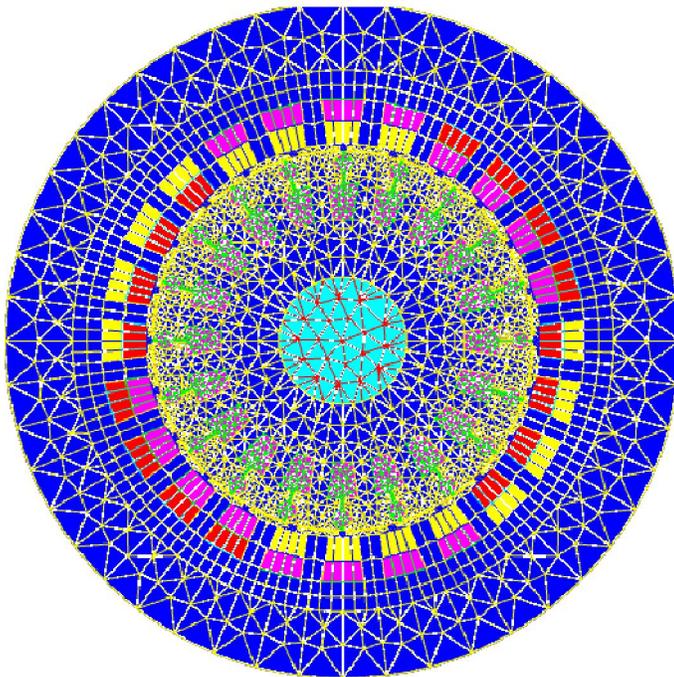


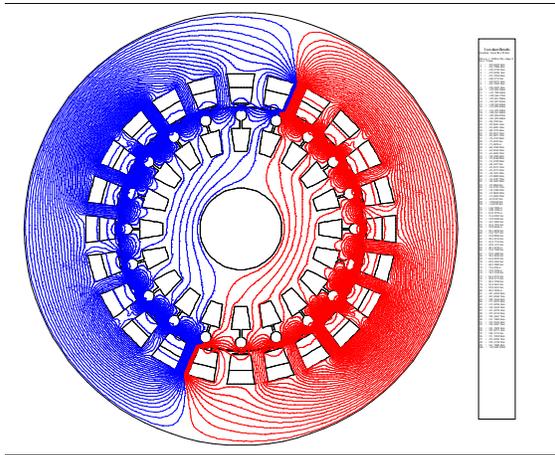
Figure III-8 : le maillage de la machine simulé

Le maillage est une étape très importante parce que c'est la base des les éléments fini, pour sa on a utilisé cinq partie de maillage, chaque partie est différente de l'autre dans la largeur, par exemple a l'entrefer le maillage est très petit (very_small), par contre dans la statore le maillage est très large (very_large) parce que on applique la condition de Dirichlet au frontière et le voisinage de l'entrefer développe l'énergie électromagnétique (v maillage très fine) .

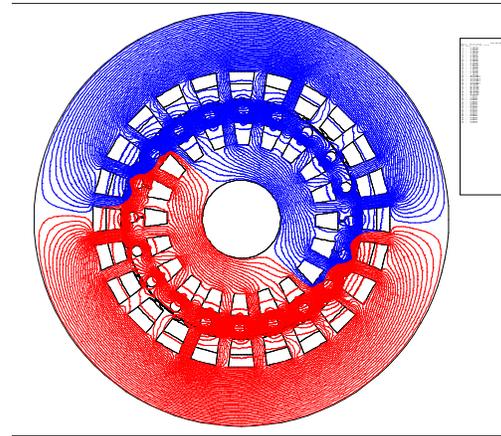
III.4 SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE EN MAGNETOTRANSITOIRE (vitesse non imposée)

III-4-1 1^{er} cas la machine a vide

Maintenant quelque résultats des grandeurs qui on a obtenu par le logiciel FLUX 2D de la machine simulé a vide

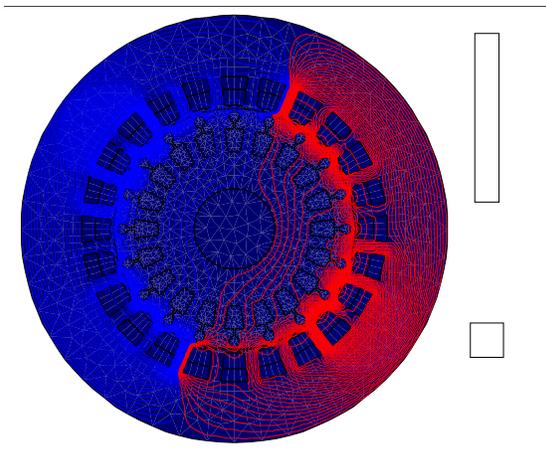


a) distribution des lignes de flux $t=0s$

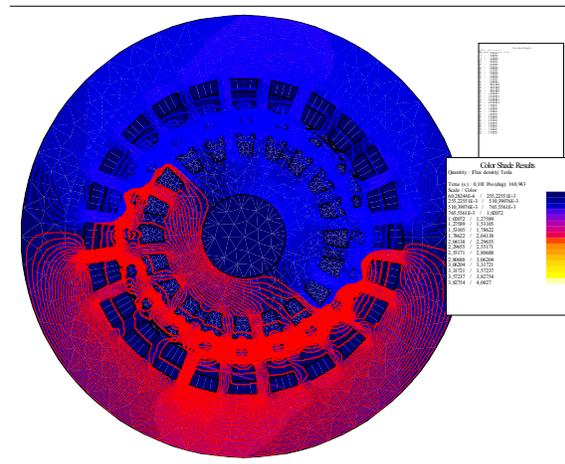


b) distribution des lignes de flux $t=0s$

Figure III-9 ; distribution les lignes de flux



a) l'inductance $t=0s$



b) distribution des lignes de flux $t=0.1 s$

Figure III-10 ; l'inductance B (tesla)

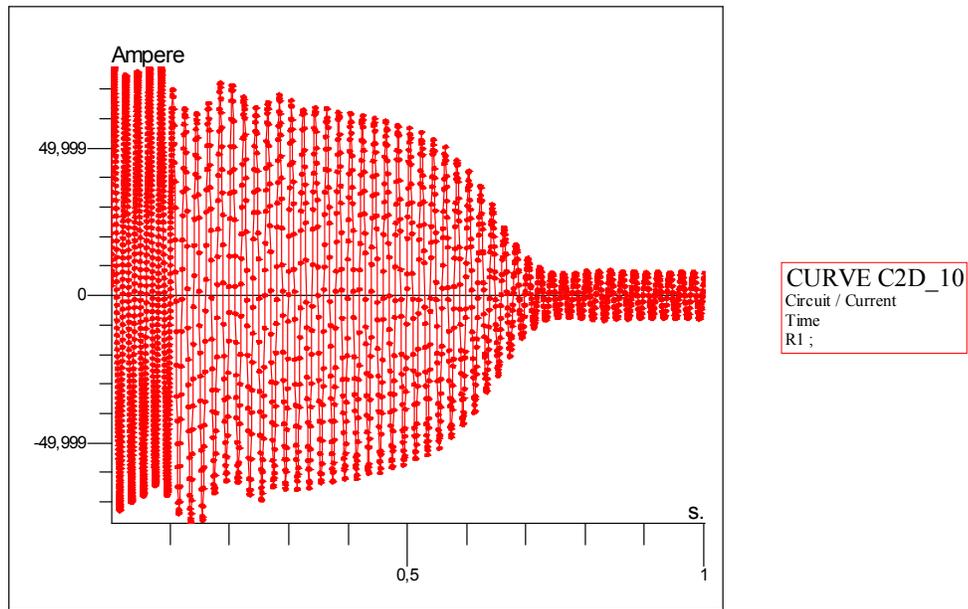


Figure III-10 : Le courant dans une phase (phase N°1)

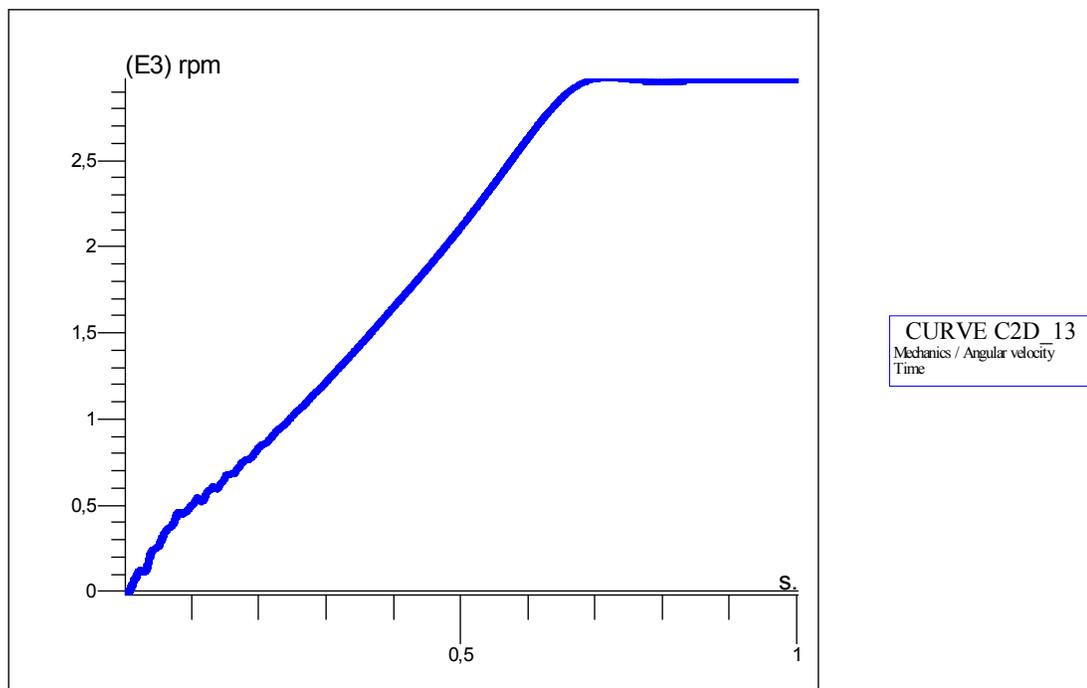


Figure III-10 : la vitesse de la machine

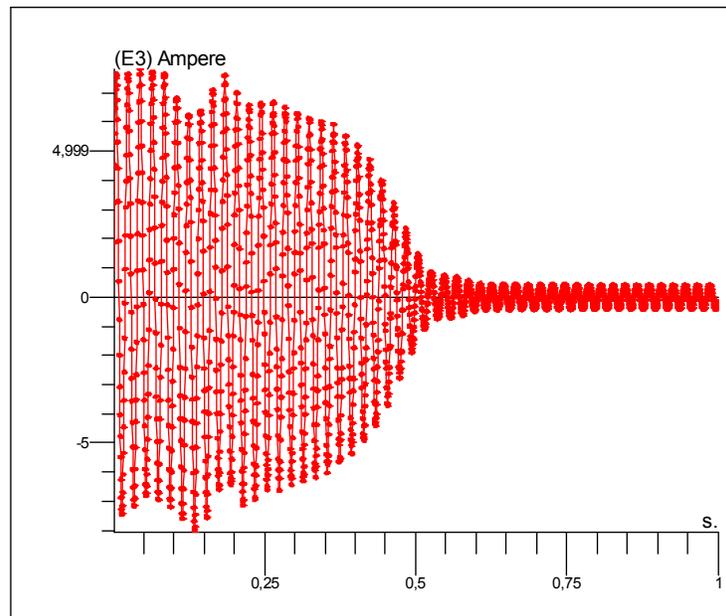


Figure III.11 : le courant dans la barre rotorique 1 à vide

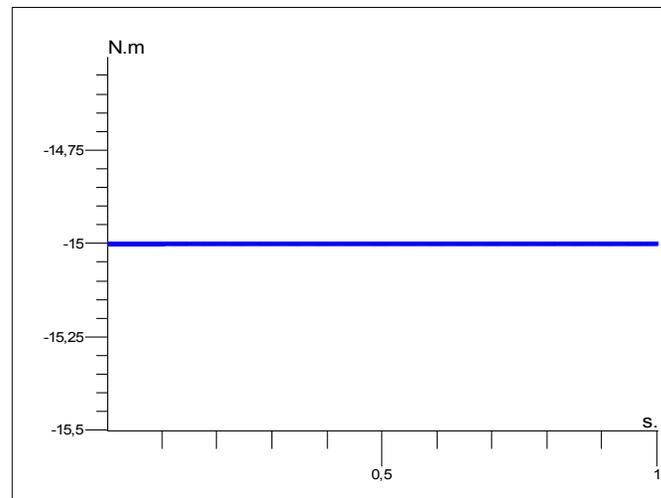
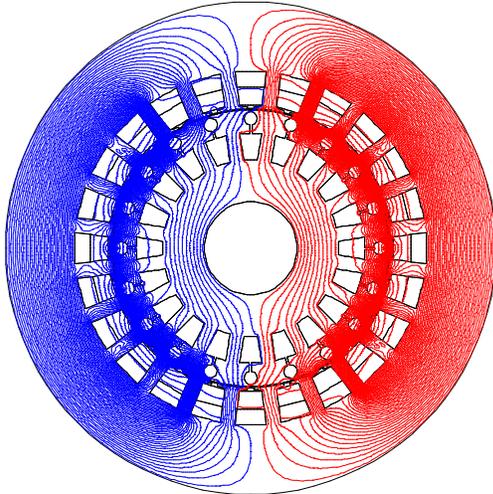
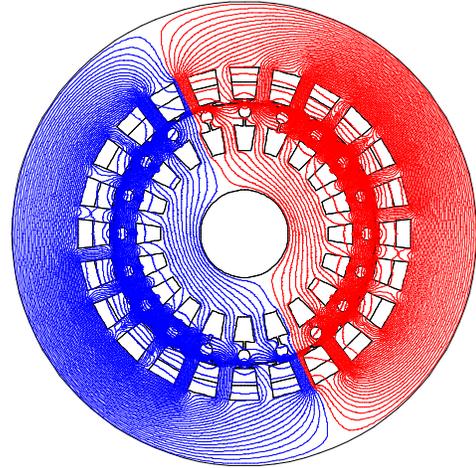
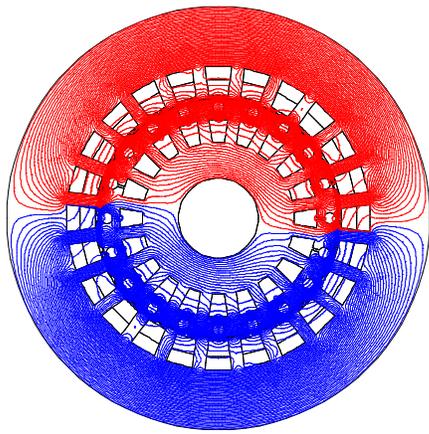
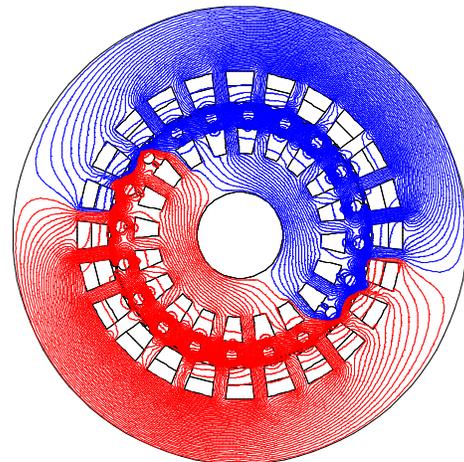


Figure III.12 : le couple électromagnétique de la barre 1 rotorique à vide

Pendant le cas du régime transitoire de la machine a vide le courant de démarrage est important pour sella on utilise le montage de circuit est Δ (tringle), la vitesse est augmenté rapidement (pas de coupe c'est l'essai à vide)

III-4 -2 2^{ème} cas la machine en charge (le couple $C_r = 15 \text{ N.m}$)a) $t = 0.002$ b) $t = 0.004 \text{ s}$ c) $t = 0.01$ d) $t = 0.1 \text{ s}$ *Figure III-13 : distribution des Les flux divers*

on voit le flux dans les différent partie

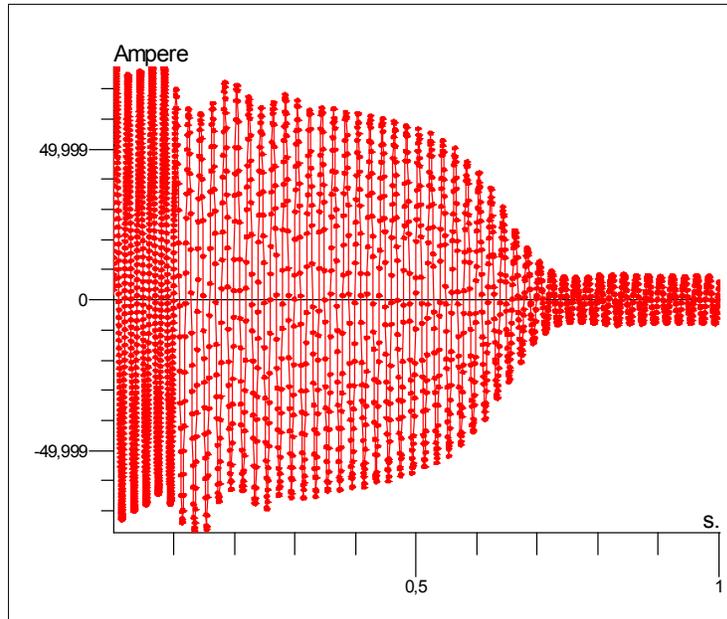


Figure III-14 : Le courant dans le circuit

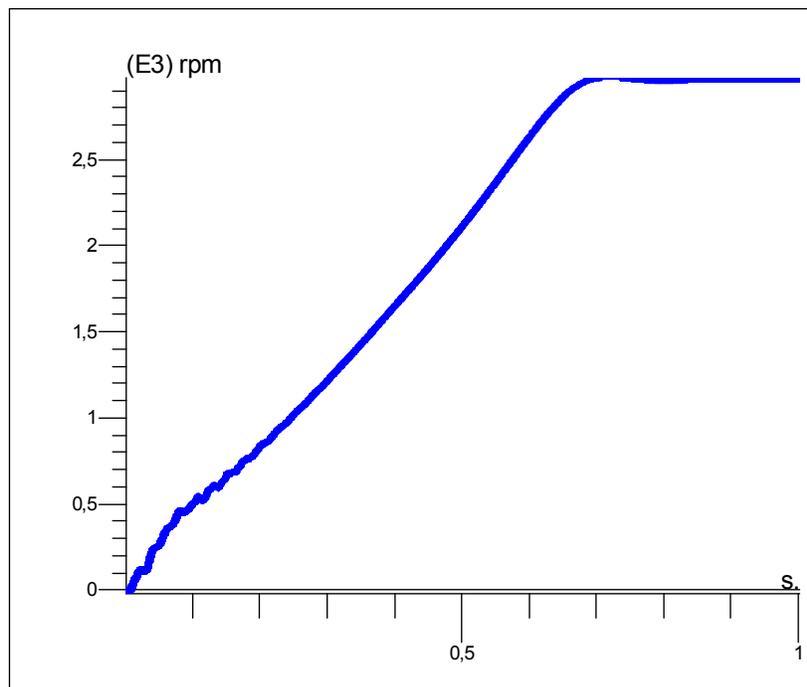


Figure III-15: la vitesse de la machine (2962 tr/min)

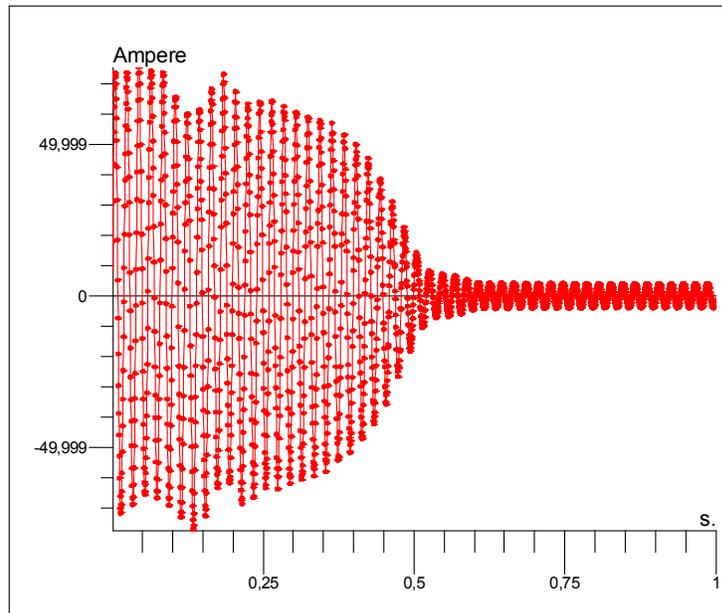


Figure III.16 le courant statoriques de la phase A e n charge

III-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le modèle éléments finis de la machine asynchrone, créé précédemment, sous l'environnement Flux 2D en 2 dimensions (2D). Et nous avons visualisé la répartition des lignes équiflux et l'induction électromagnétique. Egalement nous avons simulé la machine en formulation magnéto-transitoire à vitesse constante, Par la suite, nous avons passé à la simulation en régime transitoire avec l'introduction de l'équation mécanique, où nous avons abordé la simulation des comportements dynamiques de la machine (simulation de fonctionnement à vide et en charge).

A la fin de ce chapitre nous avons effectué l'analyse spectrale d'une grandeur mesurable qui est le courant des phases statoriques en représentant l'influence de la saturation, du pas du calcul de la fluctuation de vitesse rotorique sur le spectre. Cette analyse spectrale sera notre outil pour la détection des défauts dans le chapitre suivant[3].

Chapitre IV: Modélisation et simulation de la MAS triphasée à cage avec défaut de cassure de barres

IV-1 Introduction

Comme il a été déjà mentionné précédemment, selon les enquêtes menées sur les différents modes de défaillance dans les machines à cage d'écureuil, que les défauts liés au rotor contribuent à 20% du total des défaillances, notamment le défaut de la rupture de barre rotoriques. Ce défaut sera donc abordé en détail dans ce chapitre. Cependant, ce pourcentage minimise la part de ce défaut dans l'ensemble des atteintes de la machine car, les défauts de cassure de barres ou ceux des portions d'anneau de court-circuit, sont difficiles à diagnostiquer en raison de l'inaccessibilité au rotor. En outre, ce type de défaut peu ne pas présenter de symptômes pendant son stade primaire jusqu'à propager aux barre voisines conduisant à une panne soudaine. Il apparait donc qu'en détectant le nombre de barres cassées, il est possible d'évaluer l'état de fonctionnement de la machine à induction et d'éviter la situation d'arrêt de se produire. En plus, une détection précise des barres cassées est nécessaire pour prédire avec exactitude les futures performances de la machine asynchrone [9].

Suite à ce qui précède, ce chapitre sera consacré à l'étude du défaut de la rupture de barres rotoriques, le défaut sera simuler en utilisant la méthode des éléments finis pas à pas dans le temps, l'effet d'encochage et de la saturation magnétique des parties ferromagnétiques de la machine seront tenus en compte. Cette étude a pour but de vérifier l'impact de localisation des barres cassées dans le rotor, et l'influence du type de connexion du circuit d'alimentation sur le diagnostic de ce type de défaut. En outre, le défaut de la rupture de barres rotoriques sera combiné avec un déséquilibre de tensions [9].

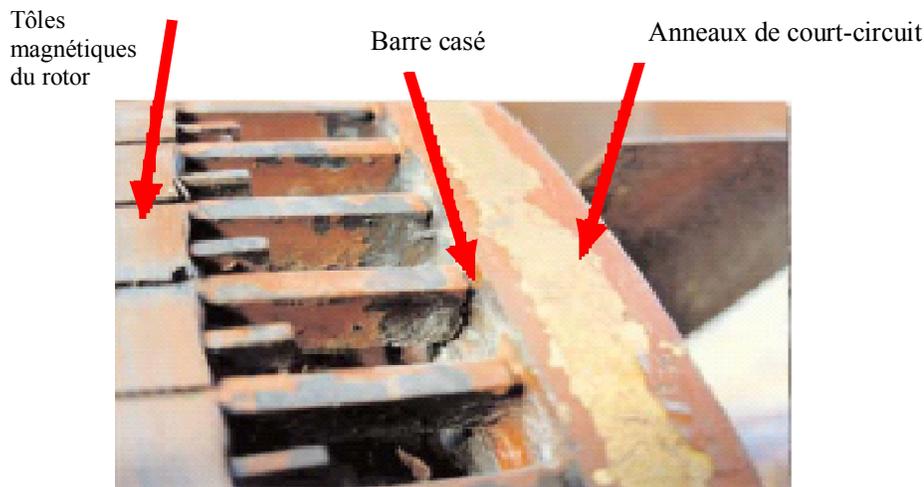


Figure IV.1 : Barre cassé au niveau du rotor

IV-2 Quand une barre rotorique est cassée, que se passe t-il ?

Nous n'avons pas jugé utile ici de mener notre étude sur la détection de barres cassées par la mesure des courants statoriques. En effet, il est bien connu qu'un traitement approprié de ces signaux fait apparaître des composantes dans leurs spectres aux fréquences $f = f_s (1 \pm 2g)$

En effet, lorsqu'une barre est cassée, des harmoniques de flux correspondant sont produits et induisent des harmoniques de courant dans l'enroulement statorique aux fréquences :

$$f = f_s (1 \pm 2k g) \quad (\text{IV-1})$$

Avec: $k = 1, 2, 3, \dots$

Par ailleurs ce défaut a aussi une influence sur les harmoniques de rang faible des courants statoriques :

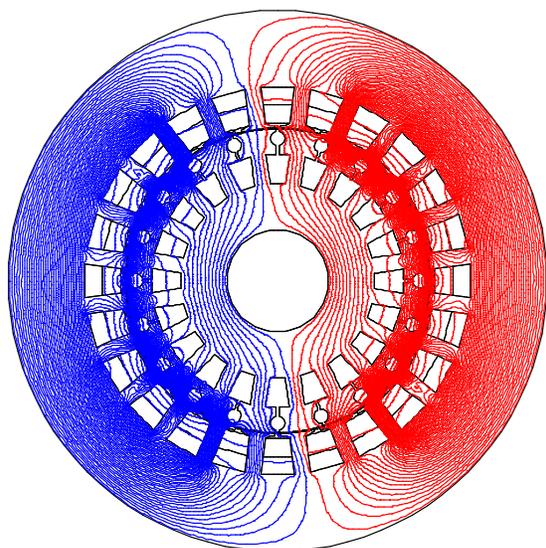
$$f_b = f_s \cdot \left[\frac{n}{p} \cdot (1 - g) \pm g \right] \quad (\text{IV-2})$$

De plus les amplitudes des raies dans ces bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défailtantes .

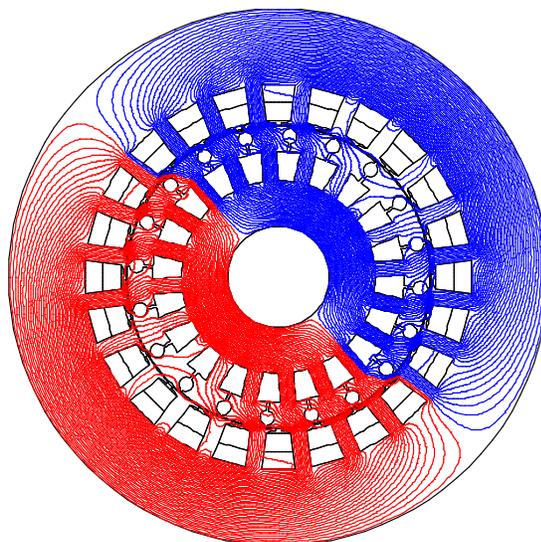
IV.3 Simulation du défaut de cassure de barre rotorique

Pour illustrer la cassure totale de barre dans le modèle élément finis de la machine asynchrone, nous supprimons le conducteur associé à la barre dans le circuit électrique. La surface représentant la barre cassée dans le circuit magnétique est remplie par un matériau amagnétique. Ainsi la barre cassée ne véhicule pas de courant, mais a un effet sur la répartition des lignes de champs.

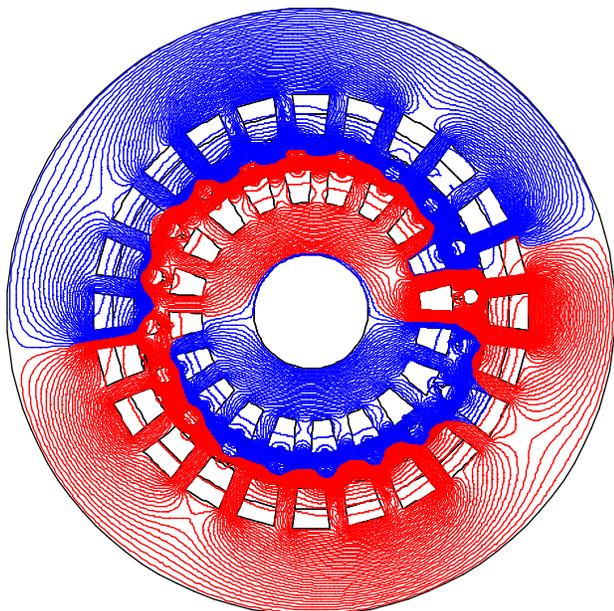
Pour une machine saine, les courants dans les barres rotoriques entraînent une répartition symétrique des lignes de flux, l'absence de courants dans les barres cassées annule leur participation à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres surtout au démarrage de la machine. Par contre lors du passage au régime permanent, les lignes d'équiflux à l'intérieur de la machine représentent moins d'asymétrie pour la machine avec défaut, ce qui n'est pas le cas pour les lignes de flux à l'extérieur de la machine, où elles sont très influées par les barres rompues aux deux régimes transitoire et permanent. Ainsi, on peut remarquer que plus le nombre de barres rompues augmente; plus le déséquilibre de répartition des lignes de flux s'accroît, ce qui entraîne le décalage des axes magnétiques de la machine asynchrone[9].



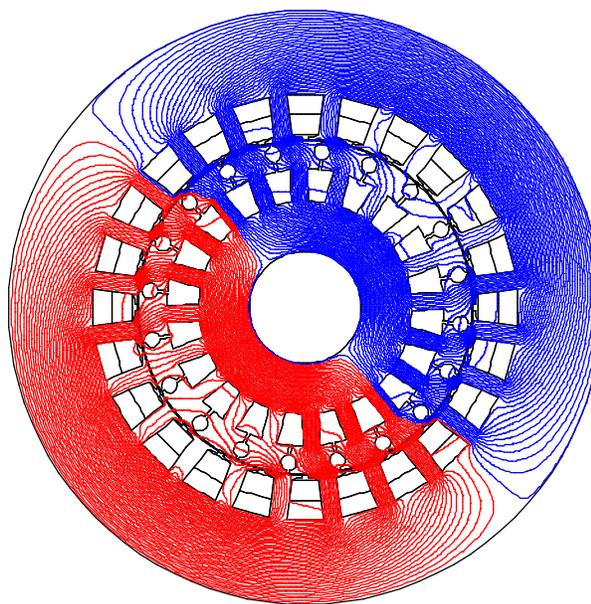
Rotor sain $t= 0.02$ s



Rotor sain $t= 3.2$ s



1 barre cassée $t= 0.02$ s



1 barre cassée sain $t= 3.2$ s

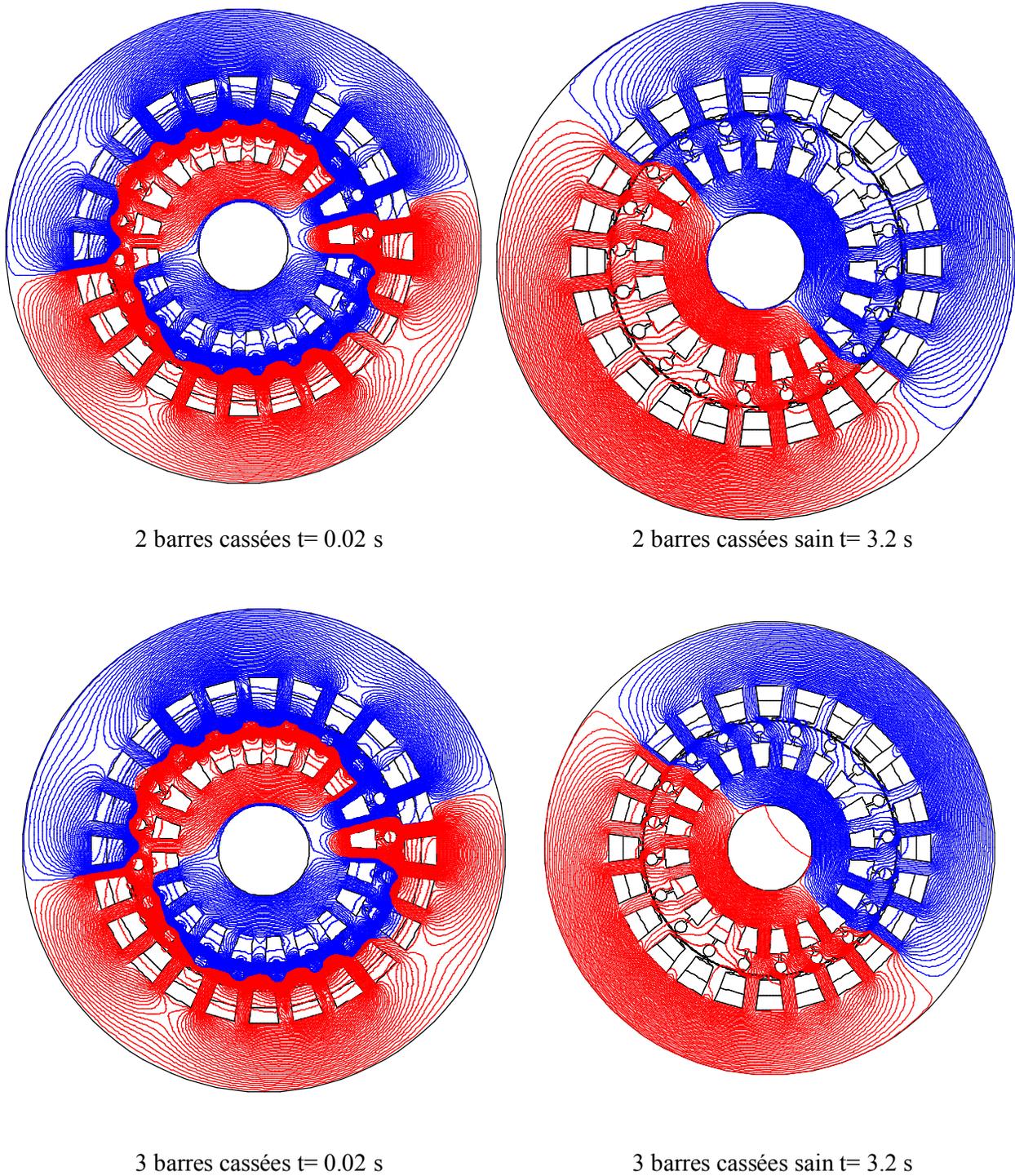
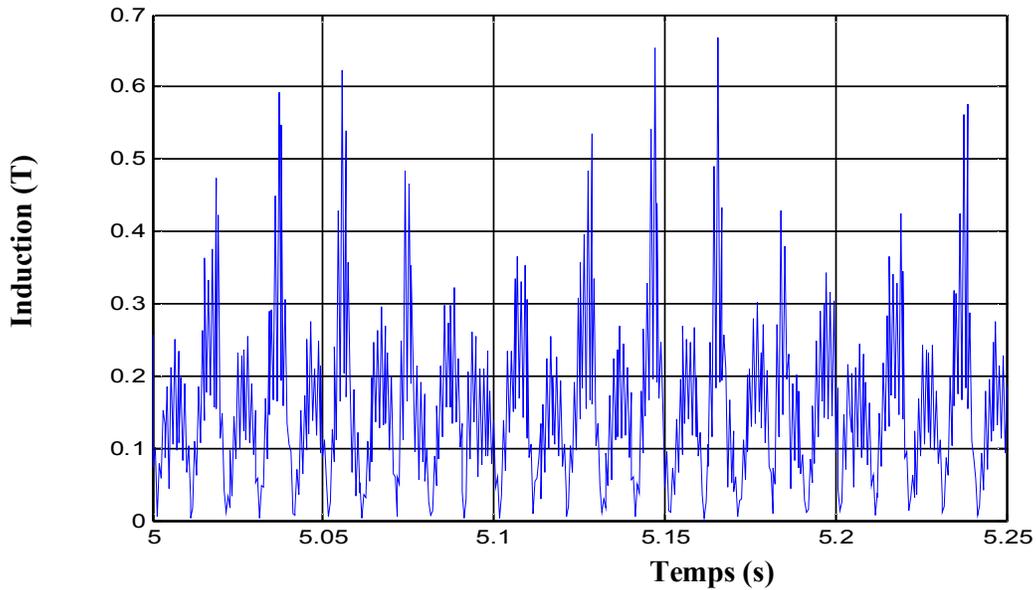
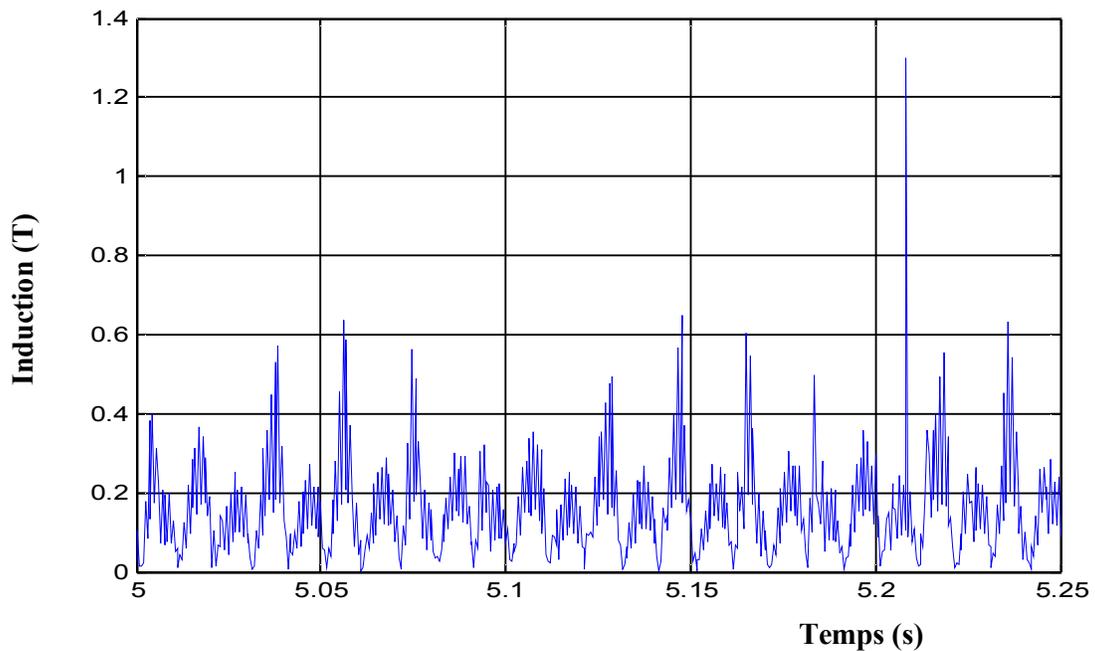


Figure IV.2. Lignes d'équiflux à l'intérieur et à l'extérieur de la machine à l'état sain et la machine avec défaut (en pleine charge).

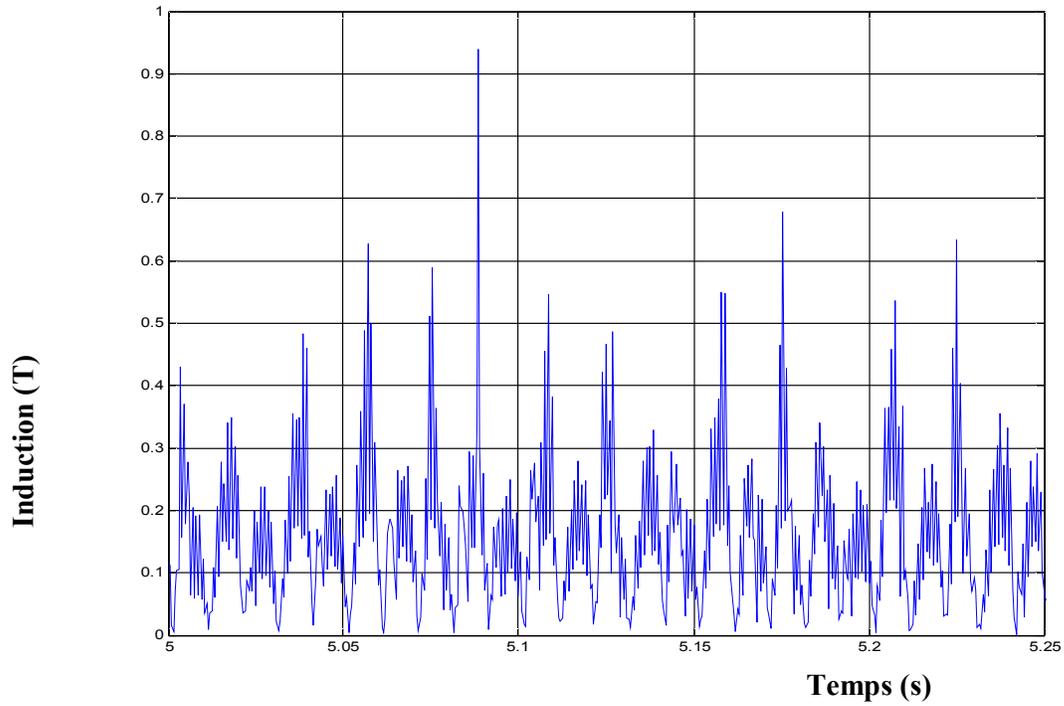
Dans le premier cas, où le rotor est sain, la répartition de l'induction tend à répartir d'une façon symétrique le long de l'entrefer (figure IV.3.a). Lorsqu'une barre est cassée (figure IV.3.b), on constate qu'une dissymétrie apparaît, cette dissymétrie augmente lorsque la machine souffre de trois barres cassées (figure IV.3.c).



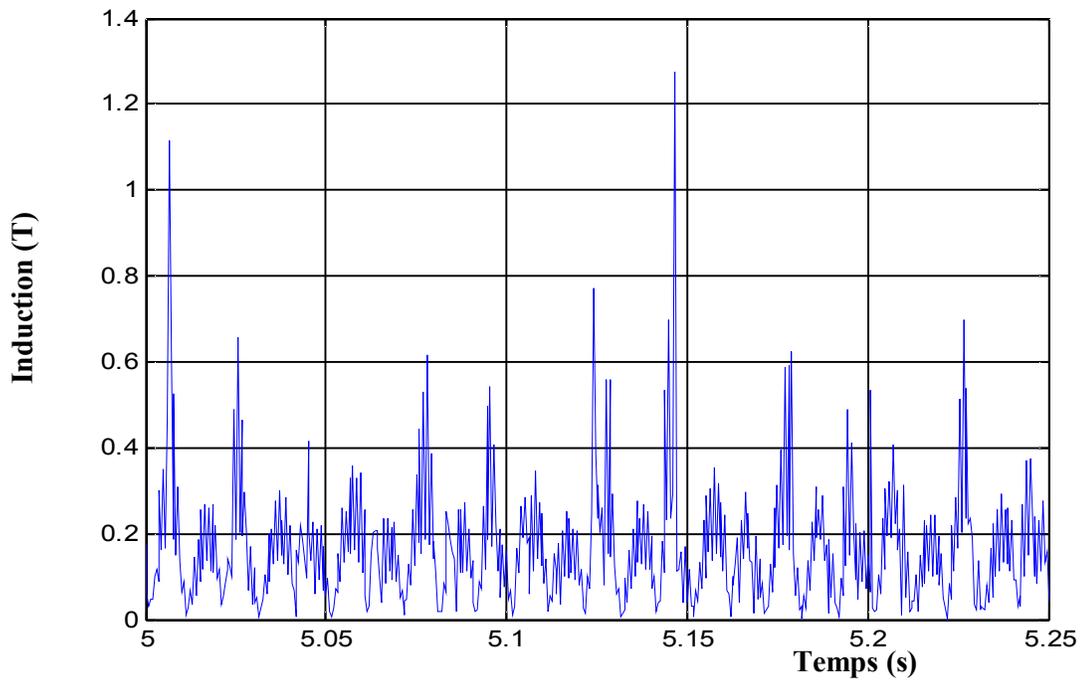
(a) avec rotor sain



b) avec 1 barre cassée



(c) avec 2 barres cassées.



(d) avec 3 barres cassées.

Figure IV.3. Induction magnétique dans l'entrefer pour la machine asynchrone en pleine charge: (a) avec rotor sain; (b) avec 1 barre cassée; (c) avec 3 barres cassées, (d) avec 3 barres cassées.

la vitesse de rotation de la machine asynchrone pour les deux cas de fonctionnement: avec un rotor sain en pleine charge, et un rotor défectueux en pleine charge, on peut observer que le défaut génère des oscillations de vitesse, et on retrouve bien une période correspondant à la fréquence $2 g f_s$. Ainsi, on peut bien remarquer des oscillations dans le couple de la machine avec défaut comme l'illustre la figure IV.5. En outre, on peut constater que les oscillations de la vitesse et du couple sont beaucoup plus influencées par le nombre de barres cassées [9].

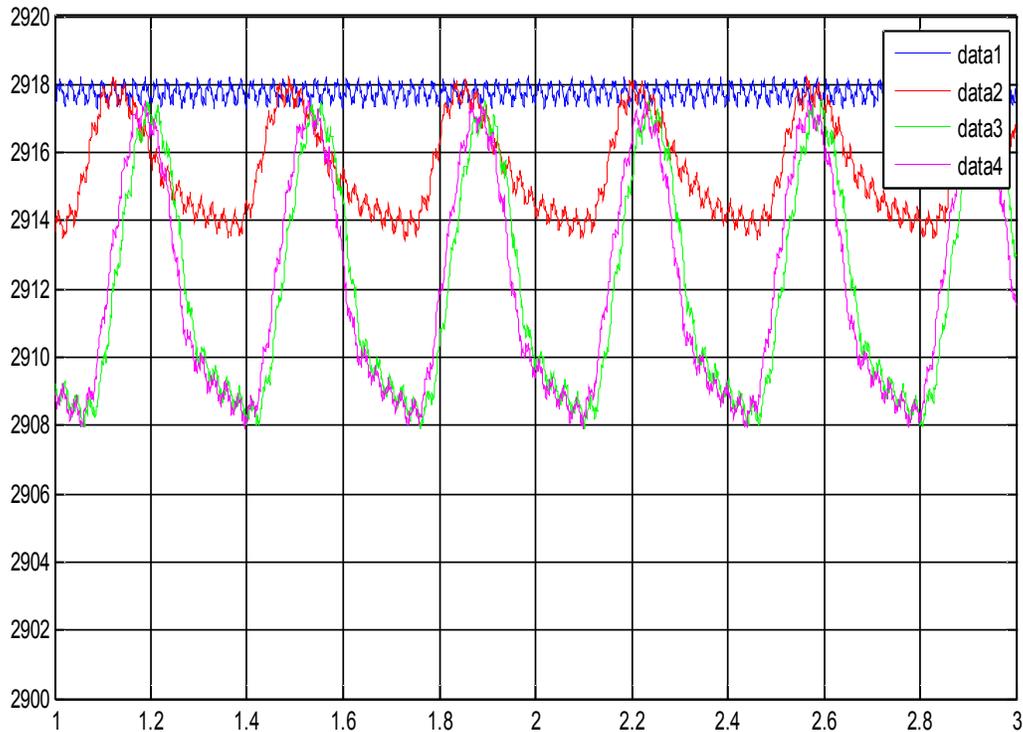
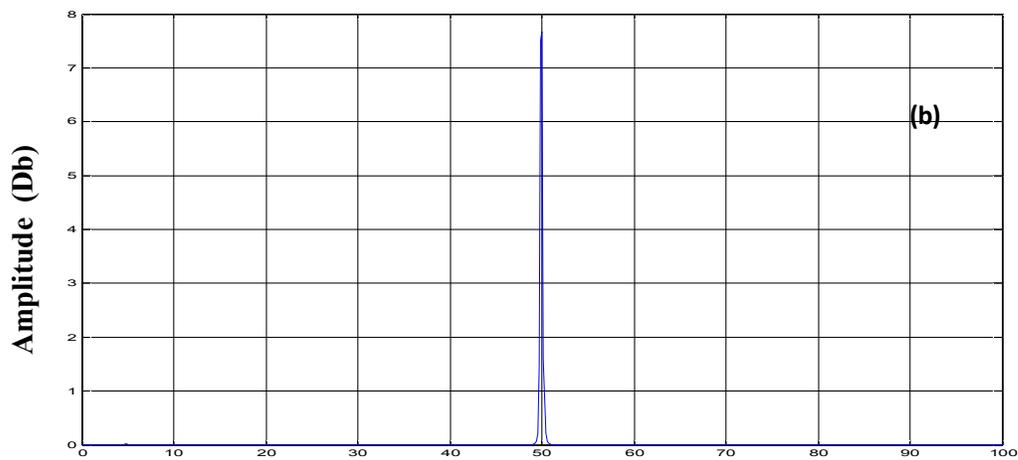
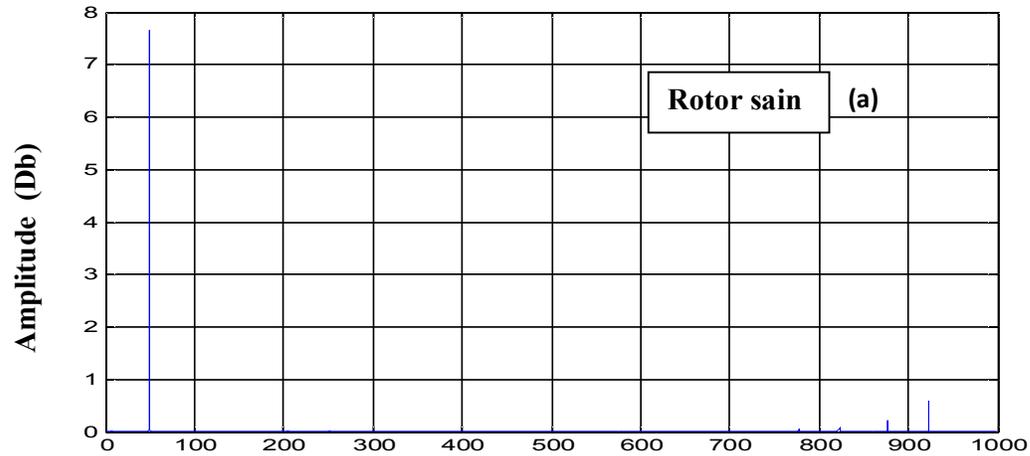
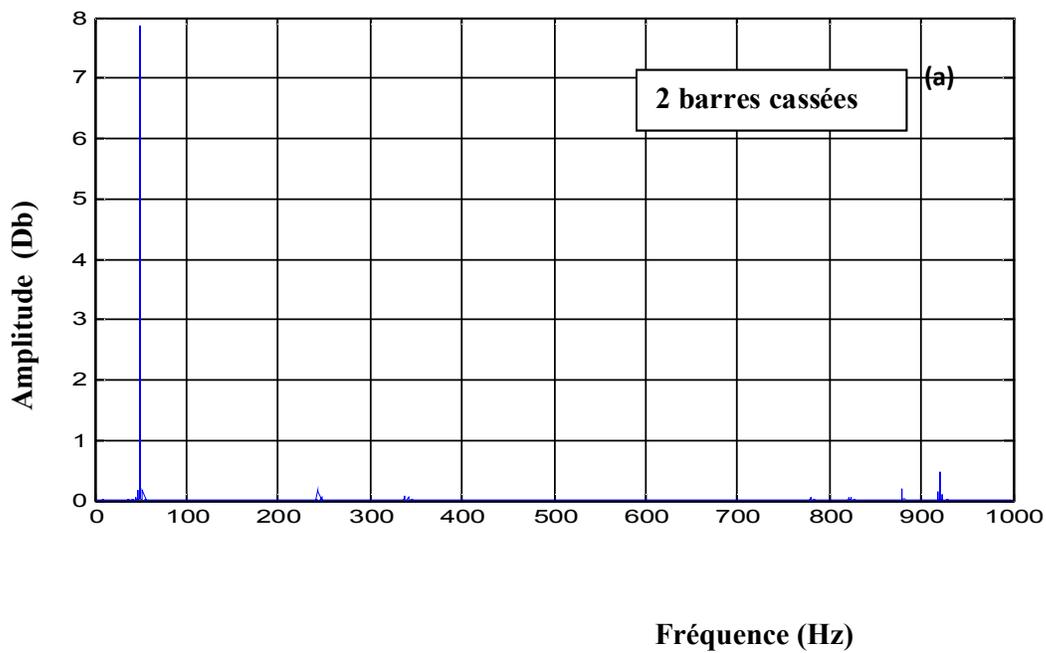
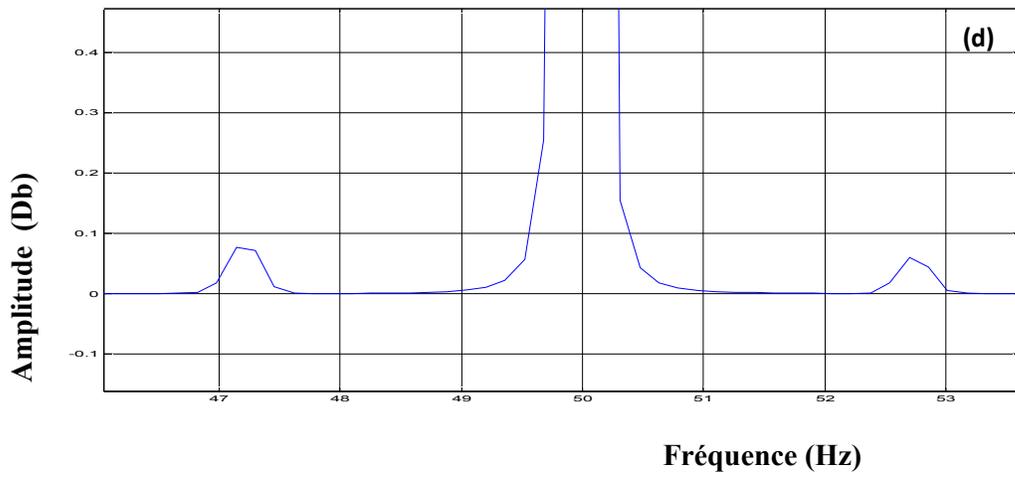
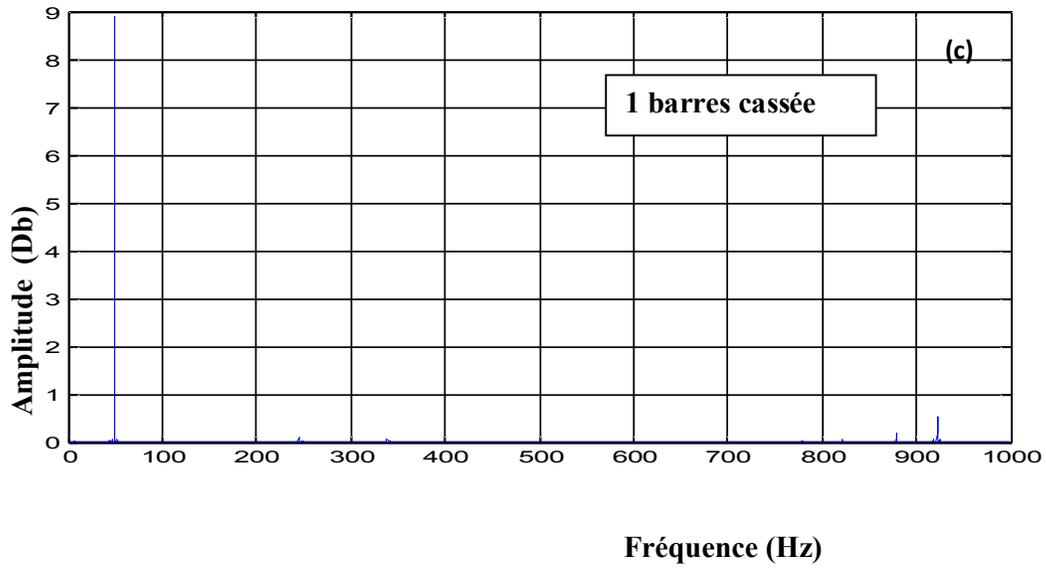


Figure IV.4. Vitesse de rotation pour une machine asynchrone saine et une machine asynchrone avec défaut (en pleine charge).

La figure IV.5 représente les spectres du courant statorique obtenus de la simulation pour un fonctionnement en pleine charge de la machine saine et la machine avec défaut. D'après la figure III.7.a on constate que pour la machine saine aucune composante fréquentielle n'est présente dans le spectre du courant statorique, sauf pour les composantes permanentes: les harmoniques de la saturation et les harmoniques de la fmm.





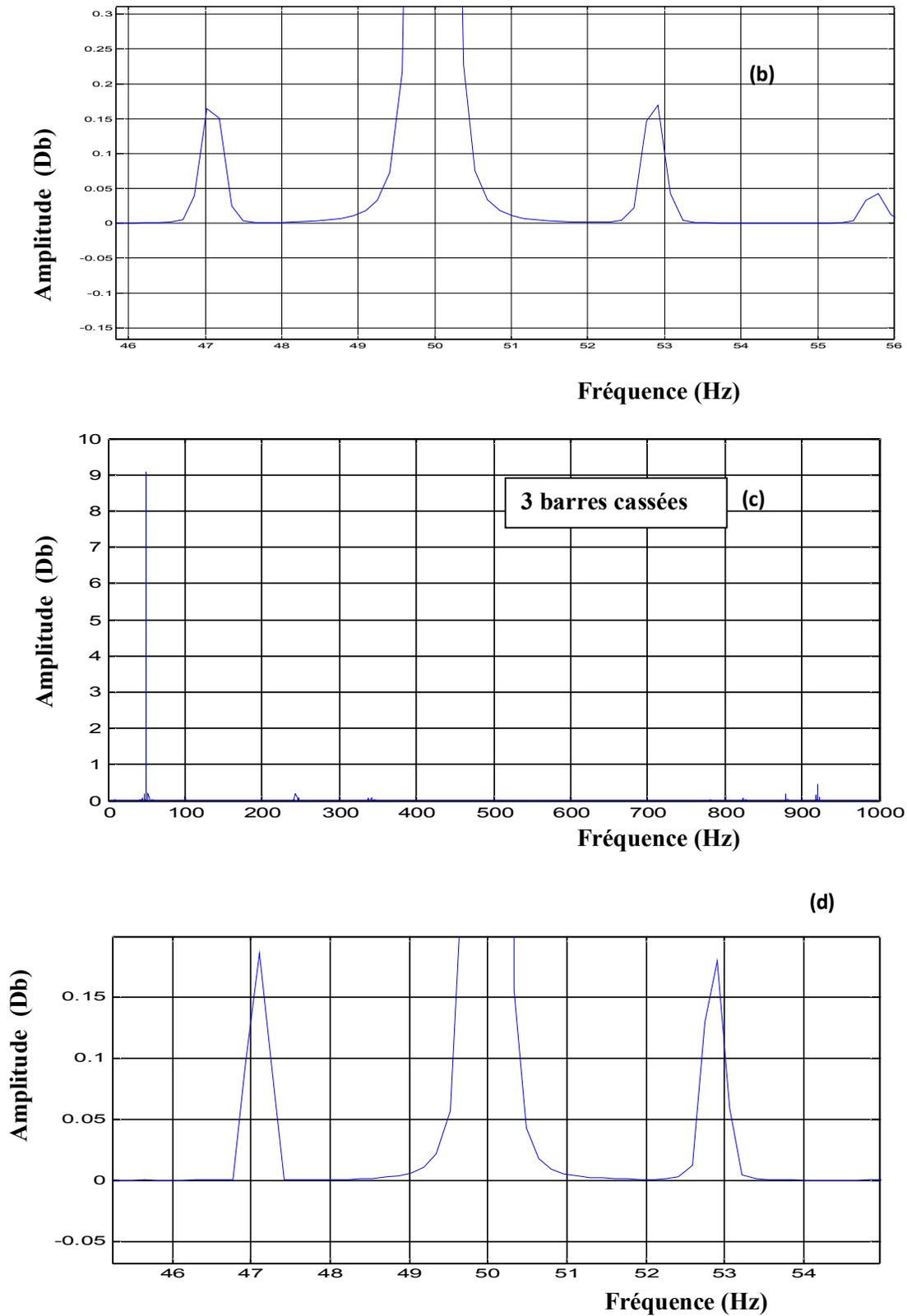


Figure III. 5. Spectre du courant statorique pour la machine asynchrone en pleine charge: (a) avec rotor sain; (b) avec 1 barre cassée; (c) avec 2 barres cassées (d) avec 3 barres cassées (simulation).

IV-4 Conclusion

Dans ce chapitre, Une étude analytique de défaut nous a permis d'analyser et d'expliquer l'influence des cassures de barres sur les performances du moteur. Une analyse spectrale par la transformée de Fourier rapide est appliquée sur les signaux du couple, de la vitesse, du courant statorique et de la puissance instantanée, afin de déterminer la composition fréquentielle de ces signaux et par conséquent de trouver les harmoniques caractérisant les cassures de barres. Des tests de simulation nous ont permis de comparer entres ces techniques. Il s'est avéré que la détection des défauts est plus aisée sur le courant statorique que sur la vitesse ou sur le couple ou sur la puissance instantanée. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement au moteur et en plus, l'harmonique $(1-2g)fs$, de ce courant est plus sensible à la sévérité du défaut que celle de $2gfs$ [10].

Conclusion générale

Les techniques de détection de défauts de la machine asynchrones triphasée à cage d'écureuil sont très bien documentées ainsi que les modélisations de la machine à induction.

Le choix d'un tel modèle reste dépendant de deux facteurs à la fois; la technique qui sera utilisée pour détecter les défauts traversant ce modèle, et les objectifs à atteindre en tenant compte de leurs rentabilités et leurs fiabilités. L'approche analytique, tolérée encore dans certaines applications, s'articule parfois sur des hypothèses simplificatrices ce qui constitue un obstacle ou donne des informations erronées rendant par la même les décisions de diagnostic aléatoires. A l'opposé, la technique d'analyse des signaux intègre la manifestation de tous les harmoniques qui caractérisent la nature du moteur tel que les harmoniques de saturation et les harmoniques de l'effet d'encochage. Avec l'amélioration constante liée à l'avancement de la technologie, et au regard de sa fidélité au comportement électromagnétique de la machine, la méthode des éléments finis bien qu'exigeante en matière de temps et de moyen, semble être unanimement adoptée notamment pour utiliser la technique d'analyse spectrale en vue de détection des différents défauts dans la machine asynchrone triphasée. C'est l'une des raisons qui a motivé l'étude que nous avons menée avec cette méthode.

La modélisation de la machine asynchrone saine par la méthode des éléments finis réalisée dans ce travail est dédiée à la simulation de la machine asynchrone saine et avec défaut. Malgré que cette modélisation soit très onéreuse en temps de calcul, elle montre une grande fidélité au comportement de la machine.

L'étude par éléments finis a permis de mettre en évidence les variations de vitesse dues aux fluctuations de couple d'une machine défectueuse avec des ruptures de barres rotoriques, et de déterminer les répartitions des lignes d'équiflux dans le circuit magnétique de la machine asynchrone. L'analyse spectrale du courant statorique a été focalisée sur la gamme des très basses fréquences, les composantes traditionnelles $(1 \pm 2g)f_s$ autour du fondamental

Ce travail de thèse reste perfectible et nous offre des voies à explorer constituant les principales perspectives de recherche dans ce domaine. Un intérêt particulier sera accordé à l'étude détaillée des défauts mixtes. Il sera nécessaire d'envisager l'effet du type de connexion du circuit statorique sur le contenu spectral du courant statorique. Ainsi, lors de la détection de défaut, il sera utile d'évaluer l'effet du déséquilibre de tension et son impact sur le fonctionnement de la machine. Enfin, des tests supplémentaires seront menés pour vérifier expérimentalement l'efficacité de la technique d'analyse de l'induction magnétique pour diagnostiquer les différents défauts dans la machine asynchrone triphasée à cage .

Bibliographie

- [1] Mouad Oubidar, Sedik Bendaoud, Machine synchrone/asynchrone, université de Québec, avril 2010
- [2] Gaëtan DIDIER, Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances ; thèse doctorat, Université Henri Poincaré octobre 2004
- [3] KHELIF Samia, Modélisation Des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic Prise en Compte Adéquate du Circuit Magnétique, thèse magister, 2012
- [4] Roland CASIMIR, diagnostic des defauts des machines asynchrone sépare connaissance des formes, thèse doctorat, 2003
- [5] Sadok BAZINE, Conception et implémentation d'un Meta-modèle de machines asynchrones en défaut, thèse doctorat, 2009
- [6] A. Zorig, «Identification des Machines Asynchrones en Vue de leur Diagnostic », mémoire de magister, Université de Sétif 2010.
- [7] M. Bouray Islam, Réalisation de cas de démo Flux accessibles depuis le superviseur, thèse master2, 2014
- [8] CEDRAT, flux 2D application, INDUCTION MOTOR TECHNICAL PAPER, guide ; 2006
- [9] HALEM Noura, Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis, thèse doctorat, U. de Biskra 2015
- [10] S. E. ZOOUZOU, M. SAHRAOUI, Méthodes Dédiées à la Détection des Cassures de Barres dans les Moteurs Asynchrones Triphasés à Cage, JTEA'2004, Tunisie
- [11] A. Ibrahim, "Contribution au Diagnostic de Machines Electromécaniques: Exploitation des Signaux Electriques et de la Vitesse Instantanée", Thèse de Doctorat, Université de Saint Etienne, France, 2009.
- [12] A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [13] Allianz, "Présentation des Avaries. Machines Electriques Tournantes", Cahier des préventions, CP2, 1988.
- [14] M. Khoy, "Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents: Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [15] M. Sahraoui, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [16] B. Vaseghi, "Contribution à l'Etude des Machines Electriques en Présence de Défaut Entre-Spires Modélisation-Réduction du Courant de Défaut", Thèse de Doctorat, Université de Nancy, France, 2009.