

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Sadouki Hocine

&

Boukhatem Sid Ahmed

pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique spécialité Machines
électriques

Thème

Modélisation des défauts statoriques à cage d'un moteur asynchrone par la méthode des éléments finis

Proposé par:

Promoteur : Mr .hachelaf Redouane

Année Universitaire 2016-2017

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chères parents, pour leurs soutient moral et financier et d'être la lumière de ma vie, qui m'ont toujours encouragé pour terminer mes études, en leur espérant une longue vie et que dieu les gardes.

- ❖ *A mon cher frère Imad .*
- ❖ *A mes sœurs.*
- ❖ *A mes tantes et mes oncles.*
- ❖ *A toute la famille **Sadouki** de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de mon quartier.*
- ❖ *A tous mes amis de près ou de loin sans exception.*
- ❖ *A mes chers amis de l'université.*

Sadouki hocine

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

3.1. Introduction

Les résultats des simulations et les interprétations appropriés vont être présentés dans ce troisième chapitre du mémoire, ce qui représente le fruit de nos simulations sur la machine asynchrone à savoir la simulation magnétodynamique qui contient principalement des facteurs globaux dans les deux régimes étudiés ainsi que la simulation graphique.

3.2. Application et simulation de la MAS

On obtient une machine asynchrone à partir de rembobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Stator	Nombre de phases	3	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	120	Mm
	Diamètre externe	212	Mm
Rotor	Diamètre externe	119	Mm
	Diamètre interne	40	Mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.5	Mm
	Nombre de barres	32	

Tableau 3.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

3.2.1. Description de la géométrie

Le domaine de la machine étudiée est réduit par l'utilisation des symétries existantes et la définition d'une limite à l'infini. Ensuite, le système réduit est décrit par des régions surfaciques délimitées par des lignes s'appuyant sur des points définis par l'utilisateur.

Une région particulière est la bande de roulement Située dans l'entrefer de la machine, elle permet de modifier la position angulaire du rotor par rapport au stator pendant la résolution en évitant tout remaillage par l'utilisateur; elle seule est remaillée automatiquement à chaque nouvelle position angulaire. Son utilisation permet une diminution significative du

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

coût de calcul des simulations des régimes transitoires, à vitesse de rotation non nulle, décrits par la formulation magnétoévolutive.

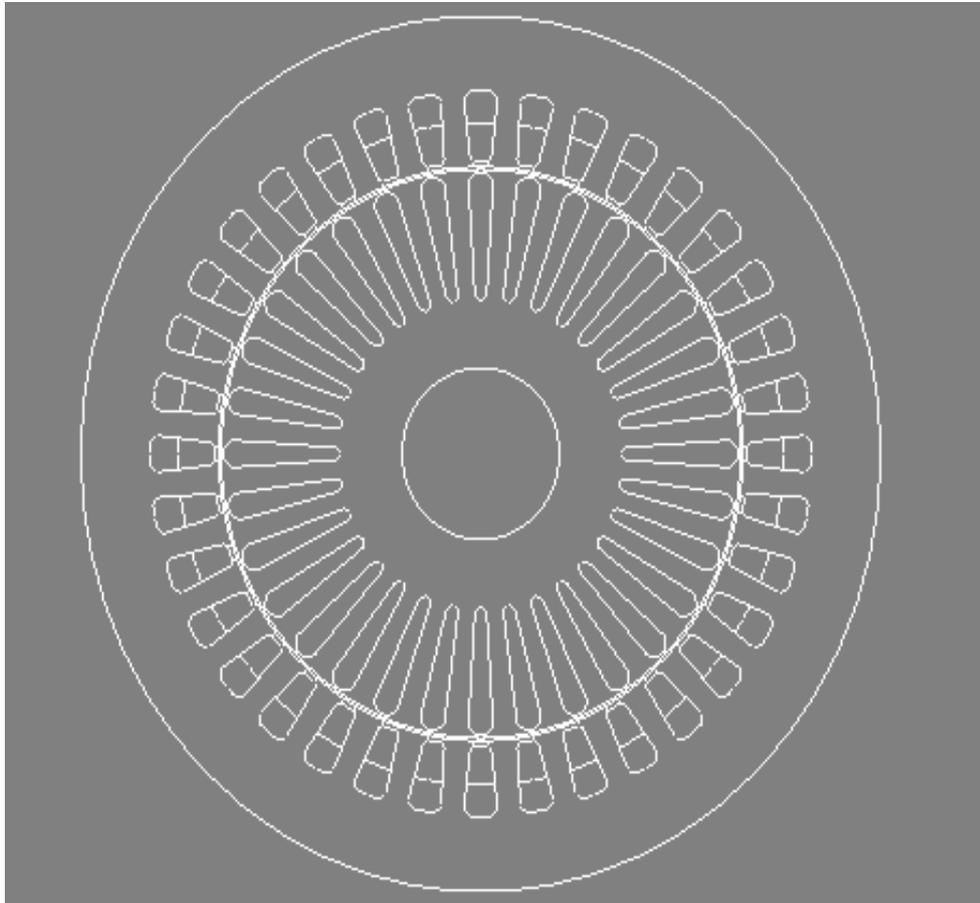


Figure 3.1 : La géométrie de la machine asynchrone

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la (figure 2.5)

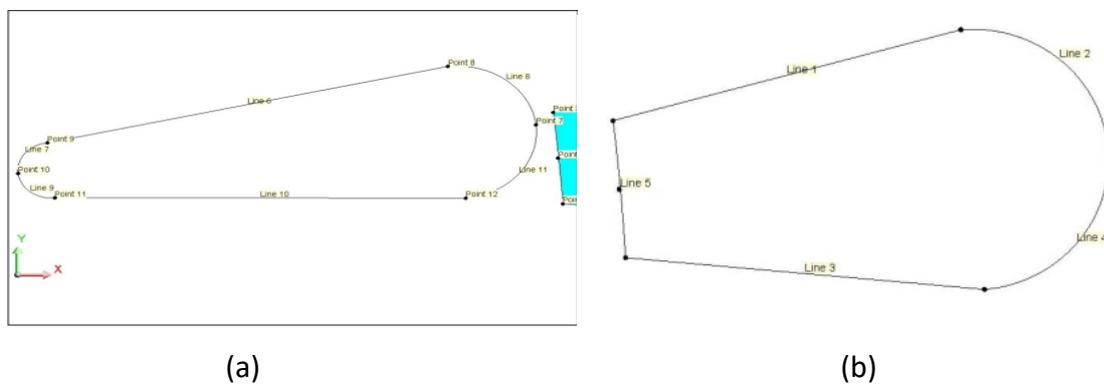


Figure 3.2 : Dimension des encoches, **a)** l'encoche statorique, **b)** l'encoche rotorique

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

La (figure3.6) définir le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine.

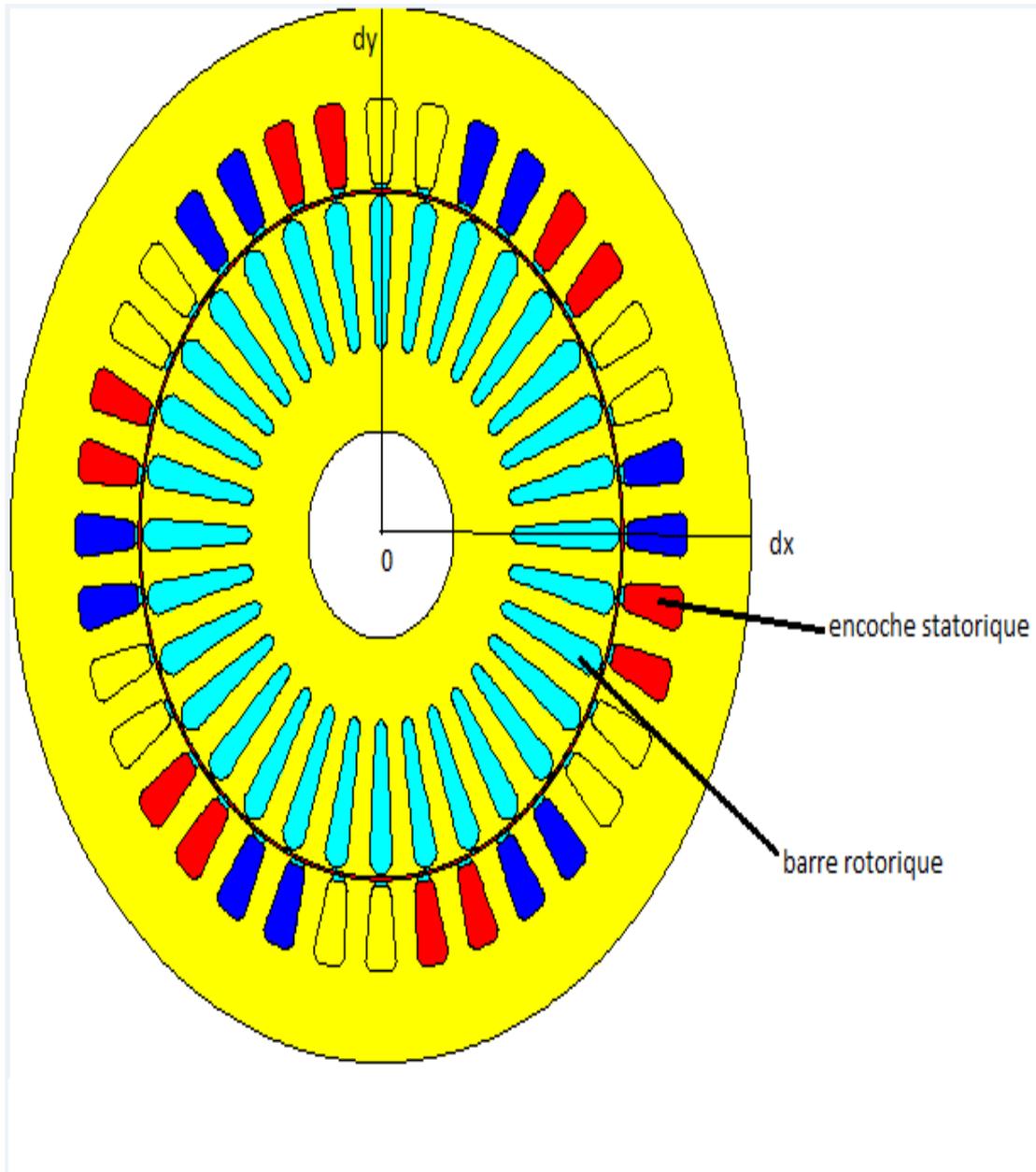


Figure 3.3 : Affectation des régions superficielles

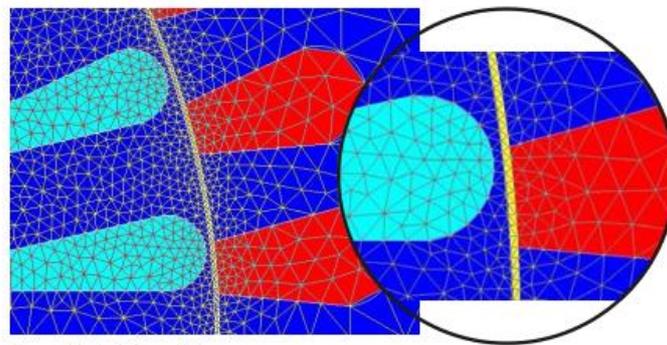
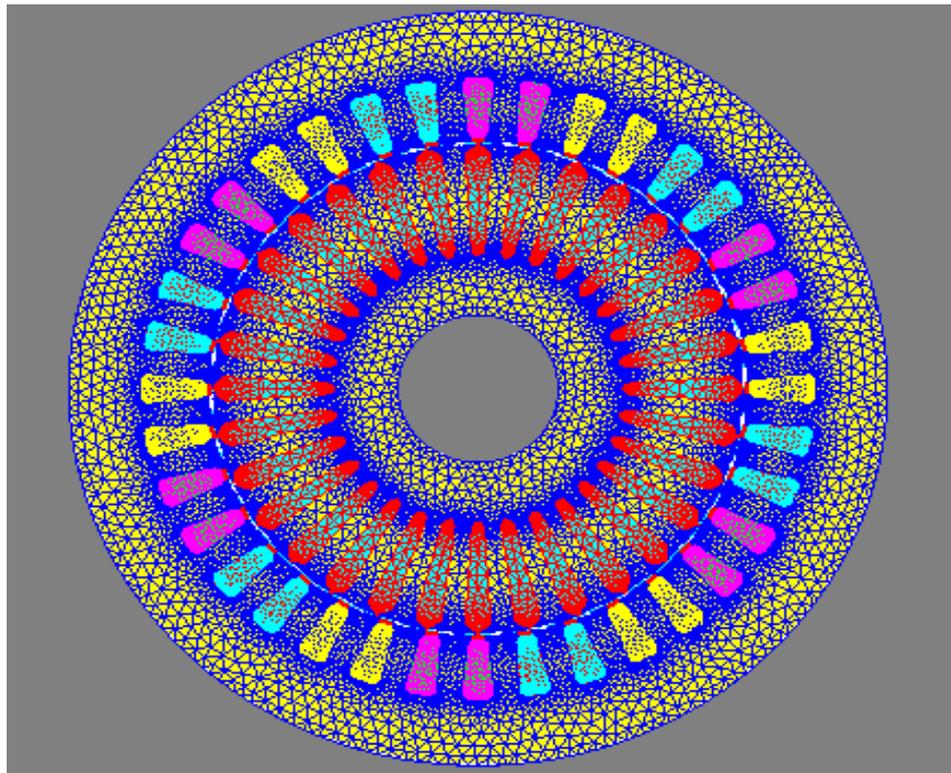


Figure 3.4 : Répartition du maillage.

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

3.2.2. Matériaux conducteurs

Pour les conducteurs statoriques, on supposera qu'ils se répartissent de façon uniforme dans les encoches, on affectera à cette région la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements, le foisonnement et le nombre de spires par encoche. Au niveau de rotor, nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe [36].

Chapitre 3 : Résultats des simulations de la machine asynchrone

3.2.3. Matériaux magnétiques

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau 2.2)

Point number	H (A/m)	B (Tesla)
1	0.00	0.00
2	129.50	0.50
3	243.25	1.10
4	1850.00	1.60
5	3700.00	1.70
6	9900.00	1.85
7	22100.00	2.00
8	43000.00	2.10

Tableau 3.2 :B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [42assim]

La courbe B(H) du circuit magnétique est représentées ci-dessous.

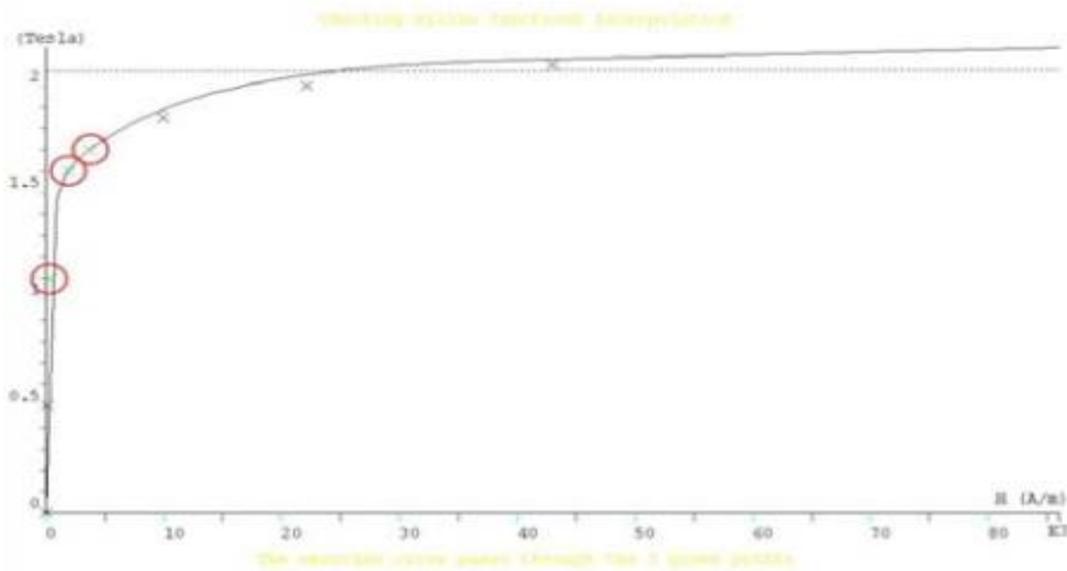


Figure 3.5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN

3.2.4. Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court circuit).

Le circuit électrique, (Figure 2.9) , représentant : les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3), Les bobinages statoriques (B1, B2, B3, B4, B5.....B36), les Inductances , (L1 ,L2, L3), les résistances(RA1, RA1, RA1).

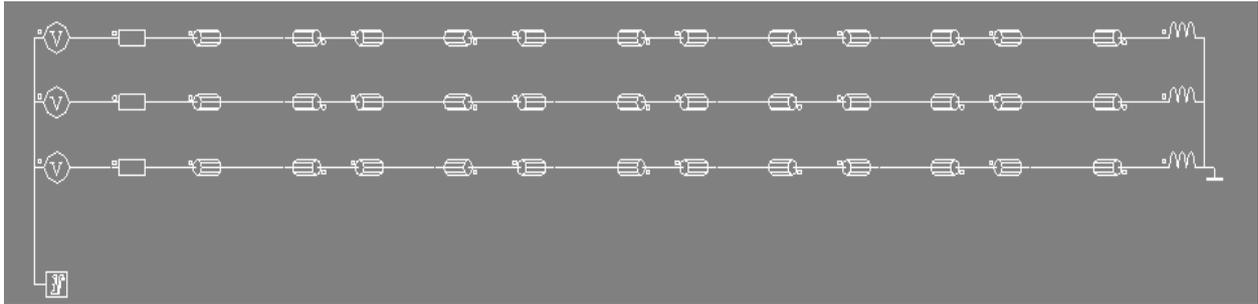


Figure 3.6 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écurie de la machine, c'est un circuit fermé contenant des barres rotoriques.

3.3. Résultats de simulation par la magnétodynamique

3.3.1. Caractéristique de simulation en magnétodynamique

Dans ce mode de fonctionnement, il faut déterminer les valeurs de la fréquence d'alimentation et du glissement. On utilisera le couplage avec les équations de circuit qui permettent de simuler les courts-circuits de la cage.

On rappelle les avantages et les inconvénients de la magnétodynamique [29] :

a) Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive
- la prise en compte des courants induits.

b) Inconvénients :

- utilisation possible uniquement pour le régime permanent.
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.
- Le mouvement du rotor n'est pas «physiquement» pris en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte.

Les simulations magnéto-harmoniques de Flux2D® de la machine asynchrone double étoile sont effectuées pour des valeurs constantes de glissement (valeurs constantes de vitesse rotoriques).

Les résultats des simulations magnétodynamiques dépendent de la position relative de

rotor-stator, prise en compte par la simulation, « la position initiale du rotor ». Ainsi nous avons déterminé la position relative de rotor-stator pour laquelle le couple électromagnétique est égal à la valeur moyenne. "La position initiale" du rotor représente des données d'entrée pour le processeur de SOLVER_2D de Flux2D®.

3.4. Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure 3.7) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure 3.2)

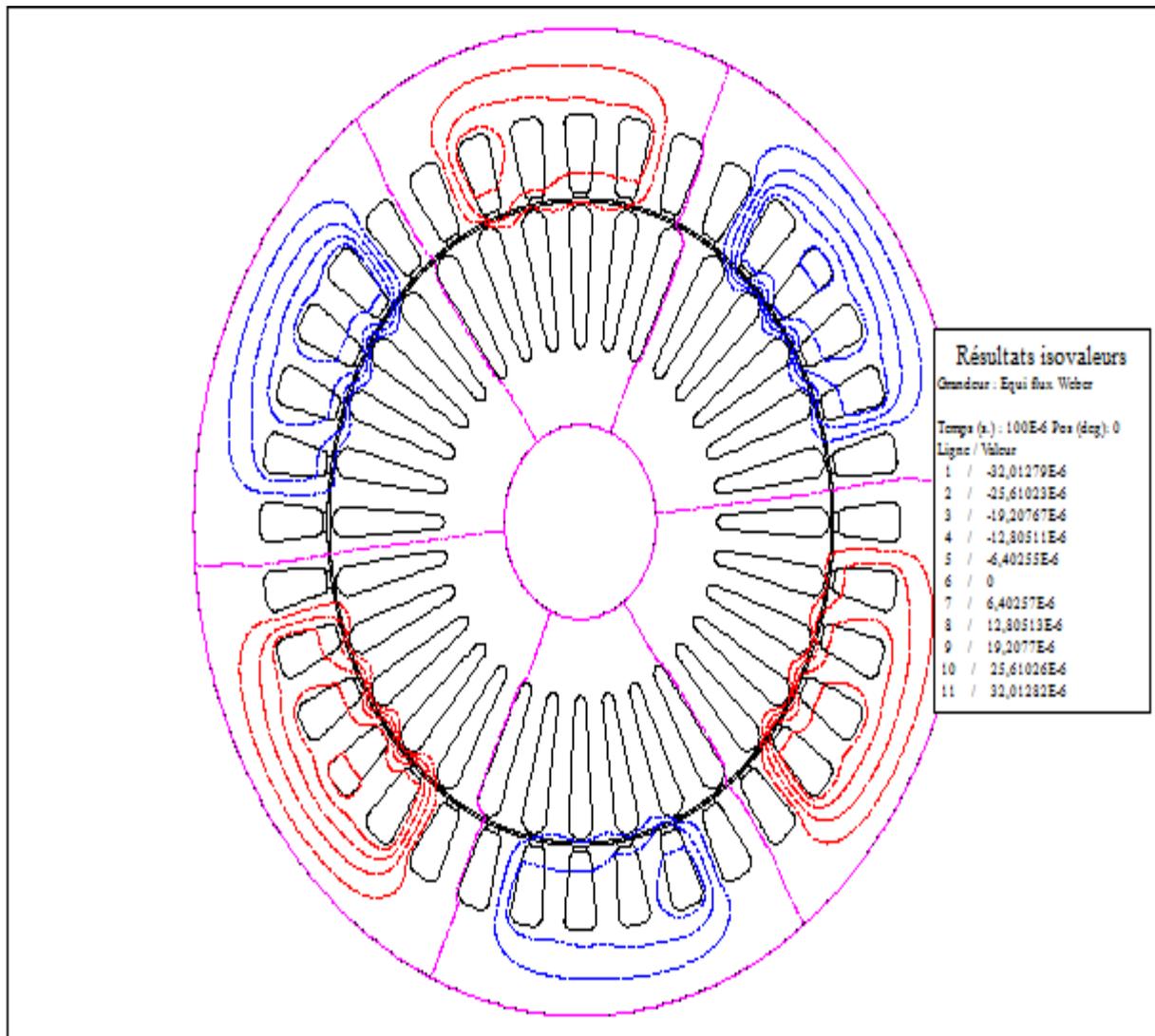


Figure 3.7 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal

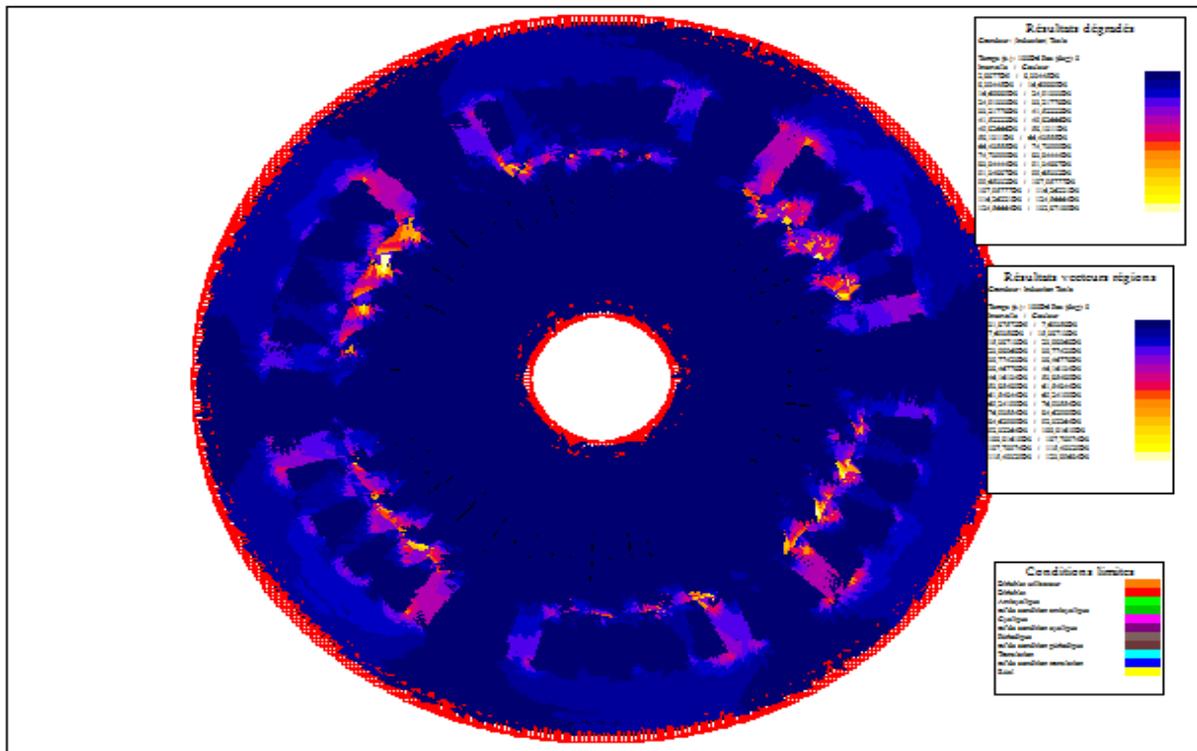


Figure 3.8 : Induction magnétique pour le fonctionnement nominal

Nous remarquons bien la présence d'une paire de pôles. La distribution des lignes est quasi-symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes du champ entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est, elle aussi, quasi-symétrique.

3.5. Simulations des comportements de la MAS

3.5.1. Fonctionnement sain de la Machine asynchrone

Nous avons présenté l'évolution des grandeurs locales (les lignes du champ magnétique, l'induction magnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse). Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine saine, ont donné les résultats suivants

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

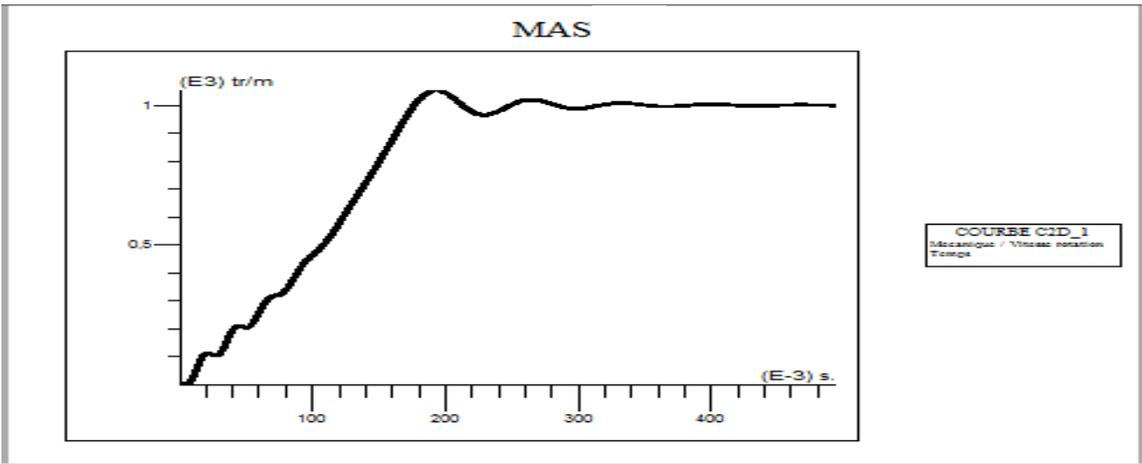


Figure 3.9 : Vitesse de rotation

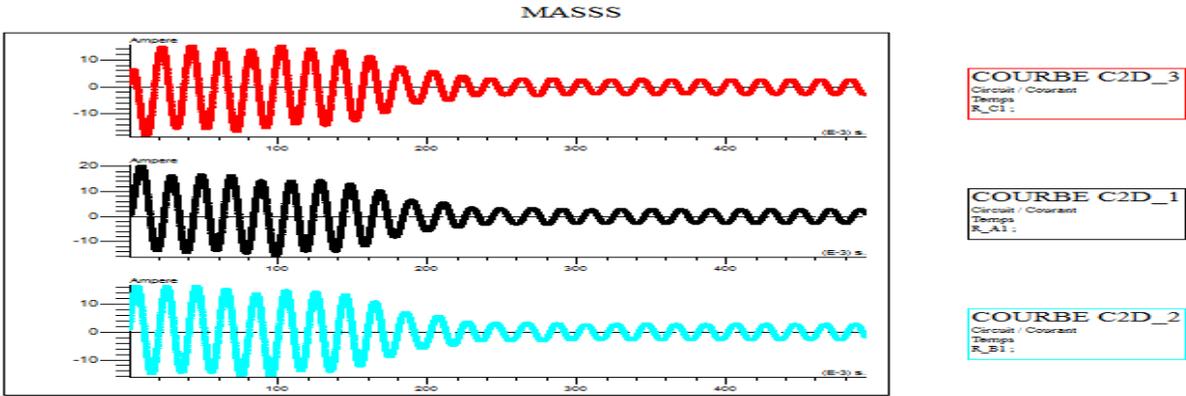


Figure 3.10: Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1

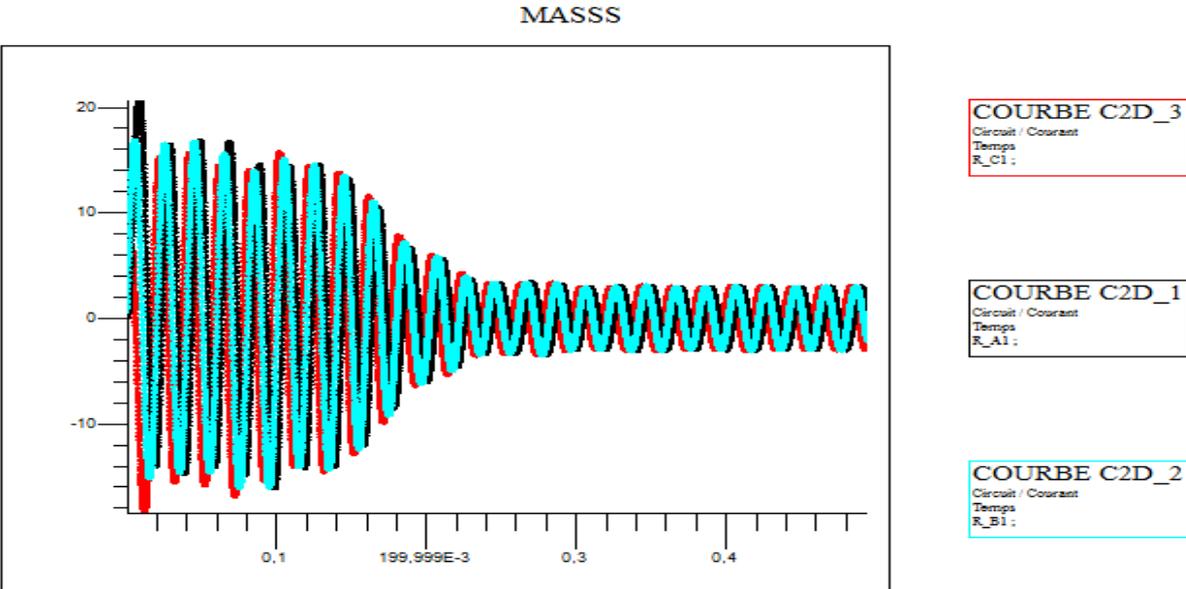


Figure 3.11 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1

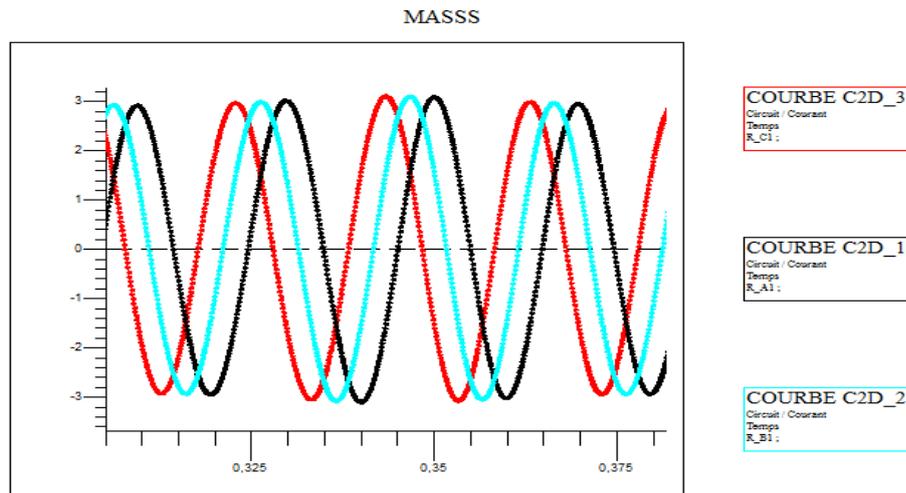


Figure 3.12: Zoom des Courants statoriques superposés au niveau des résistances ; R-A1, R-B1, R-C1

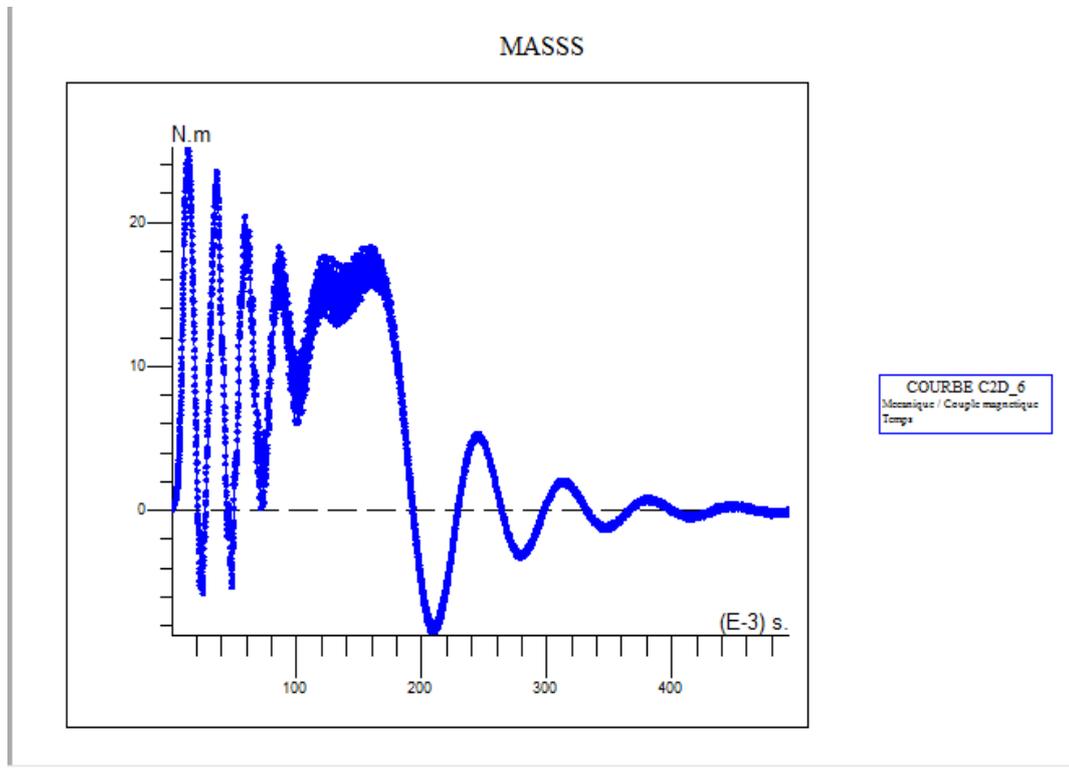


Figure 3.13 : Couple électromagnétique

3.5.1.1. Interprétation

Les figures représentent les résultats de simulation de la machine asynchrone à vide

Au régime transitoire le couple atteint 25 Nm puis il commence à descendre pour atteindre une valeur nul puisqu'il n'y a pas de charge.

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

On remarque un fort appel de courant au démarrage, il atteint des valeurs qui arrivent jusqu'à 6 fois sa valeur nominale.

La vitesse atteint, la vitesse du synchronisme (999 rad/s) après le régime transitoire qui dure environs 0,3s

3.5.2. Fonctionnement en présence de défaut (Court –circuit)

Dans le cas de la présence de défauts dans la machine asynchrone

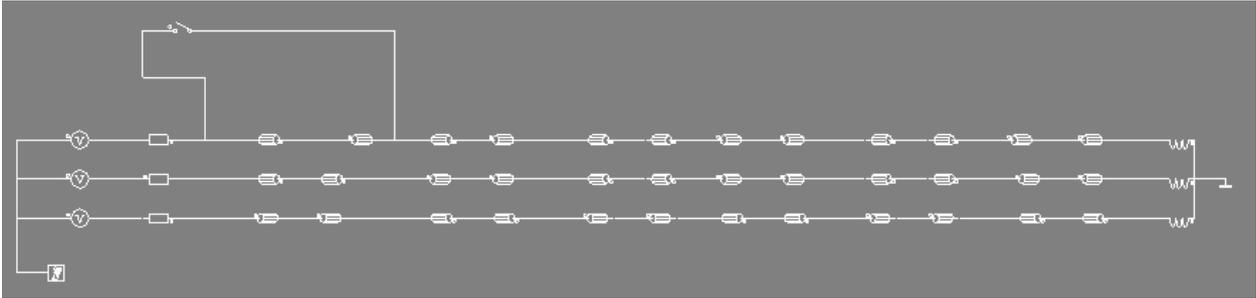


Figure 3.14 : Circuit équivalent en présence de défaut

on a obtenu les résultats suivants.

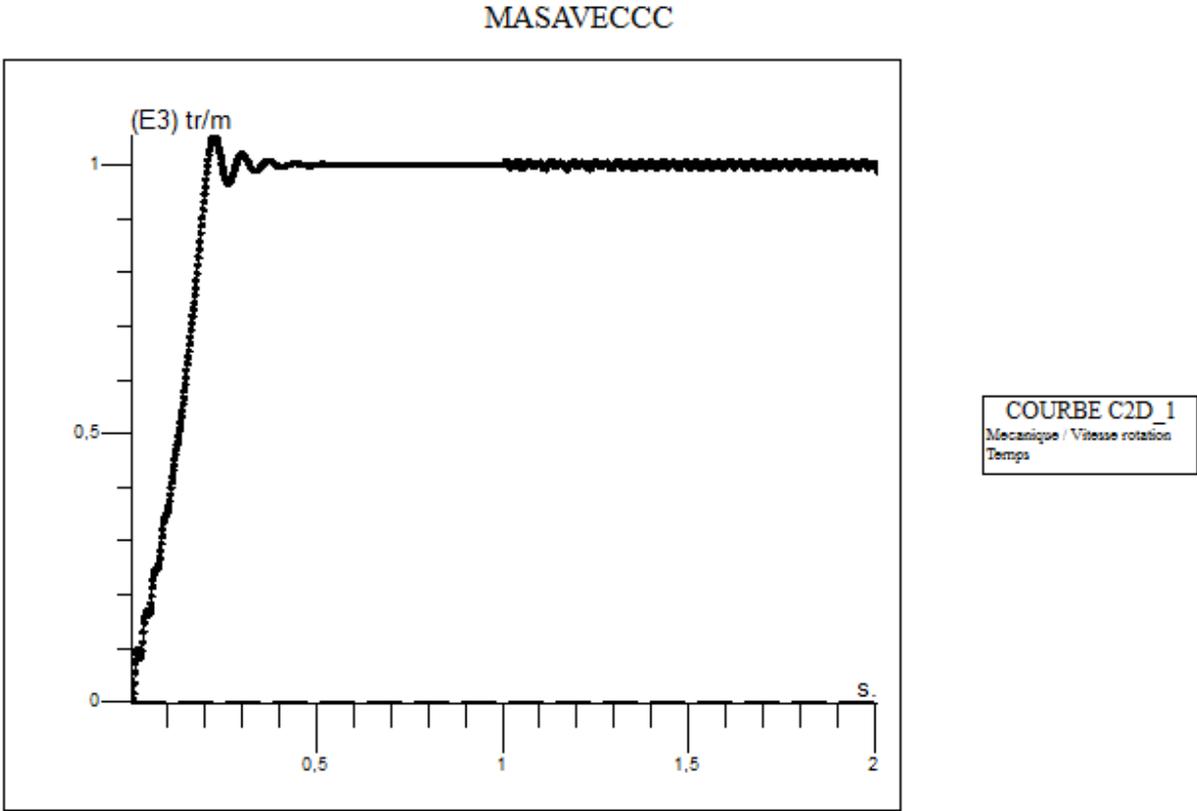


figure 3.15 : la vitesse de rotation en cas de défaut

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

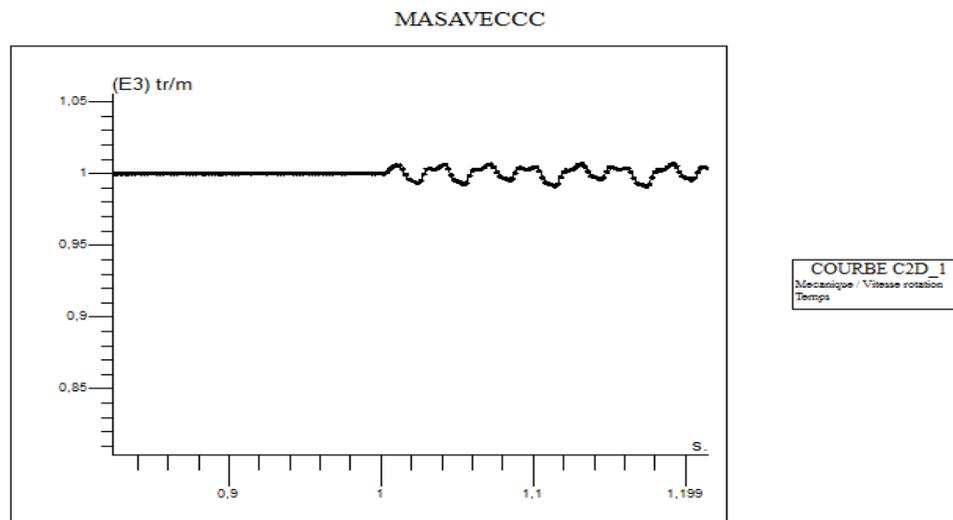


figure 3.16 : zoom de la vitesse de rotation en cas de défaut

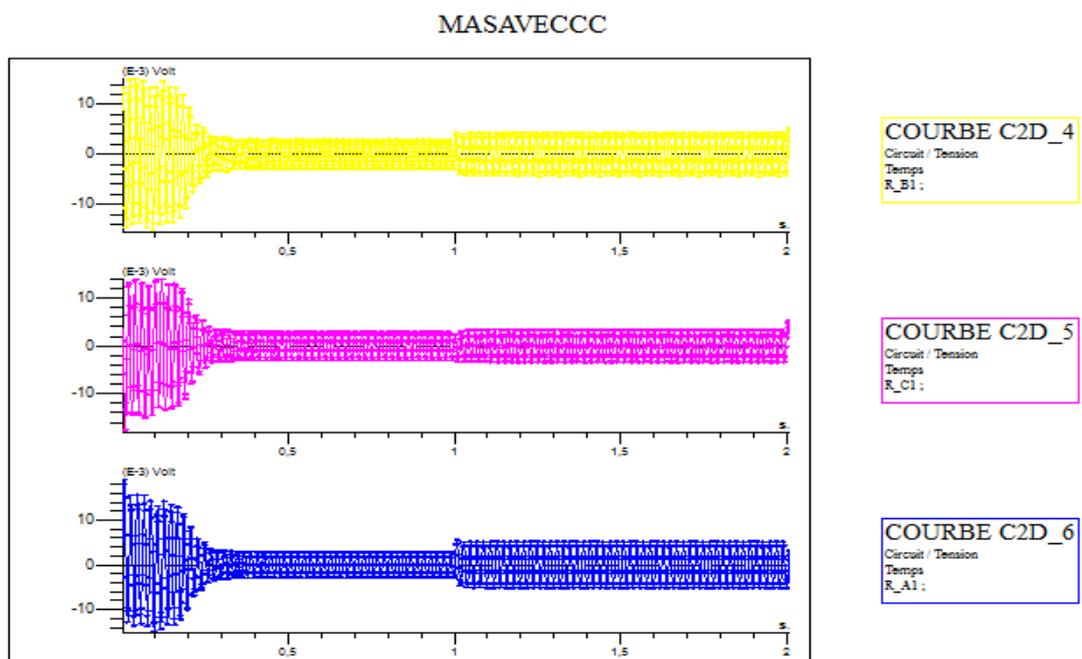


Figure 3.17 : Les Courants statoriques juxtaposé en cas de défaut

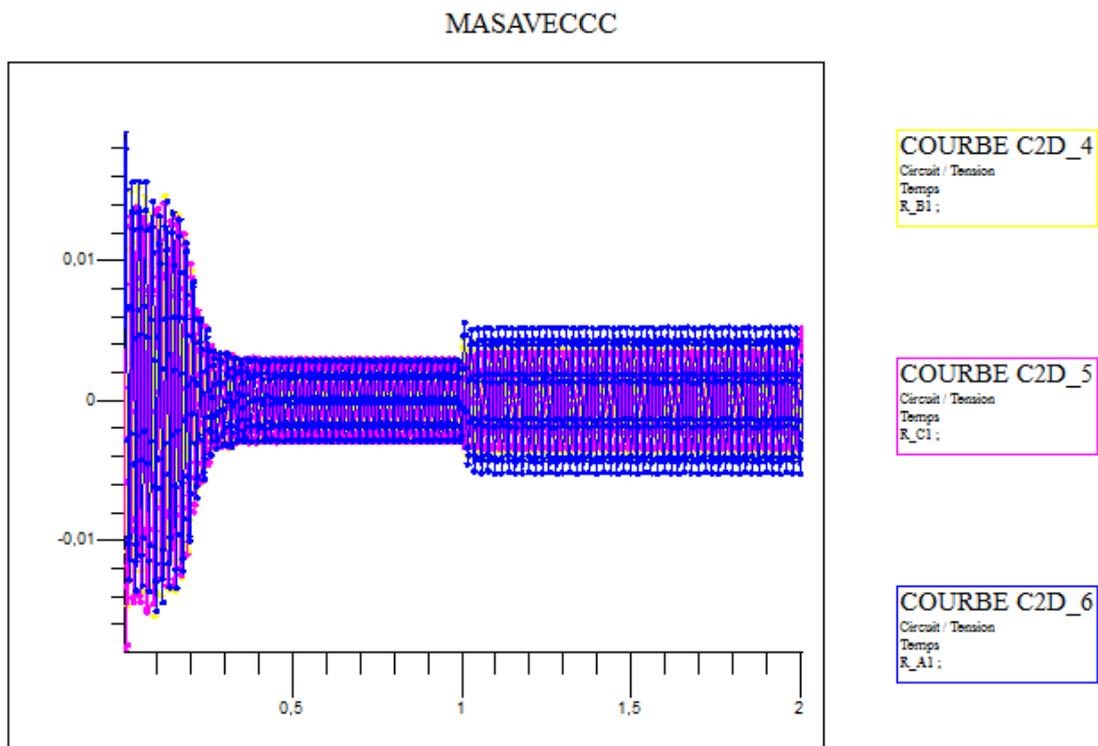


figure 3.18 : Les Courants statoriques superposés en cas de défaut

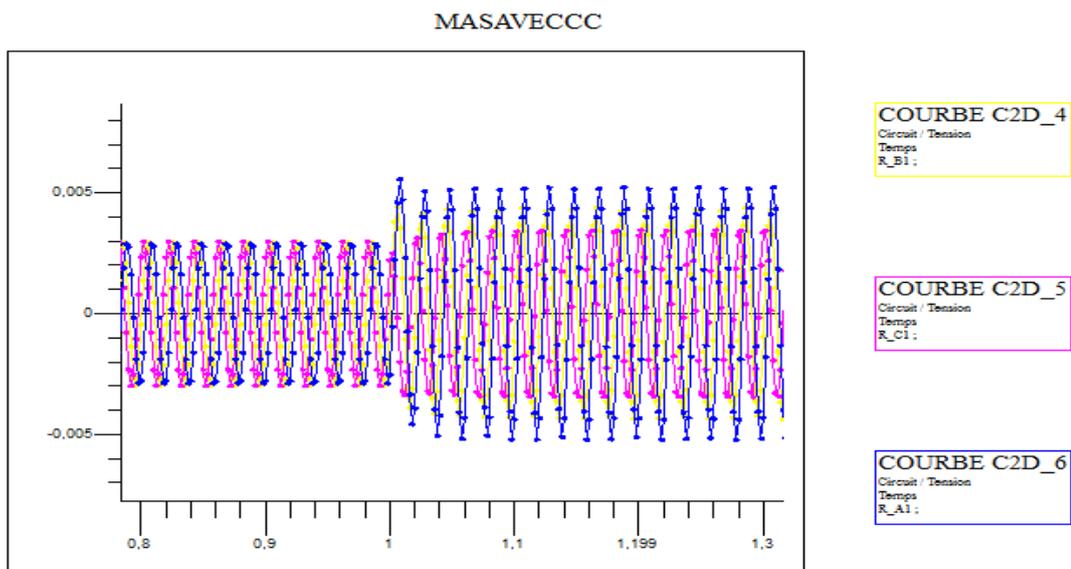


figure 3.19 : Zoom des Courants statoriques superposés en cas de défaut

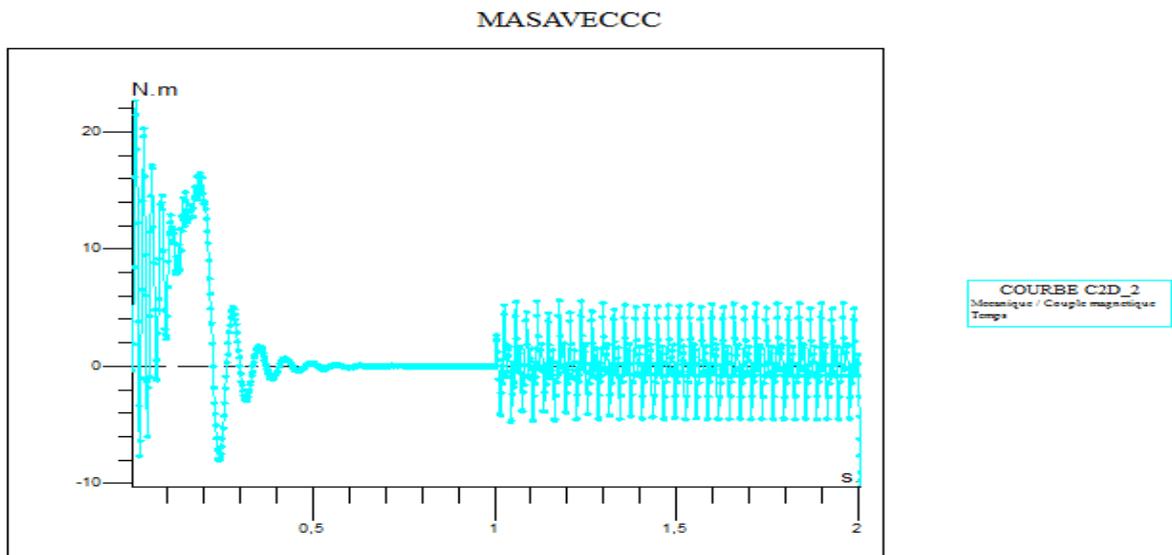


figure 3.20: Le Couple electromagnétique en cas de défaut

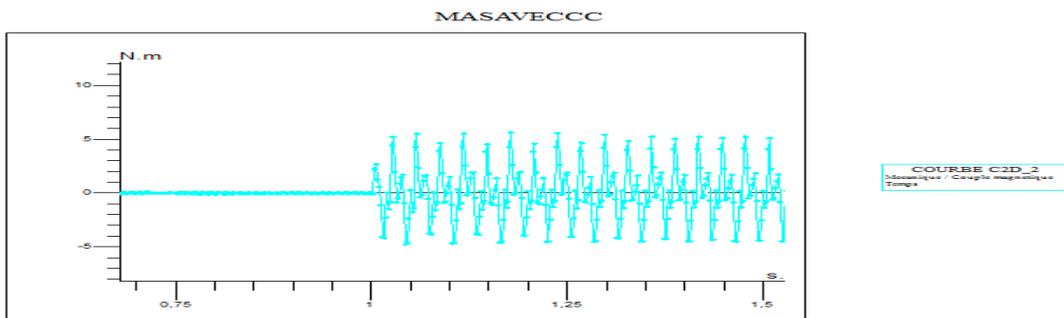


Figure 3.21 : Zoom du Couple electromagnétique en cas de défaut

3.5.2.1. Interprétation

On remarque que le régime transitoire est oscillatoire est dure (0.25s) pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (1015 tr/min). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (20 N.m) au régime transitoire, on note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers de faible valeur due à l'effet réactif de la MAS. Lorsque qu'il y a apparition de défaut (1 s), nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse tandis que le couple électromagnétique augmente et prend une valeur de (5 N.m).

On constate également que l'amplitude du courant dans la phase la plus infectée est plus grande que celles des autres phases (augmenté dans les phases A, B et diminué dans la phase C).

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

Le couple électromagnétique ainsi que la vitesse de la machine asynchrone en situation de défauts de court-circuit statoriques ont des valeurs sensiblement égales à celles en régime sain. Mais, on remarque que ces signaux sont bruités pendant l'apparition du défaut.

Lorsque des spires sont en court-circuit, l'inductance propre d'une phase statorique infectée change, et par conséquent les autres courants de phases changent à cause du couplage magnétique. Plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus l'augmentation du courant est plus significative.

3.6. Conclusion

L'étude des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil dans les deux cas de fonctionnement sain (sans défaut) et dégradé (avec défaut) nous exige plusieurs essais réels sur ces derniers (plusieurs puissances, différents défauts) mais le coût de ces essais est onéreux chose qui nous a contraint à procéder à une conception des modèles consistants et proche du moteur réel et qui nous a permis d'étudier ce dernier.

Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tenons a remercié en premier lieu **الله** Miséricordieux de nous avoir donné la santé et le courage afin d'accomplir ce modeste travail et de nous avoir permis d'atteindre la fin de notre formation.*

*Nos remerciements et notre reconnaissance vont à notre promoteur **Mr.hachlef** qui a accepté de nous encadrer et qui nous a guidés pendant l'élaboration de ce mémoire, pour sa disponibilité et ses conseils précieux.*

Nous adressons nos sincères salutations et nos vifs remerciements à tous ceux qui nous encouragés et donnés les mains d'aides, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail afin qu'il soit présentable.

Nos vifs remerciements vont à Monsieur le Président de jury, pour l'honneur qu'il nous fait et aux membres du jury pour avoir accepté de corriger et d'évaluer ce travail.

Enfin nous exprimons notre reconnaissance à tous les Enseignants du département d'Electronique qui ont contribués à notre formation

Universitaire de BLIDA.

Résumé

Résumé

Dans ce mémoire nous avons utilisé la technique des éléments finis dans le but du diagnostic des machines asynchrones à cage d'écureuil. Cette technique qui offre une analyse très fine des signaux unidimensionnels et bidimensionnels à travers d'un logiciel flux-2d est très utile pour la détermination des défauts de la machine en question. Ce travail consiste à modéliser les différents défauts de la machine asynchrone en utilisant pour ce faire une modélisation par éléments finis qui est une méthode proche de la pratique.

Mots clés : défauts de la machine asynchrone, diagnostic, méthode des éléments finis

ملخص

في هذا البحث استخدمنا تقنية العناصر المحدودة لتشخيص آلات قفص السنجاب غير المتزامن. هذه التقنية، التي تقدم تحليلاً دقيقاً جداً للإشارات أحادية الأبعاد والإشارات ثنائية الأبعاد من خلال برنامج التدفق، مفيد جداً لتحديد عيوب الجهاز المعني. هذا العمل يتكون من نمذجة أخطاء مختلفة من الجهاز غير المتزامن باستخدام النمذجة من العناصر المحددة التي هي طريقة قريبة من الممارسة

الكلمات المفتاحية : أعطاب الآلة اللامتزامنة. التشخيص. طريقة عنصر محدود

Abstract

In this paper we used the finite element technique for the diagnosis of asynchronous squirrel cage machines. This technique gives us very good analysis of unidimensional and two-dimensional signals through a flux-2d software, is very useful for determining the defects of the machine in question. This work consists in modeling the various faults of the asynchronous machine by using a modeling by finite elements which is a method close to the practice.

Key words: induction machine faults, Diagnosis, finite element method

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

DEDICACES

RESUME

Introduction générale1

CHAPITRE 1 : Présentation des défauts et des méthodes des diagnostic de la machine asynchrone

1.1. Introduction	3
1.2. La structure de la machine asynchrone	3
1.2.1 Le stator.....	4
1.2.2 Le rotor à cage	4
1.2.3 Les paliers	5
1.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	6
1.4 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone.....	6
a) Avantages	6
b) Inconvénients	7
1.5 Défaillances de la machine asynchrone	7
1.6 Définition des différents défauts de la machine asynchrone	9
1.6.1 Les origines des défauts statoriques.....	11
1.6.2 Les origines des défauts rotoriques.....	12
1.7 Les types des défauts de la machine asynchrone	12
1.7.1 Les défauts statoriques	12
1.7.1.1 Défauts d'isolant dans un enroulement	12
1.7.1.2 Court-circuit entre spires	13
1.7.1.3 Court-circuit entre phases	13
1.7.1.4 Défaut phase- terre	13
1.7.2 Défauts rotoriques	14
1.7.2.1 Défauts de roulements	14
1.7.2.2 Excentricité	15
1.7.2.3 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit	16
1.8 Méthodes de diagnostic	17
1.8.1 Les méthodes de diagnostic sans connaissance a priori (diagnostic externe)	17
1.8.1.1 Analyse spectrale	18
1.8.1.2 Surveillance du moteur asynchrone basée sur l'analyse du courant statorique	18
1.8.2 Les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori (Diagnostic interne)	20
1.8.2.1 Méthodes d'estimation paramétrique	21
1.8.2.2 Le diagnostic par les techniques d'estimation d'état	21
1.9 Différents approches de Modélisation du moteur asynchrone	21
1.9.1 Modélisation du moteur asynchrone par les méthodes numériques.....	22
1.9.1.1. Méthode des réseaux de perméance	22
1.9.1.2.Méthode des éléments finis	22
1.9.2.Modélisation du moteur asynchrone par l'approche analytique	23
1.9.2.1.Modèle triphasé-triphasé (ABC/abc).....	23

SOMMAIRE

1.9.2.2. Modèle de Park	24
1.10. Adaptation de ces modèles au diagnostic.....	25
1.11. Les étapes de diagnostic des machines asynchrones	27
1.12 .Conclusion.....	29

Chapitre2 : Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2-1 Introduction	31
2.2. Formulation des équations de Maxwell.....	31
2.2.1. Equation de Maxwell-Faraday.....	31
2.2.2. Equation de Maxwell-Ampère.....	31
2.2.3. Equation de conservation de flux magnétique.....	32
2.2.4. Equation de Maxwell-Gauss.....	32
2.2.5 Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation.....	33
2.2.6 Les lois de comportement des milieux.....	35
2.2.7. Le cas du vide.....	35
2.2.8. Les milieux conducteurs : la loi d'ohm.....	35
2.2.9 Comportement magnétique des matériaux.....	36
2.2.10 Comportement diélectrique des matériaux.....	36
2.3 Modèle magnétostatique scalaire.....	37
2.4. Modèle magnétostatique vectoriel.....	37
2.4.1 Coordonnées cartésiennes.....	38
2.5. Condition aux limites.....	40
2.5.1 Condition de Dirichlet.....	40
a) Dirichlet homogène.....	40
b) Dirichlet non homogène.....	40
2.5.2 Condition de Neumann.....	40
a) Neumann homogène.....	40
b) Neumann non homogène	41
2.6. Application des équations de Maxwell à la MAS à cage.....	41
2.7. Méthodes de résolution.....	42
2.7.1 Méthodes analytiques.....	42
2.7.2 Méthode des éléments finis.....	42
2.7.2.1 La méthode des résidus pondérés.....	43
2.7.2.2 La méthode variationnelle.....	44
2.8. Principe de la méthode des éléments finis.....	44
2.9. Types d'éléments finis.....	45
2.10 Discrétisation et approximation.....	45
2.11. Logiciel de résolution.....	46
2.11.1. Logiciel de simulation flux-2d.....	47
2.11.1.1 Module pré-processeur.....	47
2.11.1.2 Module processeur.....	47
2.11.1.3 Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D).....	47

SOMMAIRE

2.13 conclusion.....	49
----------------------	----

Chapitre 3 : Résultats et simulations de la machine asynchrone

3.1.Introduction.....	51
3.2. Application et simulation de la MAS.....	51
3.2.1 Description de la géométrie.....	51
3.2.2 Matériaux conducteurs.....	54
3.2.3.Matériaux magnétiques.....	55
3.2.4. Couplage avec les équations de circuit.....	55
3.3.Résultats de simulation par la magnétodynamique.....	56
3.3.1.Caractéristique de simulation en magnétodynamique.....	56
a) Avantages	56
b) Inconvénients	56
3.4.Résultats graphiques.....	57
3.5. Simulations des comportements de la MAS	58
3.5.1. Fonctionnement sain de la Machine asynchrone	58
3.5.1.1Interprétation.....	60
3.5.2 Fonctionnement en présence de défaut (Court –circuit).....	60
3.5.2.1.Interprétation.....	64
3.6.conclusion.....	65

Conclusion generale

ANNEXES

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES FIGURES

BIBLIOGRAPHIE

SOMMAIRE

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail de fin d'étude a porté sur la modélisation et le diagnostic des défauts de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis. Dans notre travail on a utilisé le logiciel de simulation Flux 2D qui a été vraiment bénéfique pour savoir le comportement de la machine dans les deux cas sain et défectueux (l'apparition de défauts).

Tout d'abord, dans le premier chapitre on a présenté une synthèse sur la machine asynchrone en identifiant sa composition et en décrivant son principe de fonctionnement, ensuite on a cité les défauts qui peuvent apparaître dans la machine et les étapes de diagnostic de ces derniers.

Le chapitre deux a donné les deux principales approches des méthodes de diagnostic à savoir la méthode analytique et la méthode numérique, le diagnostic par la méthode des éléments finis fait partie des méthodes numériques, c'est une méthode puissante qui donne des résultats utiles.

Les résultats de notre étude ainsi que leurs interprétations ont été clairement présentés dans le dernier chapitre ; on a obtenu des résultats significatifs grâce à la simulation par le logiciel Flux 2D qui a une importance de taille dans le domaine de simulation par éléments finis.

Liste des symboles

Ω_s : La vitesse de synchronisme (rad/sec)

Ω : La vitesse mécanique de rotor (rad/sec)

P : nombre paires des pôles

Ω_g : vitesse de glissement

n_s : La vitesse de synchronisme (tr/min)

n : La vitesse mécanique de rotor (tr/min)

f_s : La fréquence d'alimentation

f : La fréquence de défaut

f_{cc} : La fréquence de court-circuit

B : l'induction magnétique

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide (de l'air).

F : La force radiale

F_m : La force magnétomotrice de la phase "A".

ρ : Perméance de l'entrefer.

V_A, V_B, V_C : Les tensions statorique

V_a, V_b, V_c : Les tensions rotorique

J_t : Représente l'inertie totale ramenée à l'arbre moteur

f_v : Le couple de frottement visqueux

C_e : Le couple électromagnétique

C_r : Le couple résistant appliqué à la machine.

θ : La position du rotor par rapport au stator.

S : Surface fermée.

Ω : Surface enfermée par un contour

μ_0 : Perméabilité magnétique de l'air.

H : Champ magnétique.

Liste des symboles

- B : Induction magnétique.
- ψ : Flux magnétique
- ω_s : Pulsation statorique.
- φ : Ouverture angulaire.
- θ_r : Position mécanique du rotor.
- J : Densité de courant.
- i : Courant électrique.
- l : Longueur active de la machine.
- N : Fonction d'enroulement.
- N_s : Nombre de spires.
- N_e : Nombre d'encoches statoriques.
- N_b : Nombre de barres rotoriques.
- n : Fonction de distribution..
- λ : Ouverture de la bobine.
- β : Ouverture de l'encoche.
- γ : Inclinaison de l'encoche.
- α_s : Pas d'encoches statoriques.
- α_r : Pas d'encoches rotoriques

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1 : Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	3
Figure 1.2. Le Stator.....	4
Figure 1.3 : Le rotor à cage.....	5
Figure 1.4 : Source des défauts de la machine asynchrone à cage.....	8
Figure 1.5 : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes	9
Figure 1.6 : Pourcentage des défauts (2008).....	10
Figure 1.7 : Pourcentage des défauts (1995).....	10
Figure 1.8 : Différents courts-circuits.....	14
Figure 1.9 : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.....	16
Figure 1.10 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.....	16
Figure 1.11 : Principe de la surveillance par l'analyse spectrale.....	18
Figure 1.12 : principe du diagnostic par modèle.....	20
Figure 1.13 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans le cas du modèle ABC/abc dans l'espace électrique.....	23
Figure 1.14 : Modèle d'un enroulement.....	24
Figure 1.15 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.....	25
Figure 1.16 : Modèle multi-enroulements.....	26
Figure.1.17 : Les différents étapes de diagnostic.....	28

Chapitre 2

Figure 2.1 : Interface entre deux milieu.....	34
Figure 2.2 : Eléments classiques en une et deux dimensions.....	45
Figure 2.3 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D.....	48

Chapitre 3

Figure 3.1 : La géométrie de la machine asynchrone.....	52
Figure 3.2 : Dimension des encoches, a) l'encoche statorique, b) l'encoche rotorique	52
Figure 3.3 : Affectation des régions surfaciques.....	53
Figure 3.4 : Répartition du maillage.....	54
Figure 3.5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN.....	55
Figure 3.6 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.....	56
Figure 3.7 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal.....	57
Figure 3.8 : Induction magnétique pour le fonctionnement nominal.....	58
Figure 3.9 : Vitesse de rotation.....	59
Figure 3.10 : Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1.....	59
Figure 3.11 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1.....	59
Figure 3.12 : Zoom des Courants statoriques supprposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1...	60
Figure 3.13 : Couple électromagnétique.....	60
Figure 3.14 : Circuit équivalent en présence de défaut.....	61
Figure 3.15 : la vitesse de rotation en cas de défaut.....	61
Figure 3.16 : zoom de la vitesse de rotation en cas de défaut.....	62
Figure 3.17 : Les Courants statoriques juxtaposé en cas de défaut	62
Figure 3.18 : Les Courants statoriques supperposé en cas de défaut.....	63
Figure 3.19 : Zoom des Courants statoriques supperposé en cas de défaut.....	63
Figure 3.20 : Le Couple electromagnitique en cas de défaut.....	64
Figure 3.21 : Zoom du Couple electromagnitique en cas de défaut.....	64

Liste des Tableau

Tableau 3.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.....	51
Tableau 3.2 :B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [42assim].....	55

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAU

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.1 Introduction

Dans ce chapitre , on décrit le comportement du système à étudier à savoir la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil. Après avoir cité les différents défauts pouvant survenir dans la machine et leurs causes, on parle des techniques de base couramment utilisées dans le domaine du diagnostic des défauts. Enfin on terminera par une présentation des étapes de surveillance et du diagnostic des défauts rotoriques et statoriques de la machine.

1.2 La structure de la machine asynchrone

La machine asynchrone souvent appelée machine à induction, comporte deux parties essentielles, l'une fixe appelée stator portant un bobinage triphasé logé dans les encoches et relié à la source d'alimentation et l'autre mobile ou rotor qui peut être soit bobiné soit à cage d'écureuil. Ces deux parties sont coaxiales et séparées par un entrefer, on considère le cas d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

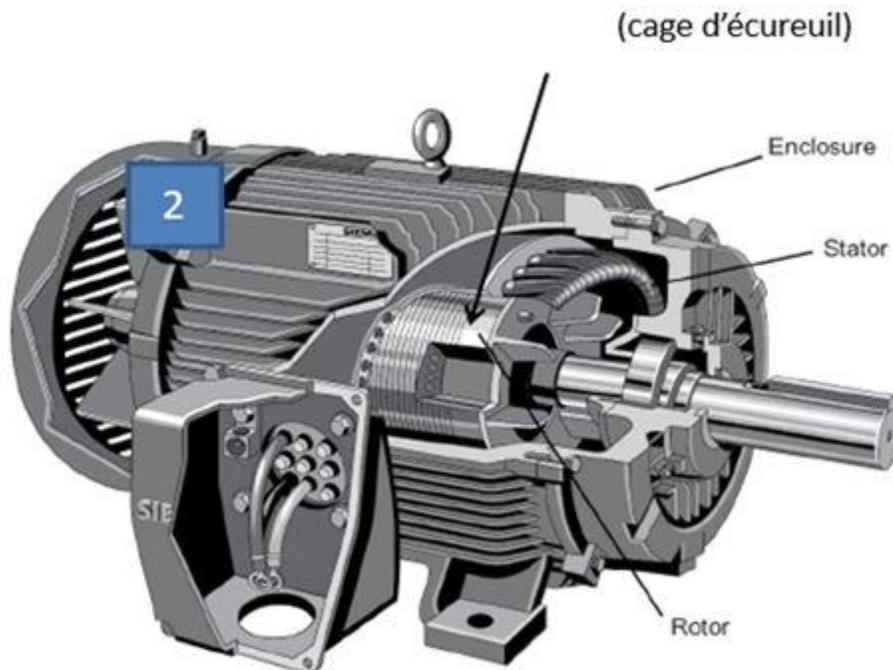


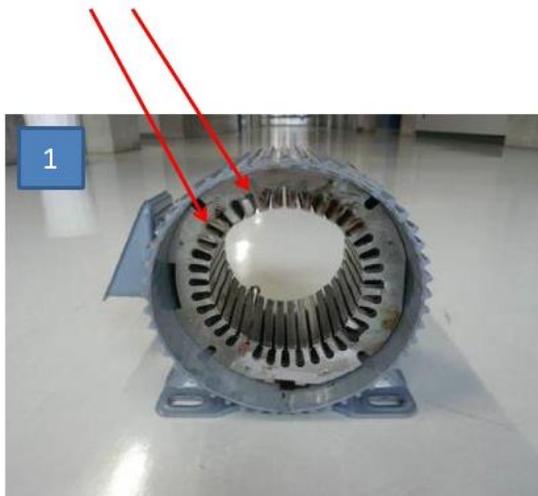
Figure 1.1 : Machine asynchrone à cage d'écureuil

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.2.1 Le stator

Il est constitué d'un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique. Ce circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l'axe de la machine (figure 1.2). Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties : les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer, le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobine permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre. L'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.

Encoches statoriques – Moteur réel



Encoches statoriques – Représentation graphique

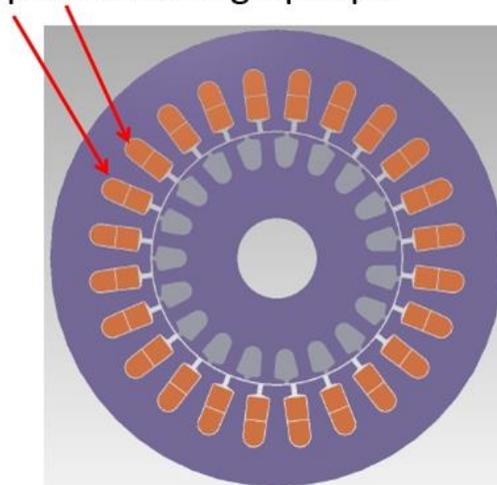


Figure 1.2. Le Stator

1.2.2 Le rotor à cage

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor (figure. 1.3). Cette cage est insérée à

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné. Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettés dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [1], [2]. Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

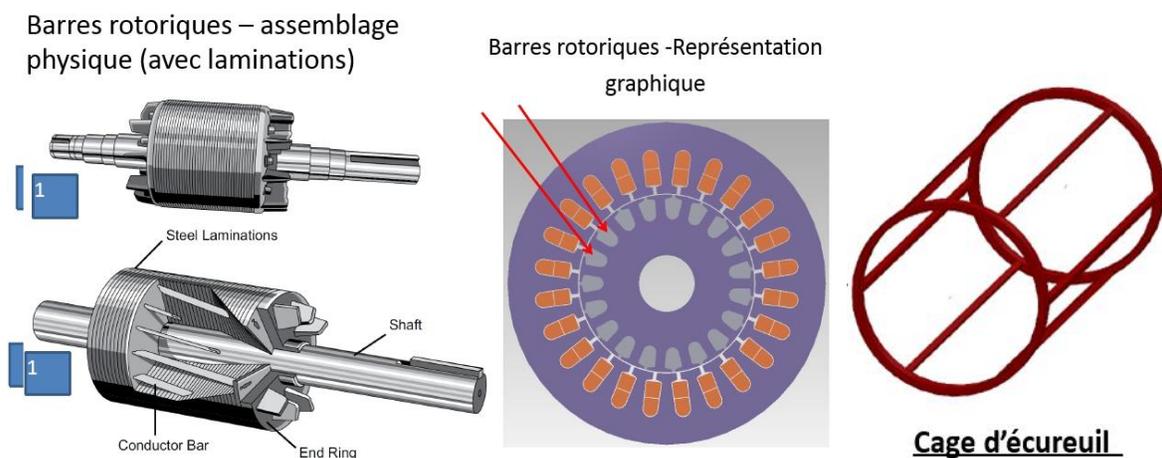


Figure 1.3 : Le rotor à cage

1.2.3 Les paliers

Les paliers, qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage. L'ensemble ainsi établi constitue alors la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. Lorsque le rotor tourne à une vitesse n_s différente de la vitesse du synchronisme, l'application de la loi du FARADAY à un des enroulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuit sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner une naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{P} \quad (1.1)$$

Où f : est la fréquence d'alimentation.

P : représente le nombre de paire de poles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant (n_1) diffère de celle du rotor (n), c'est-à-dire lorsque $n \neq n_1$, car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque $n = n_1$, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport $g = \frac{n_1 - n}{n_1}$ est appelé glissement de la machine asynchrone.

1.4 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone

a) Avantages

Il ya plusieurs avantages dans le moteur asynchrone

1. Structure simple .
2. Robuste et facile a construire.
3. Utilisé dans la puissance moyenne et élevée.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

4. Relié directement aux réseaux industriels a tension et fréquence.
5. Il tourne a vitesse variable différent de la vitesse synchrone.
6. Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement a vitesse

b) Inconvénients

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone :

7. Le couple de démarrage plus élevé que les couples nominales.
8. La vitesse dépend de la charge .
9. Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
10. La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un forte couplage .

1.5 Défaillances de la machine asynchrone

La machine asynchrone est considérée comme robuste et également défailante dans le cas de son emploi de longue durée et dans des conditions dures. Il est important que les mesures soient prises pour diagnostiquer l'état de la machine au fur et à mesure qu'elle entre dans le mode des défauts. Il est donc nécessaire de faire un contrôle continu, en ligne ou hors ligne, des variables de la machine. Les raisons derrière les défauts dans les machines électriques ont leur origine dans la conception, la tolérance de fabrication, l'installation, l'environnement de fonctionnement, la nature de la charge et le programme de la maintenance. Le moteur asynchrone, comme n'importe quelle autre machine électrique tournante, est soumis aux forces électromagnétiques et mécaniques. La conception du moteur est telle que l'interaction entre ces forces dans des conditions normales mène à un fonctionnement stable avec un bruit et des vibrations minimums. Quand le défaut a lieu, l'équilibre entre ces forces est perdu, aboutissant à un autre perfectionnement du défaut. Les défauts du moteur asynchrone peuvent être classés par catégorie dans deux types : mécanique et électrique. Les sources des défauts du moteur peuvent être internes, externes ou dues à l'environnement, comme présente la figure I.4. Les défauts internes peuvent être classifiés concernant leurs origines c'est à dire électrique et mécanique. Habituellement, d'autres types de défauts de roulement et de refroidissement se rapportent aux défauts de rotor parce qu'ils appartiennent aux pièces mobiles. La Figure I.5 présente l'arbre de défaut de la machine asynchrone où les défauts sont classifiés selon leurs emplacement rotorique et statorique [3,4].

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

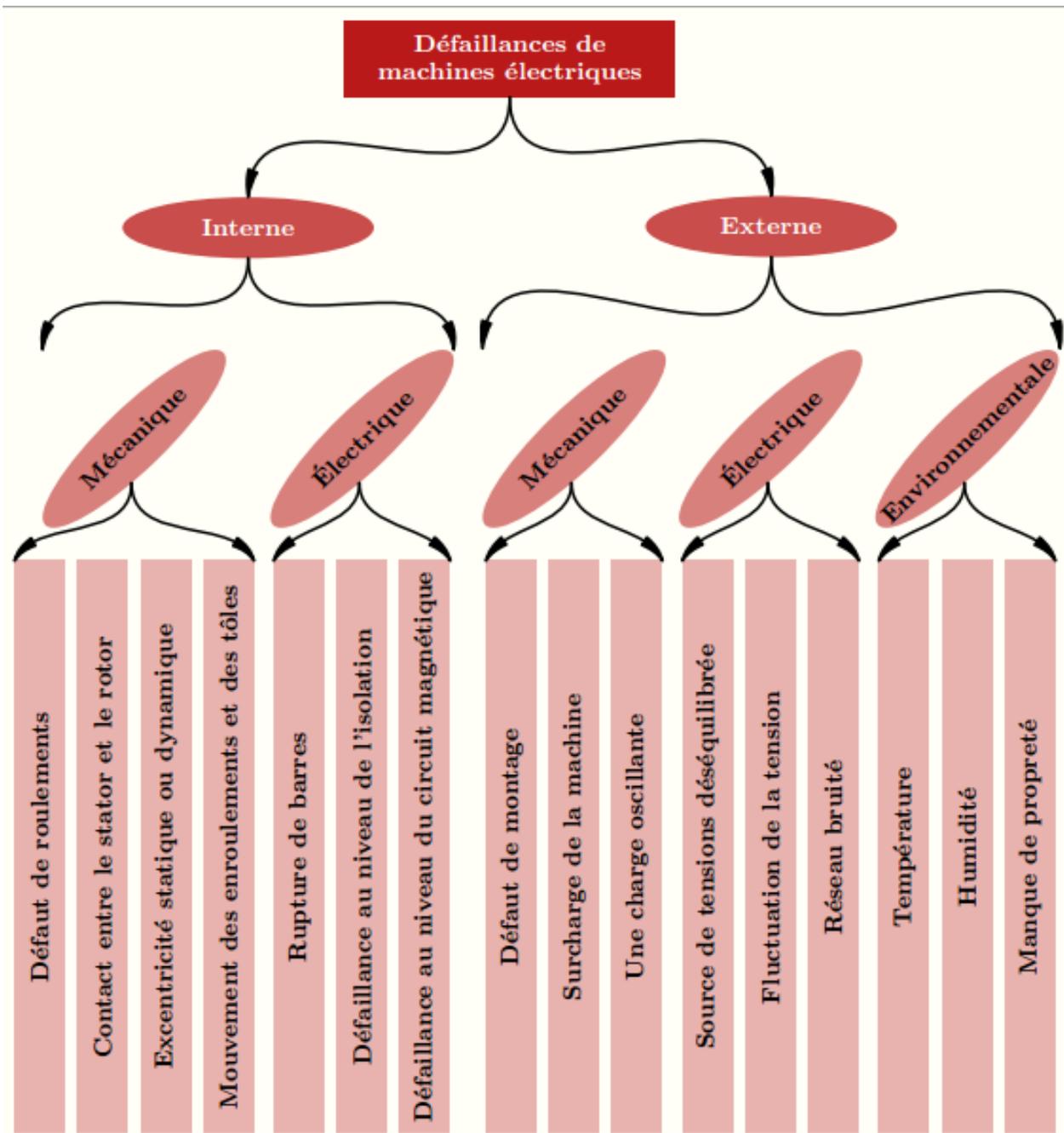


Figure 1.4 : Source des défauts de la machine asynchrone à cage.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

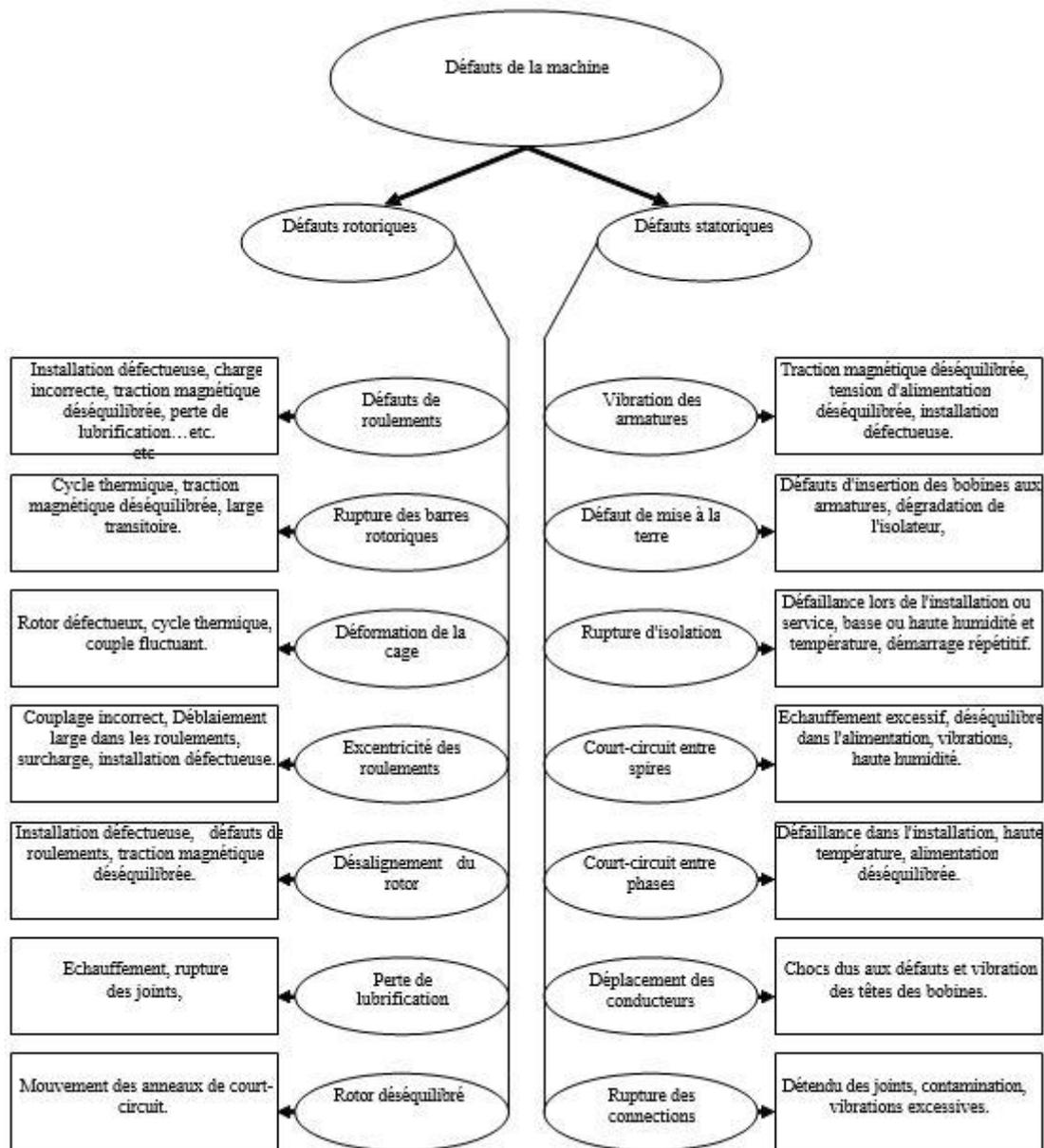


Figure 1.5 : Principaux défauts de la machine asynchrone et leurs causes [3].

1.6 Définition des différents défauts de la machine asynchrone

Une étude statistique menée par [03] sur les machines asynchrones à cage d'écureuil, exploitée dans le domaine de l'industrie pétrochimique, nous révèle que certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres comme exposé par le diagramme de la figure 1.3 en présentant le pourcentage de défauts susceptibles d'affecter ces machines de grande puissance.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

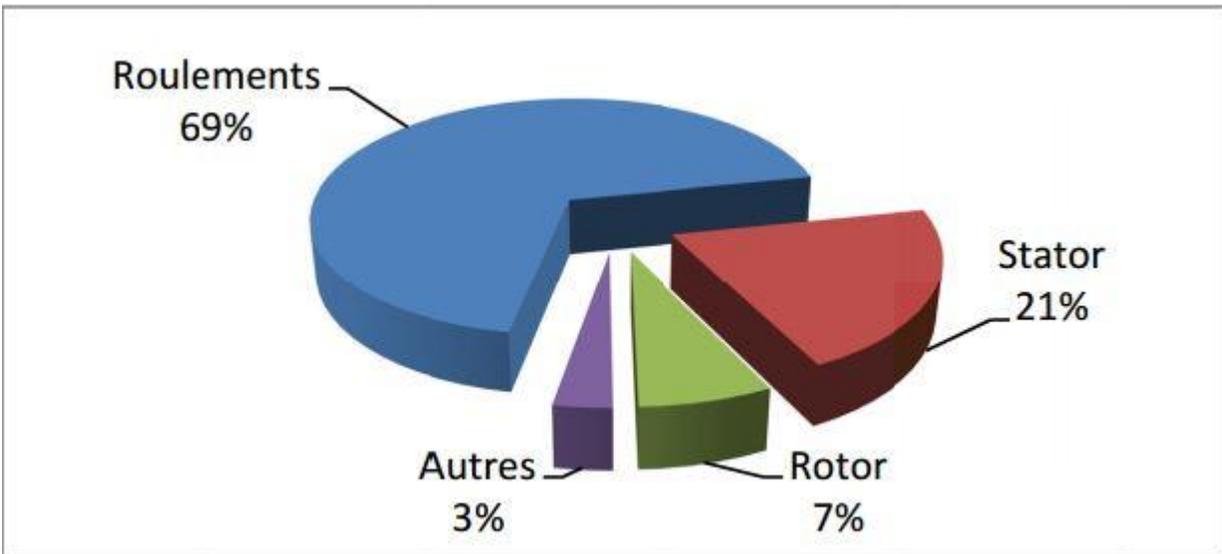


Figure 1.6 : Pourcentage des défauts (2008)

Cette répartition montre que les défauts des machines de grande puissance proviennent principalement de roulements et du bobinage statorique, ceci est dû aux contraintes mécaniques plus importantes dans le cas de ces machines.

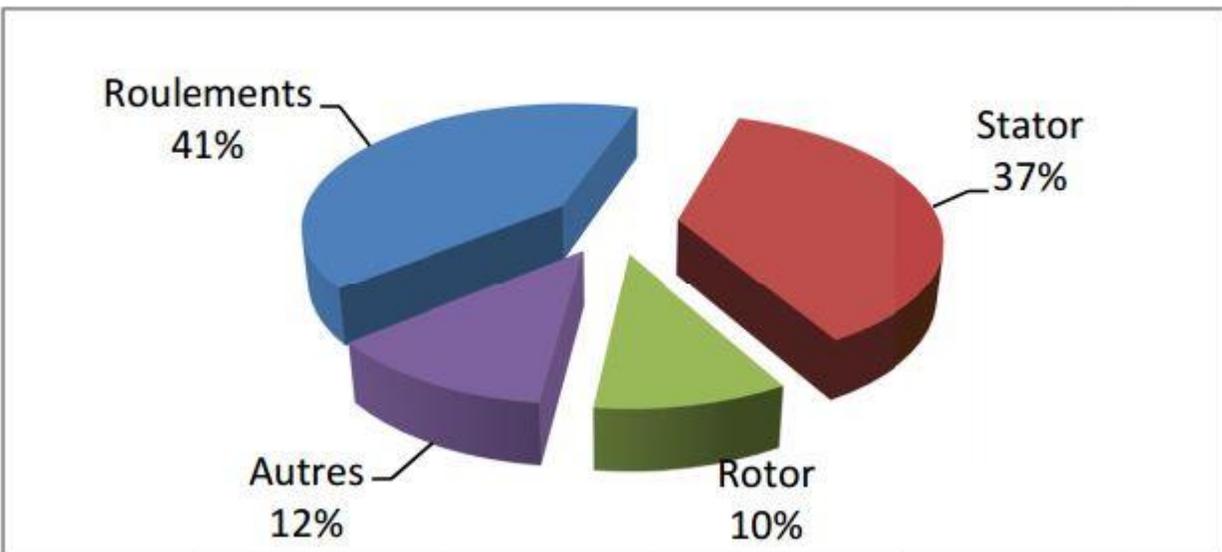


Figure 1.7 : Pourcentage des défauts (1995)

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

En comparant ces résultats à ceux issus de publications plus anciennes, données par le diagramme de la figure 1.4, réalisés par [04] sur des machines de même type (100KW à 1MW), nous remarquons que, ces dernières décennies, la répartition du pourcentage de ces défauts a changé, du fait des conditions de fabrication des moteurs. Les défauts dans le stator et le rotor sont de moins en moins fréquents, la principale source de défaillances est constituée actuellement par les roulements. L'avancée technologique dans le domaine de l'électronique de puissance a permis aussi d'introduire des nouvelles techniques de commande des machines électriques. Dans le cas des machines commandées par des convertisseurs de puissance, les enroulements sont excités par des tensions comprenant des harmoniques de rang élevé. Cette dernière option est devenue la norme pour le contrôle des systèmes électriques. Ce type d'alimentation accélère le vieillissement de l'isolation du bobinage statorique. Une solution est le développement d'une meilleure isolation de matériaux. Ces statistiques ne sont pas pour autant valables pour toutes les circonstances, il est à noter que ces défauts sont très sensibles aux conditions d'exploitation de ces machines et que leurs origines peuvent être très variées [05]

1.6.1 Les origines des défauts statoriques

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

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.6.2 Les origines des défauts rotoriques

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

Une description succincte de défauts les plus courants est donnée dans les paragraphes suivants.

1.7 Les types des défauts de la machine asynchrone

1.7.1 Les défauts statoriques

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

- Défaut d'isolant;
- Un court-circuit entre spires;
- Un court-circuit entre phases;
- Défaut phase- terre;
- Défauts de circuit magnétique.

1.7.1.1 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.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.7.1.2 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 statorique 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. Par contre, le couple électromagnétique moyen délivré par la machine reste sensiblement identique hormis une augmentation des oscillations proportionnelle au défaut [06].

1.7.1.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions 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 statorique 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 [07].

1.7.1.4 Défaut phase- terre

Le défaut d'une phase à la terre a généralement un potentiel flottant, mais pour des raisons de liaisons mécaniques, il est souvent relié à la masse. Si le potentiel est flottant, un court-circuit entre l'enroulement et le bâti n'a pas d'importance du point de vue matériel, excepté les effets capacitifs, le bâti prend alors le potentiel de l'enroulement à l'endroit du court-circuit. Par contre, au niveau de la sécurité des personnes, ce type de défaut peut être très dangereux et il est alors nécessaire de mettre en place des dispositifs de protection (disjoncteurs différentiels).

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

En présence de ce type de défaillance, la tension de la phase concernée ne change pas. Cependant le courant circulant dans cette phase augmente avec la réduction de la résistance et de l'inductance. Cette augmentation du courant se traduit par une augmentation de la température pouvant entraîner des défauts d'isolant dans l'enroulement. De plus, cette défaillance va générer une composante homopolaire entraînant l'apparition d'un couple pulsatoire. Une mesure du courant de fuite pourrait permettre de détecter ce type de défaut [08].

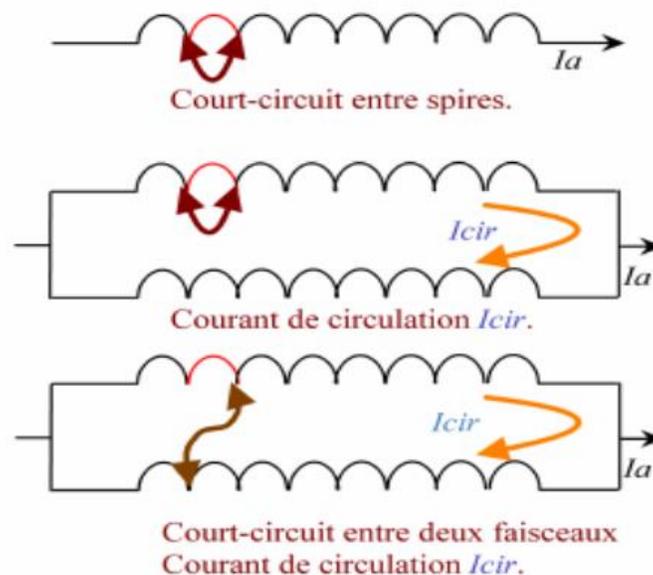


Figure 1.8 : Différents courts-circuits entre phases.

1.7.2 Défauts rotoriques

1.7.2.1 Défauts de roulements

la majorité des défauts dans les machines électriques concernent les défauts de roulements qui ont de nombreuses causes telles que l'écaillage de fatigue, la contamination du lubrifiant, une charge excessive [09] ou des causes électriques comme la circulation de courants de fuite induits par les onduleurs [10]. Les défauts de roulements entraînent de manière générale plusieurs effets mécaniques dans les machines tels qu'une augmentation du niveau sonore et l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine [11]. Ce type de défaut induit également des variations (oscillations) dans le couple de charge de la machine asynchrone. Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor.

1.7.2.2 Excentricité

Les conséquences des défauts mécaniques se manifestent généralement au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité [12]. L'excentricité d'une machine électrique est un phénomène qui évolue dans le temps et qui existe de sa fabrication. Celle-ci passe en effet par différentes étapes d'usinage et de montage qui induisent un décentrement du rotor par rapport au stator. Lors du fonctionnement de la machine, deux causes principales aggraveront l'excentricité. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et qui peut imposer une force radiale sur l'arbre de cette machine, qui va engendrer une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène risquant d'aggraver l'excentricité est quant à lui inhérent au fonctionnement de la machine ; en effet, le décentrement génère un déséquilibre dans la distribution des efforts radiaux entre le stator et le rotor [13, 14]. L'effort radial est maximal à l'endroit où se situe l'épaisseur minimale de l'entrefer et va tendre à diminuer encore plus la valeur de l'entrefer minimum et augmenter par conséquent encore plus le déséquilibre des efforts radiaux. Le point ultime de l'excentricité est le frottement du stator sur le rotor, qui est synonyme de destruction rapide de la machine. Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées [15, 16].

- L'excentricité statique (Figure 1.9(a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.
- L'excentricité dynamique (Figure 1.9(b)) – correspond, elle à un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator [17]. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.
- L'excentricité mixte (Figure 1.(c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

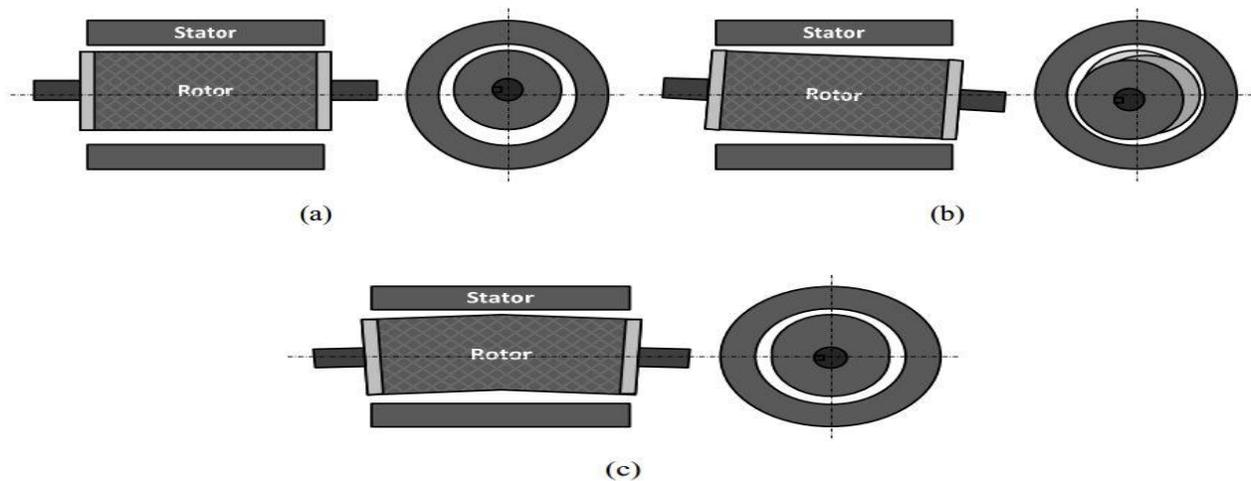


Figure 1.9 : Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte.

1.7.2.3 Défauts de rupture de barres et d'anneau de court-circuit

Les mêmes défauts qu'au stator peuvent se retrouver dans un rotor bobiné. Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écureuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit (Figure 1.10).

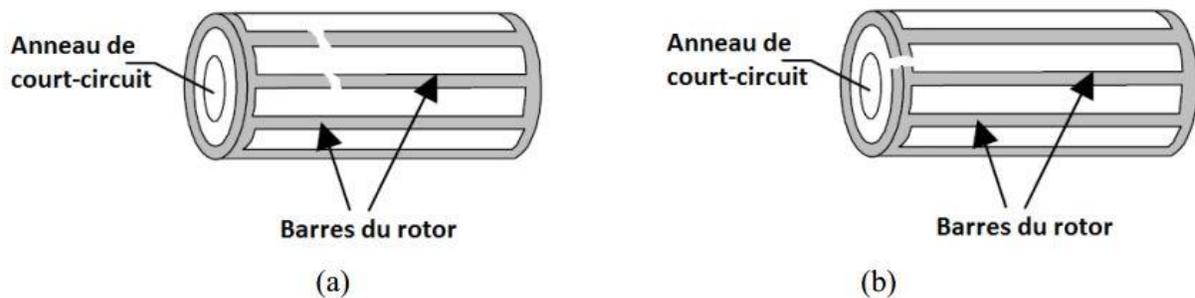


Figure 1.10 : Défaut d'un rotor à cage d'écureuil : (a) rupture de barres ; (b) rupture d'anneau de court-circuit.

Les ruptures de barres ou de portions d'anneau peuvent être dues, par exemple, à une surcharge mécanique (démarrages fréquents, etc.), à un échauffement local excessif ou encore à un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures) [18]. Cela fait apparaître des oscillations sur les courants et le couple électromagnétique d'autant plus apparentes que l'inertie est très grande

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

(vitesse constante) [19,20]. Si l'inertie de l'entraînement est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques. La cassure de portion d'anneau est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres dans une machine asynchrone à cage. Ces cassures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, d'autant que les portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques [21]. Il convient de mentionner, qu'un mauvais dimensionnement des anneaux, conduit à une détérioration des conditions de fonctionnement ou une surcharge de couple et, donc, à des courants pouvant entraîner leur cassure [21 ,22].

L'apparition d'un défaut de rupture de barres n'induit pas à un arrêt de la machine, du fait que le courant qui traversait la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes [23]. Ces barres sont alors surchargées, et les contraintes thermiques et électromécaniques engendrées peuvent conduire à leur rupture, et ainsi de suite jusqu'à la rupture d'un nombre suffisamment important de barres pour provoquer l'arrêt de la machine. Devant la multitude des défauts envisageables et les conséquences de leurs apparitions, les techniques de surveillance se sont rapidement imposées auprès des utilisateurs des machines électriques. Elles commencent également à intéresser les concepteurs.

1.8 Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer en deux grandes familles.

1.8.1 Les méthodes de diagnostic sans connaissance a priori (diagnostic externe)

Ces méthodes se fondent sur l'analyse des mesures que fournit le moteur lors de son fonctionnement. La technique d'analyse en temporel ou en fréquentiel identifie le comportement optimal du moteur dans le cas où il est sain et compare les résultats avec ceux obtenus en présence de défaut [25].

Le diagnostic sans modèle, nommé parfois diagnostic externe, est étudié depuis plusieurs années. Il est utilisé dans le cas des systèmes complexes pour lesquels un modèle mathématique satisfaisant est difficile à obtenir. Il exploite des données acquises à l'entrée et à la sortie du système [26].

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.8.1.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter des défaillances dans les machines électriques, essentiellement les ruptures de barres au rotor des machines asynchrones, la dégradation des roulements, les excentricités et les court-circuits dans les bobinages. Ces cas se prêtent bien à cette approche dans la mesure où de nombreux phénomènes se traduisent par l'apparition de fréquences directement liées à la vitesse de rotation ou à des multiples de la fréquence d'alimentation. La surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une simple transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et à visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne), soit les grandeurs mécaniques (vibration, couple électromagnétique, vitesse) [3].

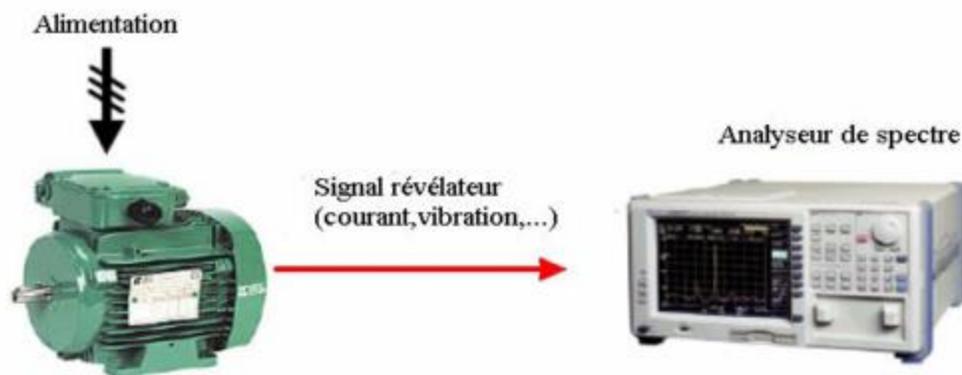


Figure 1.11 : Principe de la surveillance par l'analyse spectrale.

1.8.1.2 Surveillance du moteur asynchrone basée sur l'analyse du courant statorique.

D'après la littérature, les principaux signaux du moteur utilisés et utilisables pour obtenir des informations sur l'état de santé de la machine sont les suivants [24] :

- Couple électromagnétique
- Puissance instantanée statorique
- Vibrations mécaniques
- Courants statoriques

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

Parmi tous ces signaux utilisables, le courant statorique s'est avéré être l'un des plus intéressants et ce pour deux raisons.

la surveillance du courant statorique permet de détecter voire de diagnostiquer aussi bien des défauts électromagnétiques (déséquilibres de phase, court-circuit entre spires, excentricités d'entrefer, ruptures de barres,..) que des défauts purement mécaniques (dégradation des roulements à bille, désalignement, ..).

le courant statorique est très facile d'accès puisqu'il est utilisé pour la commande de la machine et qu'il peut être mesuré directement au poste d'alimentation.

L'analyse du courant statorique du moteur est un outil puissant pour détecter la présence d'anomalies mécaniques et électriques, non seulement dans le moteur, mais également dans la charge. Des améliorations considérables sont apportées à cette technique qui est dénommée dans la littérature " l'Analyse des Signatures du Courant du Moteur (ASCM)" (en anglais : Motor Current Signature Analysis MCSA).

Les signaux de courants présentent l'avantage d'être facilement mesurables, et à moindre coût. Des composantes fréquentielles ont été déterminées pour chaque type de défaut. Il est important de noter, que l'amplitude de la composante fréquentielle augmente avec la sévérité du défaut. L'analyse spectrale du courant statorique est une méthode de contrôle qui consiste à analyser le spectre du courant statorique sachant que dans un spectre d'un moteur sans défaut, apparaît la composante du fondamental à la fréquence du réseau d'alimentation en régime permanent, accompagnée des composantes à faibles et hautes fréquences qui sont dues à la géométrie de la machine considérée. Un bon équipement d'analyse de spectre (grande sensibilité) et la comparaison entre les spectres du courant d'un moteur avec défaut et celui de la référence (le spectre du courant d'un moteur sans défauts), permet d'avoir une bonne analyse et obtenir le maximum d'informations sur l'état du moteur.

Cette méthode est utilisée lors du fonctionnement normal du moteur (moteur en marche), ce qui facilite beaucoup la surveillance de la machine et indique à chaque instant l'état de leur fonctionnement. Elle est appuyée par un algorithme de calcul rapide afin d'obtenir la transformée de fourrier discrète. Elle est appelée Transformée de Fourier Rapide (Fast

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

Fourier Transform 'FFT'). La FFT c'est un moyen efficace qui réduit le nombre d'opérations arithmétiques nécessaire à la transformée discrète, son importance augmente aussi avec l'évolution du traitement numérique des signaux, de même avec la possibilité de pouvoir l'utiliser pour des signaux analogiques ou plus généralement pour des fonctions continues dans de nombreux domaines scientifiques. L'utilisation de cette méthode est très simple car elle ne nécessite pas l'introduction d'appareillage de mesure à l'intérieur de la machine électrique, mais consiste à analyser le courant statorique du moteur [14] [15] [16].

1.8.2 Les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori (Diagnostic interne)

Ces méthodes de diagnostic reposent sur un modèle de la machine. Elles comparent l'évolution du modèle avec celle du processus physique. Considérons la machine asynchrone comme un processus expérimental dont il est question de rechercher, à chaque instant, le modèle comportemental correspondant. La (figure 2.2) traduit cette procédure [26].

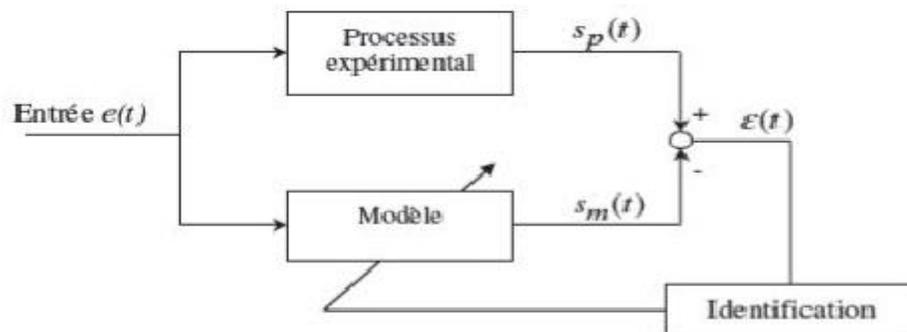


figure 1.12 : principe du diagnostic par modèle.

On part d'un modèle du processus à surveiller sain. Si la sortie du modèle $s_m(t)$ correspond à la sortie du processus $s_p(t)$, alors le modèle fournit une estimation des grandeurs caractéristiques du fonctionnement sans défaut. Tout écart entre $s_m(t)$ et $s_p(t)$ (erreur de sortie $e(t)$), est synonyme de défaillance [26].

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.8.2.1 Méthodes d'estimation paramétrique

La méthode d'estimation paramétrique mesure l'influence des défauts sur les paramètres. Le principe consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en l'évaluation de la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé. Pour détecter l'apparition de défaillances dans le système, il faut effectuer la comparaison entre les paramètres estimés et les paramètres théoriques [23].

1.8.2.2 Le diagnostic par les techniques d'estimation d'état

L'estimation des variables internes d'un système en se basant sur un modèle approché, comme par exemple l'estimation des flux ou des courants rotoriques dans la machine asynchrone sur la base du modèle de Park, peuvent donner dans certains cas des informations sur la présence de défauts. Il y a une observation qui effectue la correction des variables estimées sur la base de mesures [20].

Les méthodes de diagnostic avec connaissance a priori ne sont pas utilisables en temps réel puisqu'il est nécessaire de connaître à l'avance les enregistrements des signaux d'entrées et de sorties [20].

Toutes ces méthodes de détection sont basées sur la modélisation du moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Le paragraphe suivant sera donc consacré à la présentation de différentes approches de modélisation.

1.9. Différents approches de Modélisation du moteur asynchrone

Plusieurs voies de modélisation existent et sont actuellement utilisées pour examiner des problèmes tels que la commande, la conception, l'optimisation ou la surveillance des moteurs asynchrones. Parmi les méthodes de synthèse existantes, deux approches sont prépondérantes chacune correspondant à un niveau de complexité et de précision différent [23].

- La modélisation par des méthodes numériques notamment la méthode des réseaux de perméances et la méthode des éléments finis.
- L'approche analytique basée sur une représentation de la machine par circuits électriques équivalents.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.9.1 Modélisation du moteur asynchrone par les méthodes numériques

La modélisation du moteur asynchrone par des méthodes numériques permet de résoudre numériquement les équations d'électromagnétisme en découpant la machine en plusieurs tubes de flux dans le cas de la méthode des réseaux de perméances et, dans le cas de la méthode des éléments finis de taille suffisamment petite pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes[14].

1.9.1.1 Méthode des réseaux de perméance

La méthode de perméance est basée sur la décomposition en tubes de flux élémentaires du circuit magnétique de la machine. 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 potentiel magnétique qui entrent en jeu à la place des courants et des différences de potentiel électrique. 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. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméance d'entrefer variable selon la position du rotor de la machine [14].

1.9.1.2 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 difficile. Nous pouvons citer FLUX 2D, FLUX 3D ou encore MAXWELL [14].

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.9.2 Modélisation du moteur asynchrone par l'approche analytique

Cette approche de synthèse de modèle, est de loin la plus simple et la plus employée. Elle est basée sur une modélisation du moteur sous forme de circuits électriques équivalents et elle repose sur le concept d'inductance. Notion qui caractérise une relation flux-courant linéaire. Plusieurs modèles de degré de complexité différent ont été proposés dans la littérature dont le choix dépend en fait du problème traité et des conditions de fonctionnement de la machine asynchrone [27].

Nous présentons, les deux modèles dynamiques du moteur asynchrone triphasé les plus employées, le modèle ABC/abc basé sur une représentation du rotor et du stator par phase et le modèle du Park

1.9.2.1 Modèle triphasé-triphasé (ABC/abc)

Dans le cas du modèle (ABC/abc), le moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné comme à cage d'écureuil est représenté par 6 enroulement dans l'espace électrique, trois enroulement triphasés repérés pour le stator par les axes $\vec{A} \vec{B} \vec{C}$ et trois enroulements fictifs triphasés repérés pour le rotor par $\vec{a} \vec{b} \vec{c}$ comme le montre la (figure 2.3).

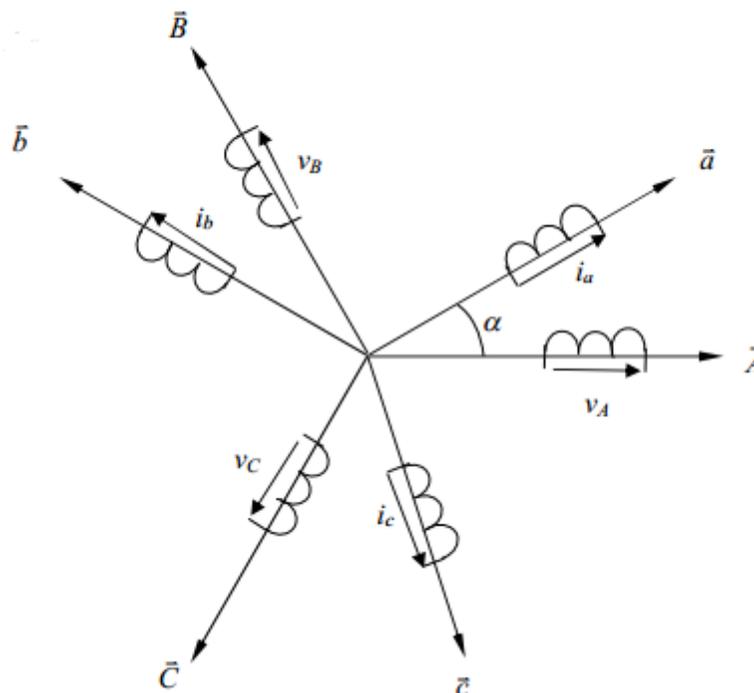


Figure 1.13 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans le cas du modèle ABC/abc dans l'espace électrique

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

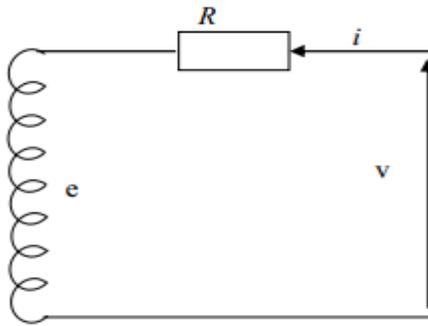


Figure 1.14 Modèle d'un enroulement

Cette représentation par phase de la machine reste valide même lorsque les conditions de symétrie de la machine ne sont plus respectées. Par conséquent, le modèle ABC /abc est intéressant pour étudier des défauts tels que les déséquilibres de tensions d'alimentation ou des impédances de phase. Cependant, dans le cas de la machine à cage d'écureuil le modèle ne permet pas la simulation de défauts rotoriques tels que la rupture d'une barre ou la fissuration d'un anneau [27].

1.9.2.2 Modèle de Park

Le modèle de Park est le modèle dynamique le plus simple du moteur asynchrone triphasé. Il a été développé pour la commande de machines saines triphasées et est obtenu par application de la transformation de Park sur le modèle ABC /abc. Cette technique permet de transformer un système triphasé abc en un système diphasé équivalent dq tel que les axes d et q soient perpendiculaires dans l'espace électrique. On remarque alors sur la (figure 2.4) que θ_s et θ_r sont liés à α par la relation [26][27].

$$\theta_s - \theta_r = \alpha \quad (\text{eq 2.1})$$

Le choix de l'orientation du repère d'axe \vec{d} et \vec{q} dépend et fait, des objectifs de l'application [38] :

- Les axes tournant à la vitesse du rotor $\theta_r = 0$ permet l'étude des grandeurs statoriques de la machine .
- Les axes liés au stator $\theta_s = 0$ permet l'étude des grandeurs rotoriques
- Les axes solidaires du champ tournant sont utilisés en commande

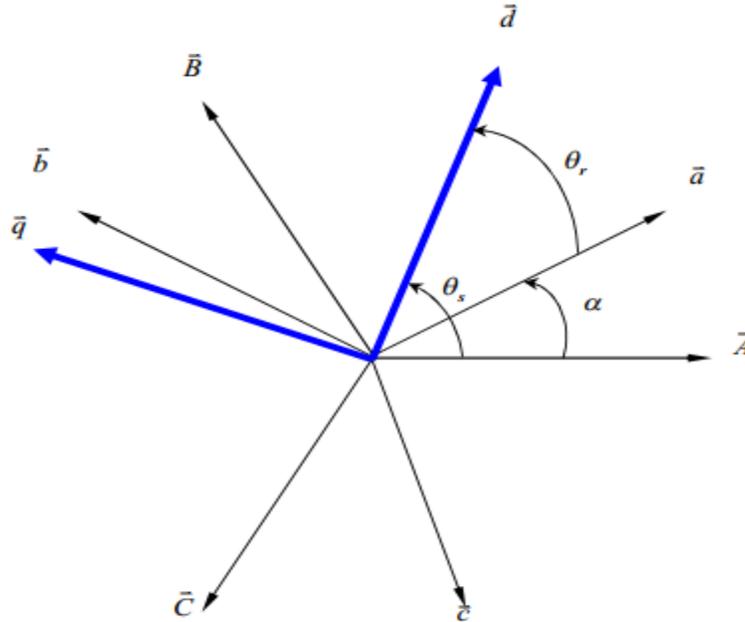


Figure 1.15: Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

La transformation du Park conserve la puissance instantanée. La composante homopolaire s'annule si la machine est supposée équilibrée. Si le système n'est pas équilibré, que ce soit par son alimentation (défaut d'alimentation), ses courant ou ses flux (défaut de bobinage ou défaut de circuit magnétique) la représentation biphasée n'est plus valide et ne conduirait plus à un découplage aussi intéressant que ce lui de Park [20].

Comme le modèle de Park s'appuie sur des hypothèses de symétrie des structures et de périodicité des alimentations propres aux seules machines en bonne santé contrairement au modèle ABC/abc. La rupture de ces propriétés en présence d'un défaut rend ce modèle caduque [27].

1.10. Adaptation de ces modèles au diagnostic :

- Les méthodes numériques possèdent l'avantage de modéliser la saturation magnétique avec une grande précision qui est généralement négligée dans les autres modèles. Mais d'un autre côté, la méthode des éléments finis ne possède pas la possibilité de simuler les défauts au rotor, ce qui la rend de moins en moins utilisée sachant qu'elle nécessite un temps de simulation important et n'assure pas le diagnostic en temps réel.

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

- Le modèle Triphasé-Triphasé, représente la machine par trois phases au stator et trois autres au rotor. Il permet la détection de quelques types de défauts reliés surtout au stator tels que l'ouverture d'une phase statorique, le court-circuit phase-phase ou le court circuit phase-neutre. Mais il n'est jamais possible avec ce modèle d'accéder aux problèmes liés aux barres rotoriques ou aux anneaux de courts circuits [17].
- La représentation biphasée du modèle de Park n'est valide que si les alimentations sont équilibrées et si la machine est saine et équilibrée lors de l'apparition d'un défaut, un déséquilibre s'instaure dans la machine [16]. Un modèle du moteur asynchrone à cage d'écureuil appelé modèle multi-enroulements a été proposé dans la littérature. Il suppose que le rotor est constitué d'autant de phases que de barres et que le stator est représenté par 3 phases comme dans le modèle ABC/abc (figure 3.6) [27]. Il est donc possible d'observer les défauts au stator et au rotor à cause de la modélisation détaillée de la machine représentée par m circuits statoriques et n_b barre rotoriques [27].

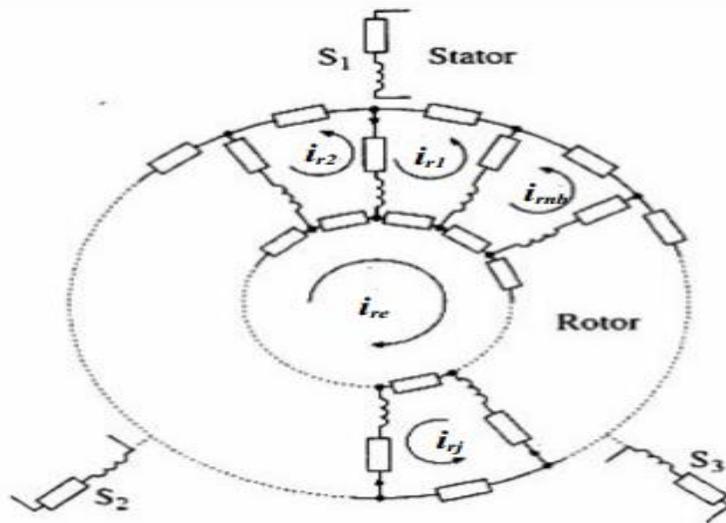


Figure 1.16 : Modèle multi-enroulements

1.11. Les étapes de diagnostic des machines asynchrones

Les machines électriques et particulièrement les machines asynchrones jouent de nos jours un rôle important dans toutes les applications industrielles. Assurer la disponibilité et la sûreté de fonctionnement de celles-ci est une tâche fondamentale. Il est donc nécessaire de développer des systèmes permettant de surveiller et de diagnostiquer l'état de santé de ces dispositifs. La surveillance et la supervision ne doivent pas se limiter à la machine électrique seule, en effet cette machine fait toujours partie de tout un processus industriel. Assurer la sûreté de fonctionnement fait partie de la supervision du processus industriel. Le schéma de supervision et d'accommodation de la commande de la (figure 1.11) présente les différentes étapes et fonctionnalités que doit comporter un système supervisé.

Ce diagramme peut être appliqué à la machine asynchrone et à sa commande ou au processus l'intégrant. L'objectif final de toute supervision est d'augmenter la fiabilité du processus, en cherchant à rattraper les défaillances qui peuvent survenir durant le fonctionnement du système. Une fois que les couches de supervision et de diagnostic ont rempli leur rôle en détectant et en identifiant la défaillance, la deuxième étape est d'agir sur la commande pour rattraper cette dégradation du fonctionnement, cette intervention se faisant à plusieurs niveaux (figure : 1.11) selon la sévérité et le caractère destructeur de la défaillance.

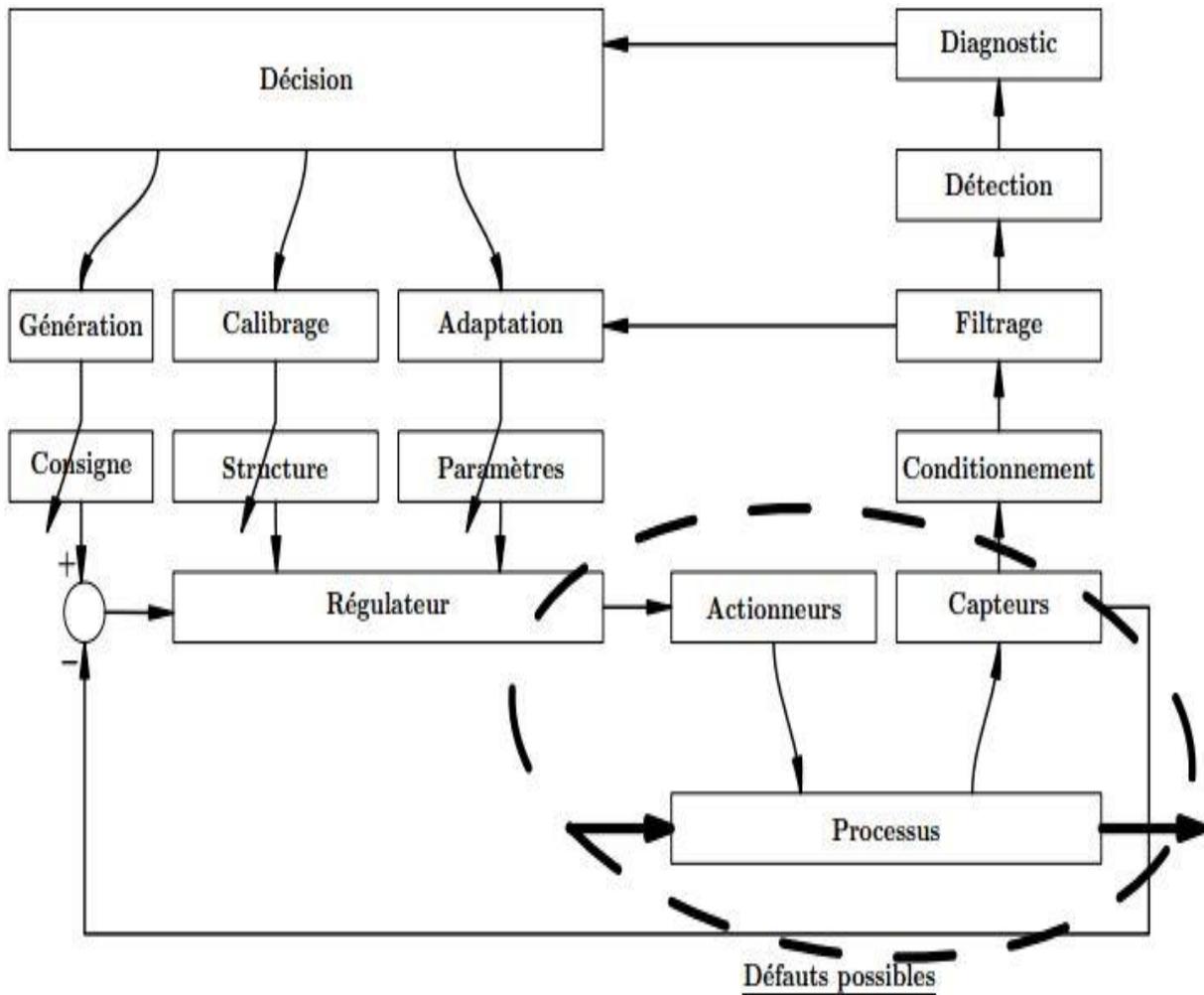


Figure.1.17 : Les différents étaps de diagnostic.

Le but de cette section est de présenter un panorama des méthodes de diagnostic appliquées aux machines électriques. Ces méthodes sont classées en deux grandes catégories, celles qui utilisent un modèle analytique du système et celles qui se dispensent de ce modèle. L'approche analytique est plutôt inspirée par les automaticiens, alors que les communautés du génie électrique et du traitement du signal préfèrent s'intéresser à des méthodes plus heuristiques[24].

Chapitre 1 : Présentation des défauts et des méthodes de diagnostic de la machine asynchrone

1.12 Conclusion

Dans ce premier chapitre on a identifier la machine asynchrone en donnant des informations sur sa composition ainsi que son principe de fonctionnement , dans un deuxieme temps, on a cité les differents disfoctionnements de la machine on les classant en différentes categories de défauts,et on a noté les methodes des daignostic de ses defauts. A la fin une description des étapes de diagnostics de ces darniers a été présenté.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2.1. Introduction

La modélisation de la machine asynchrone a fait l'objet de nombreux travaux, que ce soit dans le but de conception, de la commande ou le diagnostic. La diversité des objectifs a fait paraître plusieurs techniques de la modélisation et des outils de la simulation selon le domaine étudié. Mais ces outils sont souvent trop spécifiques à une topologie ou à une machine bien déterminée. Il serait, cependant, intéressant de disposer d'un outil simple et générique, pouvant servir comme un banc d'essai pour les machines électriques [29]. Dans ce chapitre, nous nous intéressons, alors, à l'élaboration d'un modèle qui tient compte de la topologie, des dimensions ainsi que de la composition de la machine asynchrone, basée sur la méthode des éléments finis.

2.2. Formulation des équations de Maxwell

Les équations de MAXWELL sont la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques de tous dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes de faite que les phénomènes magnétiques et électriques sont couplés [30].

2.2.1. Equation de Maxwell-Faraday

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

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

2.2.2. Equation de Maxwell-Ampère

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par la variation d'un champ électrique ou par les courants électriques.

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2.2.3. Equation de conservation de flux magnétique

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

2.2.4. Equation de Maxwell-Gauss

Un champ électrique est généré par des charges électriques. Le champ électrique est orienté à partir des charges positives vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi relie le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée [29].

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

Avec :

- $\vec{E}(V.m^{-1})$ Champ électrique,
- $\vec{B}(T)$ Induction magnétique,
- $\vec{H}(A.m^{-1})$ Champ magnétique,
- $\vec{J}(A.m^{-2})$ Densité de courant,
- $\vec{D}(C.m^{-2})$ Induction électrique,
- $\rho(C.m^{-3})$ Charge volumique,
- $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}(A.m^{-2})$ Densité de courant de déplacement.

- Ces équations s'appliquent quel que soit le milieu.
- Ce sont des équations locales : elles établissent des relations entre des valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.
- Les distributions de ρ et J sont des distributions réelles et sont supposées connues.
- Les grandeurs E et D , H et B , J et E ne sont pas (respectivement) indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives [31].

Ces lois, caractéristiques du milieu considéré, traduisent la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont données par l'expérience et ne sont que des approximations.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

Des relations supplémentaires doivent venir compléter les équations de Maxwell en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels on les appliquera.

De telles relations sont appelées équations constitutives, qui dans le cas général s'écrivent sous la forme suivante :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.5)$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

\vec{M} (A/m) L'aimantation des aimants.

μ_0 (H.m⁻¹) Perméabilité magnétique du vide.

μ_r Perméabilité magnétique relative du milieu.

μ (H.m⁻¹) Perméabilité magnétique absolue.

2.2.5. Les Conditions de continuité aux interfaces de séparation

Sur une limite de séparation de deux milieux différents notés 1 et 2, on peut trouver des conditions de continuité du type :

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} .

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \cdot \vec{n} = 0 \quad (2.6)$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} , si les courants surfaciques \vec{j}_s existent.

$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \wedge \vec{n} = \vec{j}_s \quad (2.7)$$

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \wedge \vec{n} = 0 \quad (2.8)$$

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} , si les charges surfaciques $\vec{\rho}_s$ existent.

$$(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) \cdot \vec{n} = \vec{\rho}_s \quad (2.9)$$

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

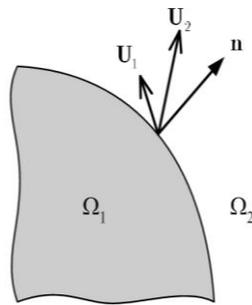


Figure 2.1 : Interface entre deux milieux.

- Ces relations fournissent les lois de réfraction des champs lors du passage d'un milieu à un autre.
- On peut les établir par le calcul en combinant les théorèmes d'analyse vectorielle et les équations de Maxwell aux interfaces.

Il est important de bien garder à l'esprit ces relations, ainsi que les lois globales (théorèmes généraux) énoncées plus haut. On les utilisera pour prédéterminer l'allure des lignes de champ, imposé éventuellement des conditions aux limites, ainsi que pour vérifier les résultats des calculs.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2.2.6. Les lois de comportement des milieux

2.2.7. Le cas du vide

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.10)$$

2.2.8. Les milieux conducteurs : la loi d'ohm

On appelle conducteur tout milieu possédant des charges électriques capables de se déplacer à l'échelle macroscopique sous l'effet d'un champ électrique [31].

Quand un tel milieu est soumis à un champ électrique, les charges électriques (électrons libres dans les métaux) se mettent en mouvement, créant un courant électrique.

Dans les milieux homogènes et isotropes, on admet :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.11)$$

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

Si le milieu est anisotrope, on aura :

$$\vec{J} = [\sigma] \cdot \vec{E} \quad (2.12)$$

Avec $[\sigma]$: tenseur de conductivité électrique.

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

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

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \overrightarrow{J_{eddy}} \quad (2.13)$$

$$\overrightarrow{J_{eddy}} = \sigma \vec{E} \quad (2.14)$$

$\sigma (S \cdot m^{-1})$ Conductivité électrique.

$\vec{J}_s (A \cdot m^{-1})$ Densité de courant provenant des enroulements d'alimentation.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

$\overrightarrow{J_{eddy}}$ ($A \cdot m^{-1}$) Densité de courant de Foucault.

2.2.9. Comportement magnétique des matériaux

Sous l'effet d'un champ magnétique, la matière s'aimante. Quel que soit le milieu, on écrit par définition (dans le système M.S.K.A) :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.15)$$

Où M est la vectrice intensité d'aimantation (A/m).

2.2.10. Comportement diélectrique des matériaux

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (2.16)$$

Avec :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

ε_0 ($F \cdot m^{-1}$) Permittivité électrique du vide.

ε_r Permittivité électrique relative du milieu.

ε ($F \cdot m^{-1}$) Permittivité électrique absolue.

Avec, dans le système d'unités M.S.K.A : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$

Et

$$\varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1 \quad (2.17)$$

Où c'est la vitesse de la lumière dans le vide, soit

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

Donc : $\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{F}{m}$

2.3. Modèle magnétostatique scalaire

Dans ce modèle, on suppose que les courants électriques sont nuls dans la pièce à étudier et que les champs ne dépendent pas du temps. On s'intéresse aux grandeurs \vec{H} et \vec{B} .

On obtient alors les équations de Maxwell qui se réduisent à :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} \quad (2.18)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.19)$$

C'est le cas des dispositifs pour lesquels les champs sont créés par des forces magnétomotrices extérieures et indépendantes du dispositif étudié ou bien par des aimants permanents. Dans ce dernier cas, on dispose de la loi :

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \mu_0\vec{M} \quad (2.20)$$

Dans le cas où la densité de courant surfacique est nulle, la relation (Eq 11.18) implique qu'il existe une fonction potentiel scalaire magnétique Φ telle que :

$$\vec{H} = -\text{grad}\Phi \quad (2.21)$$

On obtient donc l'équation :

$$\text{div}(\mu\text{grad}\Phi) = \text{div}\vec{B} \quad (2.22)$$

2.4. Modèle magnétostatique vectoriel

Comme dans le modèle précédent, on suppose que le champ magnétique est produit par des sources indépendantes du temps.

Le terme $\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$ est alors nul et les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} sont découplés. Par contre, on désire modéliser un objet parcouru par des courants non nuls.

On obtient alors les équations suivantes :

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j} \quad (2.23)$$

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.24)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_0 \vec{M} \quad (2.25)$$

La condition (3.24) permet de définir une fonction potentiel vecteur magnétique \vec{A} telle que :

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (2.26)$$

Pour que \vec{A} soit totalement défini, il faut également fixer la valeur de sa divergence. On ajoute alors la condition :

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \quad (2.27)$$

Qui est la plus simple à mettre en œuvre. Mais cette condition, appelée jauge de Coulomb, n'est pas toujours la meilleure et peut être adaptée afin d'éviter quelques difficultés numériques auxquelles elle peut conduire.

On obtient donc l'équation vectorielle de Poisson :

$$\frac{1}{\mu} \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.28)$$

Pour simplifier, nous allons nous restreindre pour cette étude au cas bidimensionnel. Ainsi, les systèmes considérés, possèdent une symétrie par translation suivant la troisième dimension ou une symétrie d'axe de révolution.

Dans les deux cas, la direction de la vectrice densité de courant \vec{J} doit être perpendiculaire au plan d'étude. Le problème reste donc invariant suivant l'axe oz dans les coordonnées (x, y, z) , ou suivant la révolution d'axe oz dans les coordonnées cylindriques (r, θ, z) .

Dans le calcul suivant, nous ne considérons que le cas d'un système à symétrie par translation, le champ magnétique, présente alors deux composantes suivant les axes \vec{x} et \vec{y} , dans un plan perpendiculaire à \vec{J} , impliquant ainsi qu'une seule composante pour le potentiel vecteur magnétique \vec{A} suivant la direction (z) , qu'on désigne par $A_z(x, y)$.

2.4.1 Coordonnées cartésiennes

Pour un modèle 2D plan décrit dans le système de coordonnées cartésiennes: $B_z = 0$. Ainsi, le potentiel vecteur est défini par :

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

La densité de courant statorique est défini par :

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_z(x, y) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Sachant que :

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

L'induction magnétique \vec{B} contient une composante dans la direction x et une composante dans la direction y :

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} \quad (2.32)$$

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} \quad (2.33)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (2.34)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2.35)$$

Pour toutes les régions, les équations sont :

$$\vec{H}_x(x, y) = \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} A_z(x, y) \quad (2.36)$$

$$\vec{H}_y(x, y) = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} A_z(x, y) \quad (2.37)$$

Nous obtenons l'équation générale de Helmholtz à résoudre dans les différentes régions conductrices de la machine asynchrone à cage d'écurueil :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{ext} \quad (2.38)$$

Avec : $\mu = \mu_0 \mu_r$

L'équation (3-38) peut s'écrire sous la forme d'une équation différentielle partielle :

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

$$-\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_z(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_z(x, y) \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \overrightarrow{J_{ext}} \quad (2.39)$$

2.5. Condition aux limites

Généralement, on rencontre deux types de conditions aux limites :

2.5.1 Condition de Dirichlet

L'inconnue prend des valeurs données sur les bords du domaine on distingue deux types :

a) Dirichlet homogène

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite est considéré égal à zéro : $A=0$.

b) Dirichlet non homogène

Où l'inconnu de l'équation est fixé sur la limite et sa valeur est non nul : $A \neq 0$.

2.5.2. Condition de Neumann

La valeur du gradient sur les bords du domaine de résolution est connue. On distingue deux types :

a) Neumann homogène

La dérivé par rapport a la normal de l'inconnu est nulle: $\frac{\delta A}{\delta n} = 0$.

\vec{n} : Vecteur normale a la limite.

Ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnu sont perpendiculaires à la limite.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

b) Neumann non homogène

Dans ce cas, $\frac{\delta A}{\delta n} = cte \neq 0$ ce qui signifie que les lignes iso-valeurs de l'inconnue forment un angle α avec la limite.

2.6. Application des équations de Maxwell à la MAS à cage

En tout rigueur, tout système électromagnétique est tridimensionnel (3D). Mais les dispositifs électrotechniques classiques privilégient généralement une direction particulière des champs ou des courants : une connaissance précise de la grandeur étudiée dans le plan privilégié associé à une approximation dans la direction orthogonal conduit à l'étude d'un system bidimensionnel (2D) dans le cadre de cette formulation magnétostatique en cartésien (2D) et en supposons le system étudié excité a partir d'une densité de courant \vec{J}_z dirigé selon l'axe (oz) « il en sera de même pour le potentiel magnétique A_z qui sera un scalaire », les équations de Maxwell conduisent finalement à :

$$\frac{1}{\mu} \text{rot}(\text{rot}\vec{A}) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (2.40)$$

Les équations à résoudre dans les MAS à cage sont :

1. Au niveau des barres rotoriques

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_{r_{\text{barres rotoriques}}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_{br} \right] + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.41)$$

2. Au niveau de rotor :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0 \mu_{r_{\text{rotor}}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_r \right] = 0 \quad (2.42)$$

3. Au niveau d'entrefer :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_e \right] = 0 \quad (2.43)$$

4. Au niveau des encoches statoriques :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{A}_{es} \right] = \vec{J}_{\text{ext}} \quad (2.44)$$

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

5. Au niveau du stator :

$$\vec{\nabla} \times \left[\frac{1}{\mu_{\text{stator}}} \vec{\nabla} \times \vec{A}_s \right] = 0 \quad (2.45)$$

2.7. Méthodes de résolution

Il existe plusieurs méthodes pour la résolution des équations aux dérivées partielles, ces méthodes sont analytiques, numériques ou mixtes (semi analytiques).

2.7.1. Méthodes analytiques

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

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

$$A_z(x, y) = A_z(x) \cdot A_z(y) \quad (2.46)$$

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

$A_z(x)$: est une fonction ne dépend que de la variable x .

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

2.7.2. Méthode des éléments finis

Historiquement les premiers développements de la méthode des éléments finis ont été proposés par Richard Courant dans les années 1940, mais ce sont les mécaniciens qui ont développé, popularisé et démontré l'efficacité de cette méthode dans les années 1940-1960.

En 1970, Sylvester et son équipe de l'université MC Gill à Montréal se sont intéressés à l'adaptation de cette méthode de résolution des problèmes elliptiques à l'Electrotechnique [32].

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est fréquemment utilisée pour modéliser précisément et finement des systèmes électrotechniques. Cette méthode permet de tenir compte de la géométrie de la machine et permet une approche systématique des problèmes magnétiques [33].

De plus, un couplage entre les grandeurs électriques, mécaniques, et magnétiques peut être réalisé. Les éléments finis permettent également une étude tridimensionnelle, ce qui apporte une très grande finesse dans la connaissance du système.

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes numériques les plus utilisées actuellement pour résoudre d'une manière efficace les équations différentielles aux dérivées partielles des problèmes physiques [34].

2.7.2.1. La méthode des résidus pondérés

Si on prend l'exemple d'une équation différentielle de type Laplacien :

$$L(\Phi) = 0 \quad (2.47)$$

Sachant que :

L : Laplacien.

Φ^* : La solution exacte.

Φ : La solution approximative

Le résidu est:

$$R = L(\Phi) - L(\Phi^*) \quad (2.48)$$

Cette méthode donc consiste à minimiser le résidu $R = 0$.

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2.7.2.2. La méthode variationnelle

Elle consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système à résoudre. Pour la mise en œuvre de la méthode, il faut suivre les étapes suivantes :

- Le maillage (discrétisation du domaine).
- Choix de la fonction d'interpolation.
- Choix de la fonctionnelle.
- La minimisation : c'est-à-dire mettre le système sous la forme

$$[k] \cdot [u] = [B] \quad (2.49)$$

- Résolution du système algébrique.
- Exploitation des résultats [36].

2.8.Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être définie comme une méthode d'approximation des équations aux dérivées partielles qui régissent les phénomènes physiques et leurs conditions aux limites.

Le principe bien connu de la méthode est de discrétiser le domaine d'étude en de multiples éléments puis de résoudre localement, dans chacun de ceux-ci, les équations associées à la formulation retenue. Les inconnues élémentaires sont alors définies par une combinaison linéaire, pondérée par des polynômes d'interpolation. La précision du calcul est liée à la finesse du maillage et au degré de ces polynômes. Leurs coefficients ne dépendent que de la géométrie et de sa discrétisation.

Finalement, on obtient après assemblage un système matriciel d'équations, pouvant tenir compte de certaines non linéarités, comme celle intervenant dans les matériaux ferromagnétiques [35].

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

2.9.Types d'éléments finis Selon que le domaine d'étude, soit à une, deux ou trois dimensions, on rencontre le plus souvent des éléments linéaires, quadratiques ou cubiques.

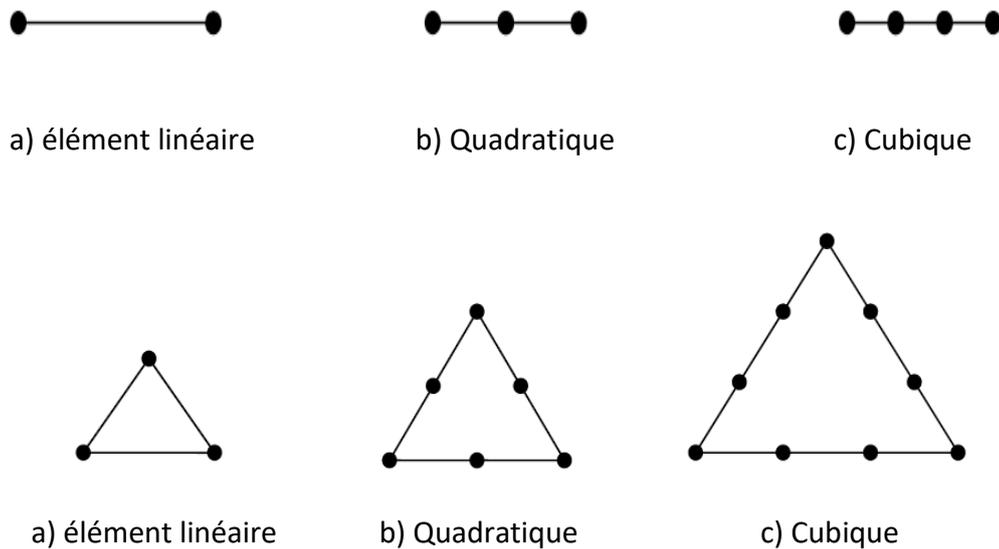


Figure 2.2 : Eléments classiques en une et deux dimensions.

Dans la majorité des cas bidimensionnels, on préfère utiliser des éléments triangulaires du premier ordre. Pour aboutir à une meilleur exactitude de la solution, on procède a raffiner le maillage [33].

2.10. Discrétisation et approximation

L'idée fondamentale de la méthode des éléments finis est de subdiviser la région à étudier en petites sous régions appelées élément finis constituant le maillage.

Les fonctions inconnues sont approximées sur chaque élément fini par une simple fonction appelée fonction de forme qui est continue et définie sur chaque élément seul [37].

La forme des éléments est directement liée à la dimension du problème (2D ou 3D). Pour une géométrie en (2D), on utilise généralement des triangles ou des quadrilatères ; pour une géométrie en (3D), on utilise les tétraèdres, les prismes ou les hexaèdres [38].

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

La discrétisation est une étape importante dans l'analyse par éléments finis car la précision des résultats dépend de la méthode de discrétisation et de la finesse de cette subdivision en sous-domaines [39].

La fonction inconnue est approchée dans chaque élément par une fonction d'interpolation nodale, faisant intervenir les valeurs de l'inconnue aux nœuds de ces éléments ainsi que les coordonnées géométriques de ces nœuds.

Dans le cas du calcul du champ dans les structures électromagnétiques, les éléments de forme triangulaire sont les plus utilisés. Cette subdivision exclusivement triangulaire du premier ordre a l'avantage de s'adapter à toute configuration géométrique et permet de traiter des expressions simples.

2.11. Logiciel de résolution

Les logiciels à éléments finis modernes sont souvent à structure modulaire où les différentes étapes de résolution [34]

- introduction des données géométriques et des propriétés physiques.
- Maillage.
- Résolution.
- Exploitation des résultats.

Sont séquentiellement exécutées. Les modules associés à ces tâches doivent pouvoir être séparément accessibles. Ainsi, une géométrie discrétisée pourra servir à traiter plusieurs cas où seules les sources d'excitation ou les conditions aux limites sont modifiées. Lors d'une optimisation de formes, l'utilisateur doit également pouvoir faire varier un paramètre géométrique sans devoir refaire le maillage ou réintroduire les conditions aux limites.

Toutefois, en utilisant une Méthode des Eléments Finis conventionnelle, il serait difficile de calculer les performances de la machine tenant compte à la fois des courants de Foucault induits dans les conducteurs massifs, des non-linéarités des matériaux magnétiques et des sources externes. C'est dans cette perspective que nous avons opté pour une nouvelle formulation, mieux adaptée pour notre problème : il s'agit d'une méthode dite directe permettant de résoudre simultanément les équations couplées du champ magnétique et des circuits électriques. Cette formulation est implantée dans le logiciel d'éléments finis Flux-2D

2.11.1. Logiciel de simulation flux-2d

C'est un logiciel de modélisation par éléments finis prenant en compte les phénomènes magnétiques et thermiques et permettant des régimes évolutifs. C'est donc un logiciel parfaitement adapté à nos besoins. Nous ne détaillerons pas son fonctionnement car des tutoriaux sont très bien conçus et ce n'est pas le propos [29].

Le logiciel permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur, pour des dispositifs bidimensionnels ou à symétrie de révolution comportant des matériaux à caractéristiques linéaires ou non, isotropes ou non. C'est un logiciel complet ayant l'avantage de permettre le couplage avec les équations de circuits ainsi que l'ajout d'une région surfacique particulière dite « bande de roulement » pour l'étude des machines tournantes avec différentes positions du rotor, sans avoir à modifier la géométrie et le maillage [34].

La résolution d'un problème fait appel à des modules spécialisés [34], [35]:

2.11.1.1 . Module pré-procésseur

Permet, à travers plusieurs modules, de définir la géométrie du dispositif à étudier (PREFLU), de choisir et/ou de construire une banque de matériaux (CLSMAT), d'affecter les propriétés physiques aux différentes régions géométriques prédéfinies (PROPHY) et de définir le schéma et/ou les données du circuit électrique (CIRFLU). Il permet également un maillage automatique d'une géométrie 2D prédéfinie (PREFLU).

2.11.1.2. Module processeur

Constitué principalement d'un module de résolution 2D (SOLVER_2D) des différents modèles usuels de l'électromagnétisme et des problèmes thermiques.

2.11.1.3. Module post-processeur de Flux-2D (PostPro_2D)

Permet, entre autres, de tracer les équipotentielles ou les lignes de flux, le maillage, la géométrie et les courbes 2D ou 1D selon un chemin prédéfini. Il permet aussi de calculer des grandeurs globales telles que le couple ou la force appliqués à un contour fermé, les inductions, les flux, les inductances, etc.

De façon générale, l'enchaînement des programmes de Flux-2D, doté d'une interface de Windows est schématisé par la figure (2.2).

Chapitre 2 : La Modélisation d'une machine asynchrone par la méthode des éléments finis

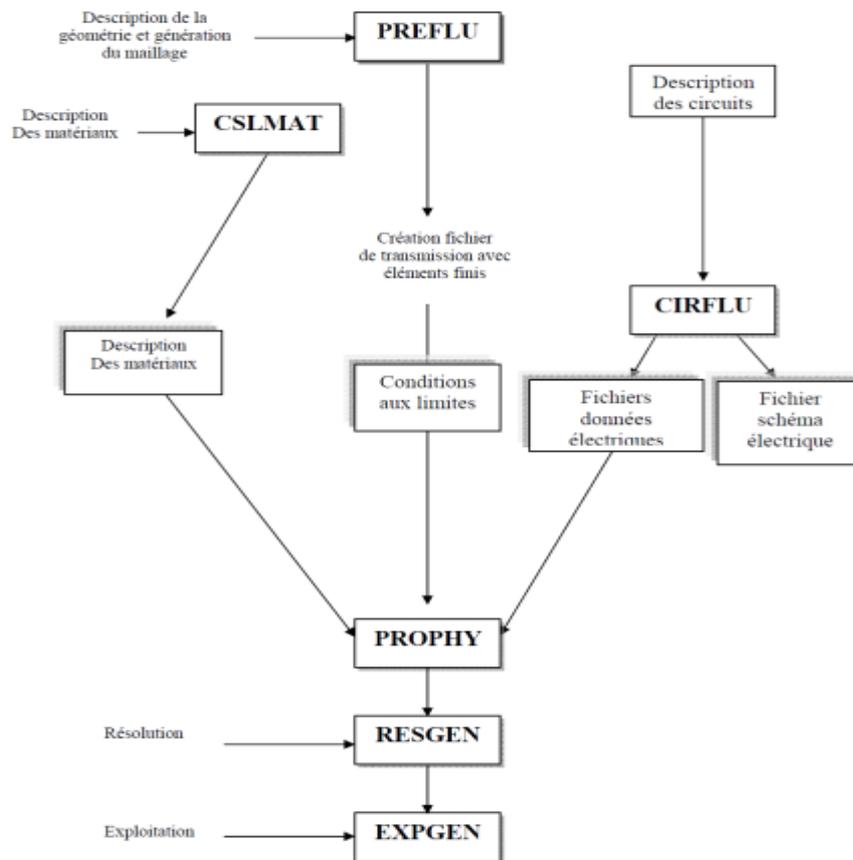


Figure 2.3 : Schéma des différents modules du logiciel Flux-2D

On utilisera le logiciel flux sous sa forme 2D bien que l'inclinaison des encoches ainsi que les effets d'extrémités nécessiteraient pour une étude précise une présentation 3D. Les raisons de ce choix sont simples [36] :

- Le temps de simulation est bien plus long encore en 3D qu'en 2D.
- L'influence de l'inclinaison des encoches n'est pas le but principal de notre étude.
- Les effets d'extrémités sont modélisés par des inductances et résistances calculées de façon analytique. Cette méthode semble relativement précise si l'on la compare à des simulations sous Flux3D.

2.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés au modèle magnétostatique qui permet de calculer la distribution du champ magnétique et les performances électromagnétiques en régime permanent d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

Le choix d'une formulation 2D en termes de potentiel vecteur magnétique est dû au fait, comme cela a été signalé, qu'elle permet de calculer la distribution du champ magnétique en présence des courants électriques. Pour résoudre l'équation de la magnétostatique, nous avons présenté la formulation éléments finis basée sur la méthode de Galerkin qui permet d'aboutir à un système algébrique symétrique, donc plus simple à résoudre

Chapitre 3 : Résultats des simulations de la machine asynchrone

3.1. Introduction

Les résultats des simulations et les interprétations appropriés vont être présentés dans ce troisième chapitre du mémoire, ce qui représente le fruit de nos simulations sur la machine asynchrone à savoir la simulation magnétodynamique qui contient principalement des facteurs globaux dans les deux régimes étudiés ainsi que la simulation graphique.

3.2. Application et simulation de la MAS

On obtient une machine asynchrone à partir du rembobinage de la machine asynchrone qui a les caractéristiques suivantes :

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Stator	Nombre de phases	3	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	120	Mm
	Diamètre externe	212	Mm
Rotor	Diamètre externe	119	Mm
	Diamètre interne	40	Mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.5	Mm
	Nombre de barres	32	

Tableau 3.1 : Caractéristiques statoriques et rotoriques de la machine asynchrone.

3.2.1. Description de la géométrie

Le domaine de la machine étudiée est réduit par l'utilisation des symétries existantes et la définition d'une limite à l'infini. Ensuite, le système réduit est décrit par des régions surfaciques délimitées par des lignes s'appuyant sur des points définis par l'utilisateur.

Une région particulière est la bande de roulement située dans l'entrefer de la machine, elle permet de modifier la position angulaire du rotor par rapport au stator pendant la résolution en évitant tout remaillage par l'utilisateur; elle seule est remaillée automatiquement à chaque nouvelle position angulaire. Son utilisation permet une diminution significative du

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

coût de calcul des simulations des régimes transitoires, à vitesse de rotation non nulle, décrits par la formulation magnétoévolutive.

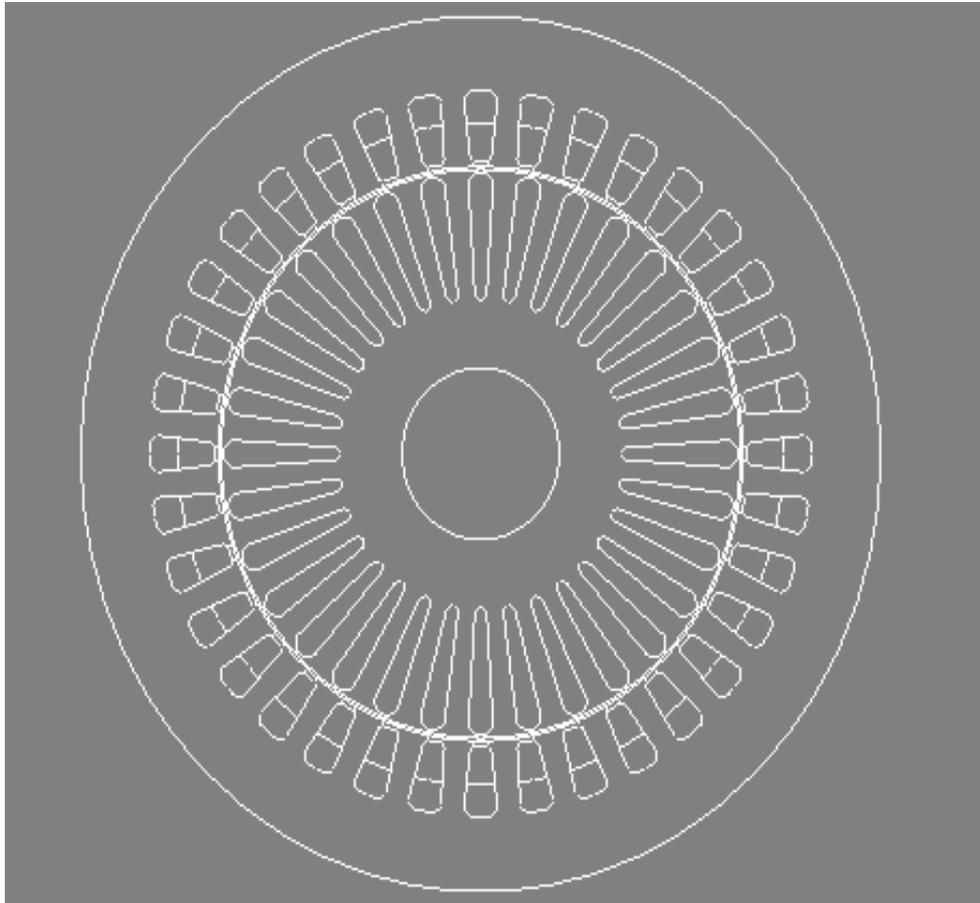


Figure 3.1 : La géométrie de la machine asynchrone

La forme et les dimensions des encoches de stator et de rotor sont montrées sur la (figure 2.5)

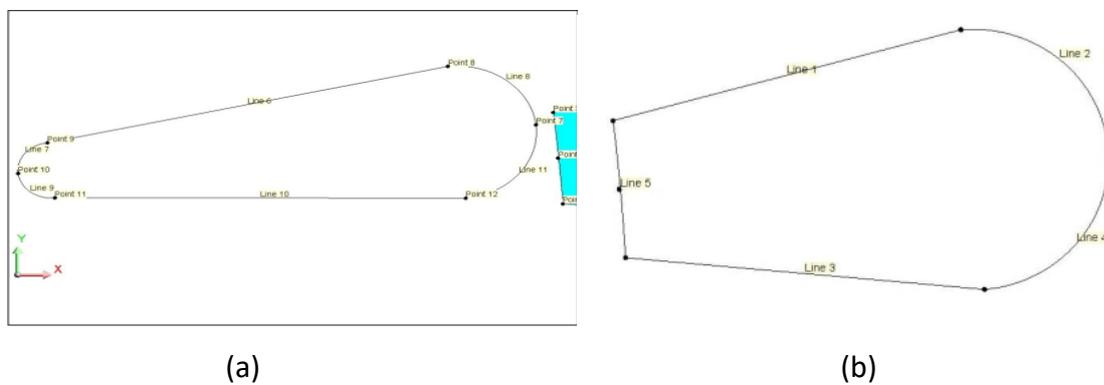


Figure 3.2 : Dimension des encoches, **a)** l'encoche statorique, **b)** l'encoche rotorique

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

La (figure3.6) définir le domaine de calcul du champ électromagnétique dans la machine.

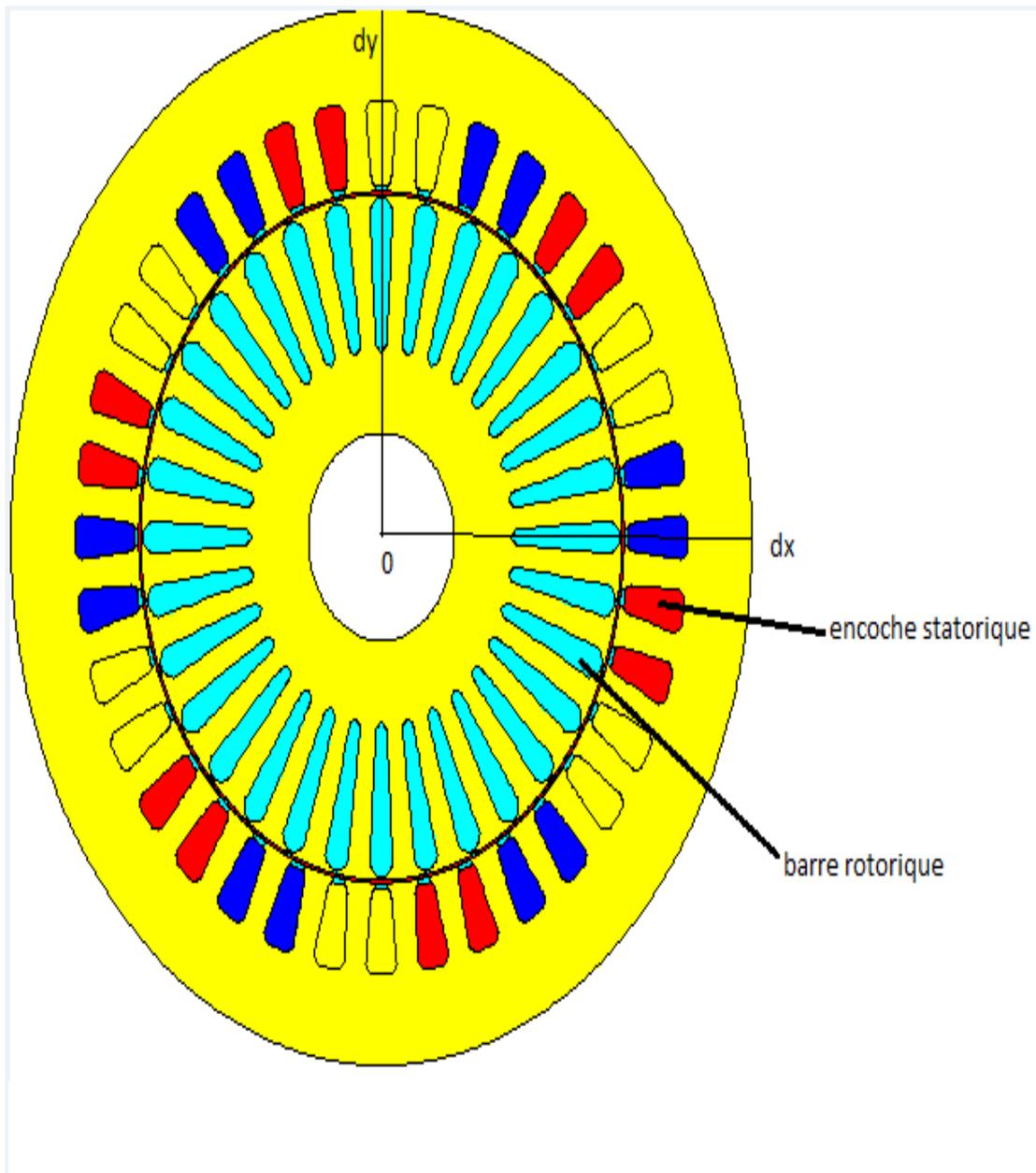


Figure 3.3 : Affectation des régions superficielles

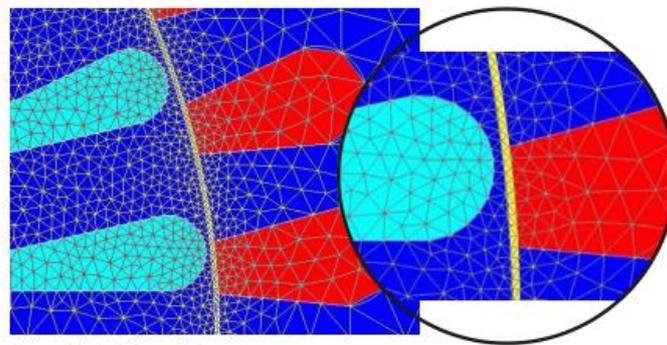
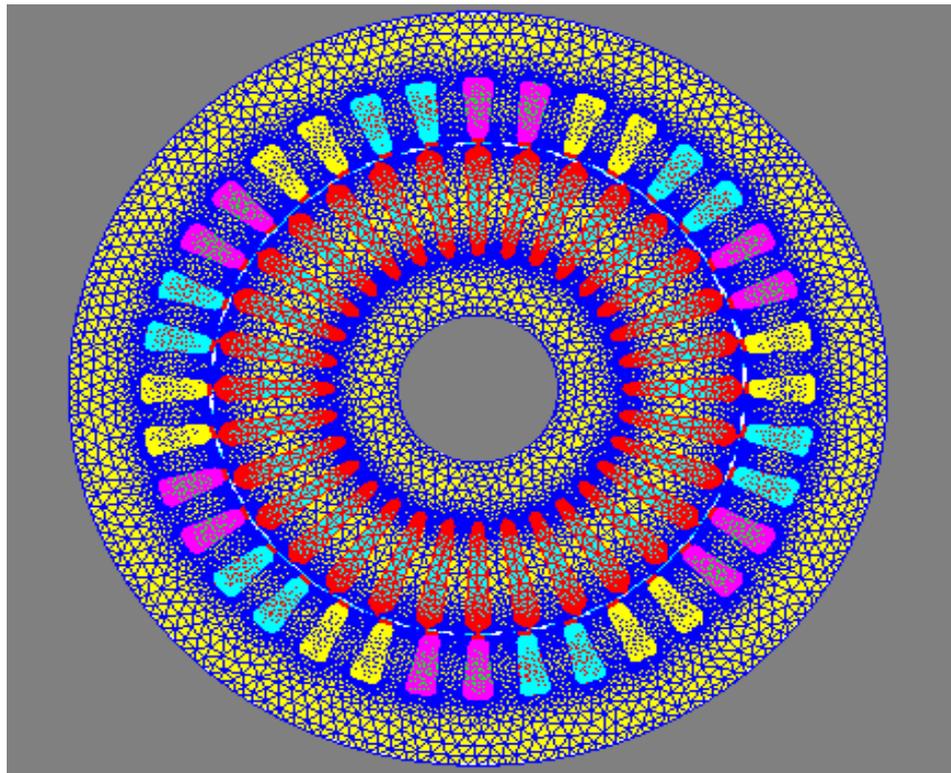


Figure 3.4 : Répartition du maillage.

Le maillage est plus dense au voisinage de l'entrefer puisque dans cette région se développe l'énergie électromagnétique. Par contre le maillage est plus grossier vers l'arbre et vers l'extérieur de la culasse pour alléger les temps de calcul sans perte sensible d'information. La carcasse externe de la machine étant conductrice et généralement reliée à la terre.

3.2.2. Matériaux conducteurs

Pour les conducteurs statoriques, on supposera qu'ils se répartissent de façon uniforme dans les encoches, on affectera à cette région la résistivité du cuivre pour une température donnée des enroulements, le foisonnement et le nombre de spires par encoche. Au niveau de rotor, nous utiliserons la résistivité de l'aluminium à température fixe [36].

Chapitre 3 : Résultats des simulations de la machine asynchrone

3.2.3. Matériaux magnétiques

Pour ce qui est des propriétés magnétiques des matériaux ferreux, on prendra en compte la non-linéarité des caractéristiques B(H) (Tableau 2.2)

Point number	H (A/m)	B (Tesla)
1	0.00	0.00
2	129.50	0.50
3	243.25	1.10
4	1850.00	1.60
5	3700.00	1.70
6	9900.00	1.85
7	22100.00	2.00
8	43000.00	2.10

Tableau 3.2 :B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN [42assim]

La courbe B(H) du circuit magnétique est représentée ci-dessous.

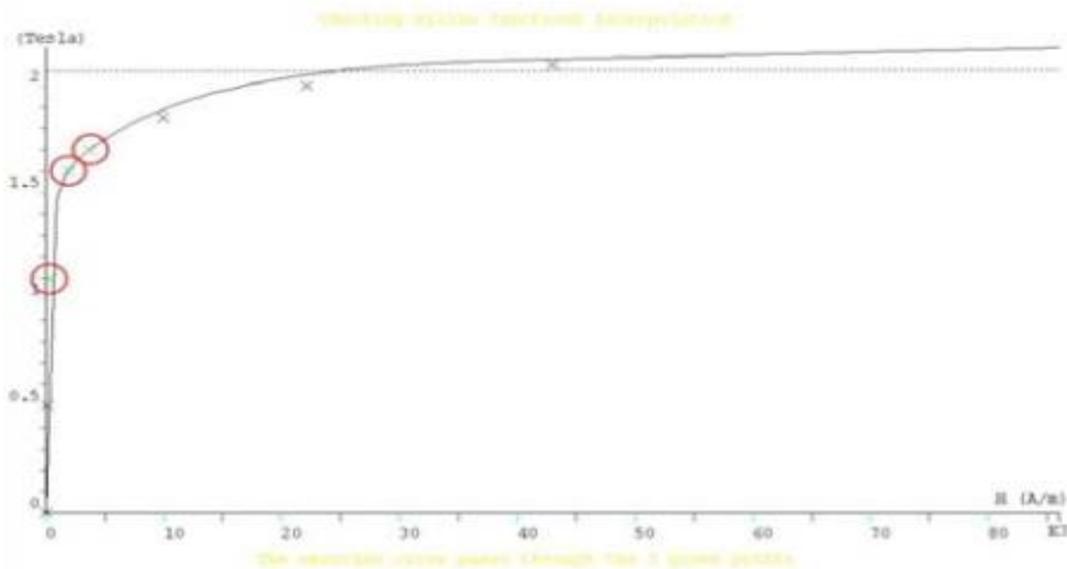


Figure 3.5 : Caractéristiques B(H) du matériau magnétique STEEL_NLIN

3.2.4. Couplage avec les équations de circuit

Pour représenter fidèlement le moteur, il faut tenir compte des effets d'extrémités (inductance, résistance de tête de bobine et d'anneau de court circuit).

Le circuit électrique, (Figure 2.9) , représentant : les sources de tension d'alimentation (V1, V2, V3), Les bobinages statoriques (B1, B2, B3, B4, B5.....B36), les Inductances , (L1 ,L2, L3), les résistances(RA1, RA1, RA1).

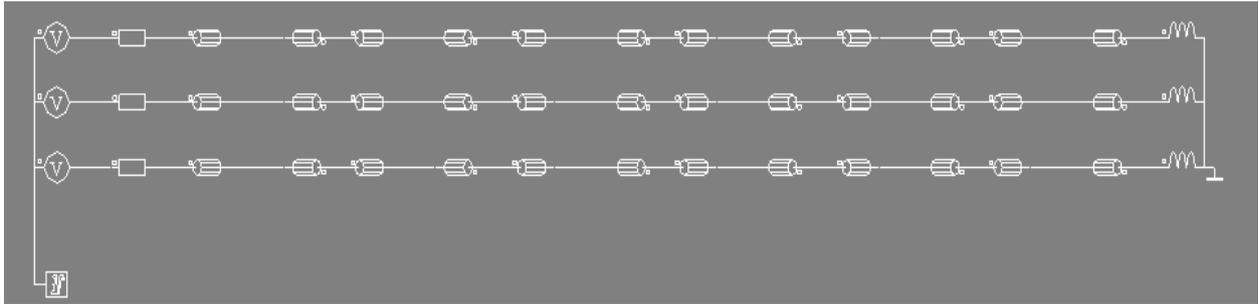


Figure 3.6 : Circuit représentant les effets d'extrémités liés à la géométrie.

Q1 : est un macro-circuit (un dispositif du logiciel Flux 2D®) utilisé pour modéliser la cage d'écurie de la machine, c'est un circuit fermé contient des barres rotoriques.

3.3. Résultats de simulation par la magnétodynamique

3.3.1. Caractéristique de simulation en magnétodynamique

Dans ce mode de fonctionnement, il faut déterminer les valeurs de la fréquence d'alimentation et du glissement. On utilisera le couplage avec les équations de circuit qui permettent de simuler les courts-circuits de la cage.

On rappelle les avantages et les inconvénients de la magnétodynamique [29] :

a) Avantages :

- Simplicité de mise en œuvre.
- Gain de temps et d'espace mémoire par rapport à la résolution évolutive
- la prise en compte des courants induits.

b) Inconvénients :

- utilisation possible uniquement pour le régime permanent.
- Toutes les grandeurs sont supposées sinusoïdales dans le temps et à même fréquence.
- Le mouvement du rotor n'est pas «physiquement» pris en compte. Cela aboutit à des courants statoriques parfois déséquilibrés car les harmoniques des espaces ne sont pas prises en compte.

Les simulations magnéto-harmoniques de Flux2D® de la machine asynchrone double étoile sont effectuées pour des valeurs constantes de glissement (valeurs constantes de vitesse rotoriques).

Les résultats des simulations magnétodynamiques dépendent de la position relative de

rotor-stator, prise en compte par la simulation, « la position initiale du rotor ». Ainsi nous avons déterminé la position relative de rotor-stator pour laquelle le couple électromagnétique est égal à la valeur moyenne. "La position initiale" du rotor représente des données d'entrée pour le processeur de SOLVER_2D de Flux2D®.

3.4. Résultats graphiques

Le résultat de simulation ci-dessous représente : la répartition des lignes du champ magnétique (figure 3.7) et l'induction dans le circuit magnétique (Figure 3.2)

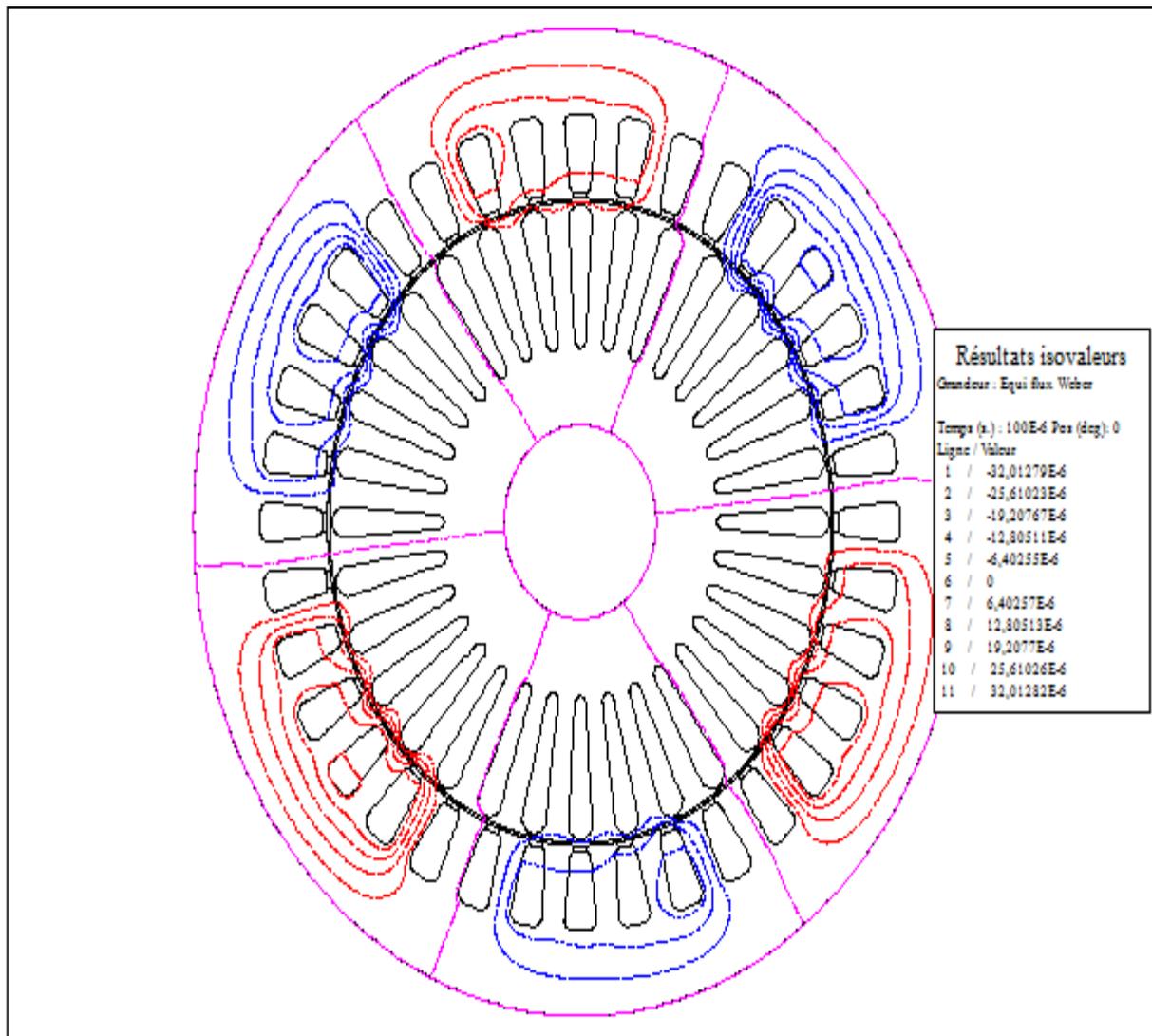


Figure 3.7 : Répartition des lignes du champ magnétique pour le fonctionnement nominal

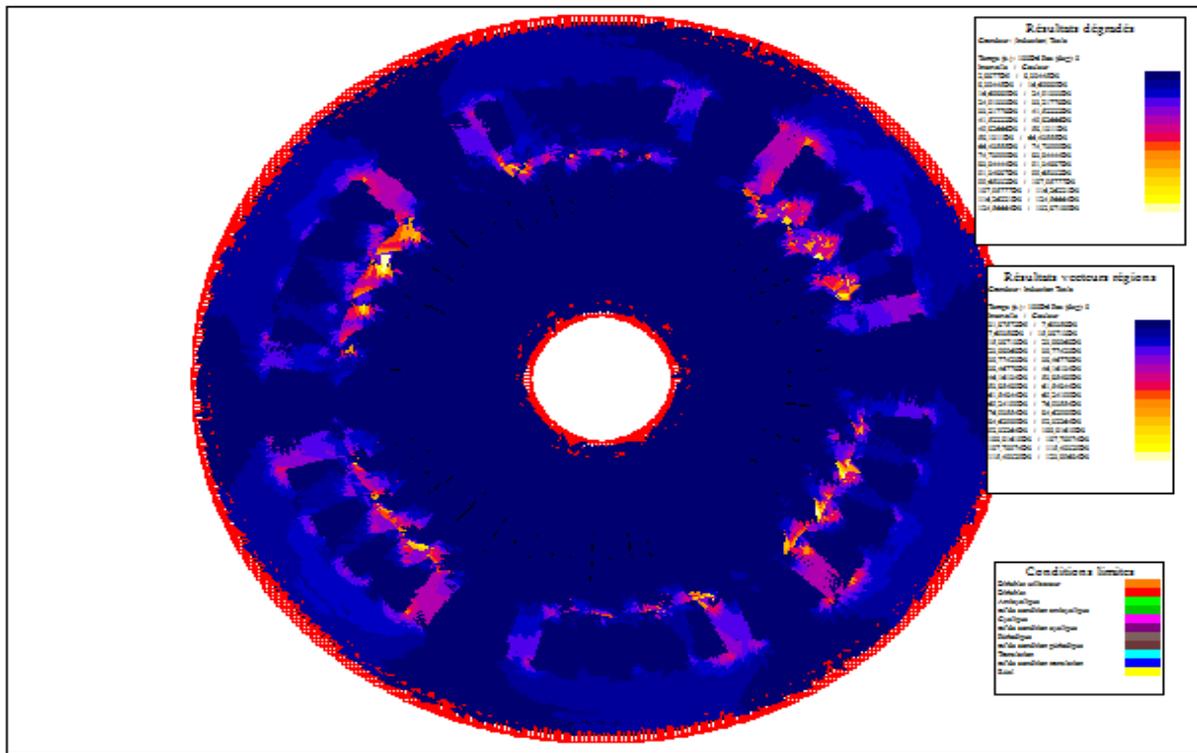


Figure 3.8 : Induction magnétique pour le fonctionnement nominal

Nous remarquons bien la présence d'une paire de pôles. La distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles. Les lignes du champ entre le stator et le rotor sont légèrement déviées dans le sens de rotation du rotor. La répartition de l'induction est, elle aussi, quasi-symétrique.

3.5. Simulations des comportements de la MAS

3.5.1. Fonctionnement sain de la Machine asynchrone

Nous avons présenté l'évolution des grandeurs locales (les lignes du champ magnétique, l'induction magnétique) et les grandeurs globales (Les courants, le couple électromagnétique, la vitesse). Les simulations par logiciel FLUX-2D sur machine saine, a donné les résultats suivants

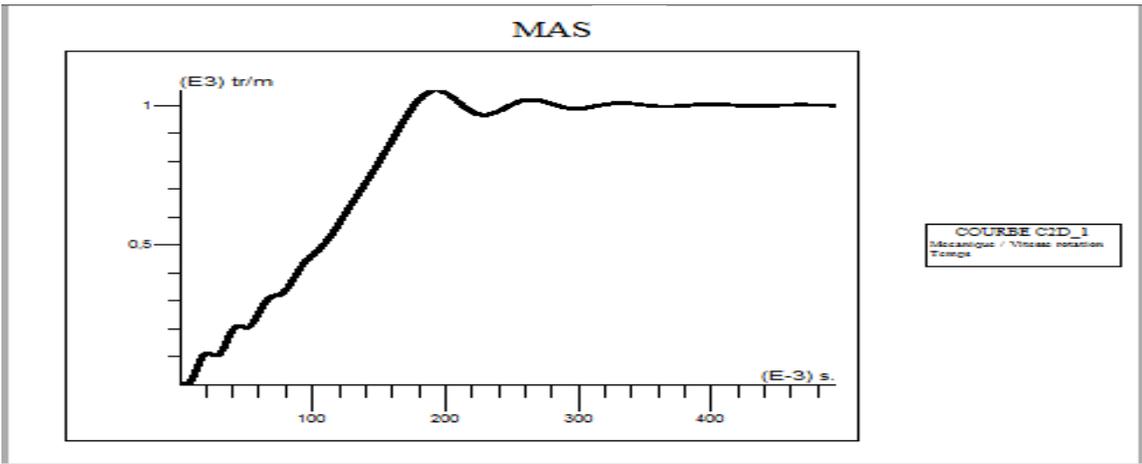


Figure 3.9 : Vitesse de rotation

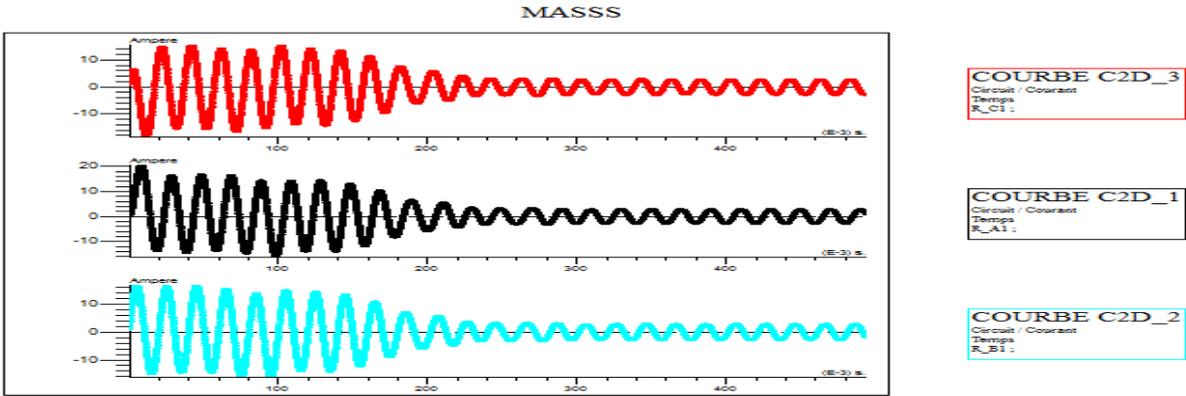


Figure 3.10: Les Courants statoriques juxtaposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1

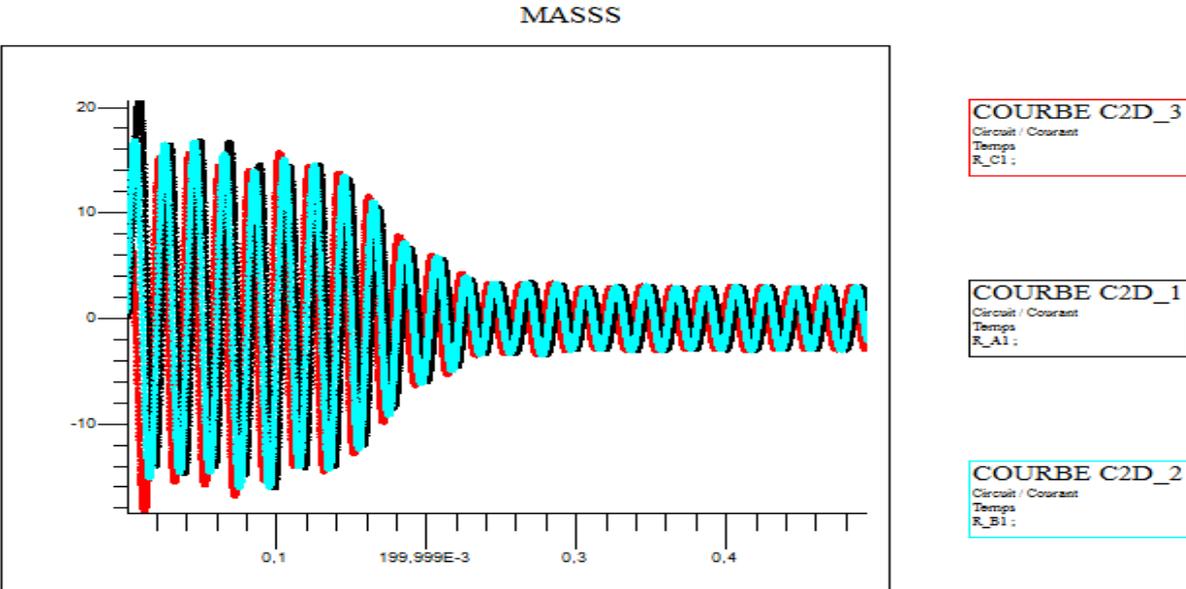


Figure 3.11 : Les Courants statoriques superposé au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1

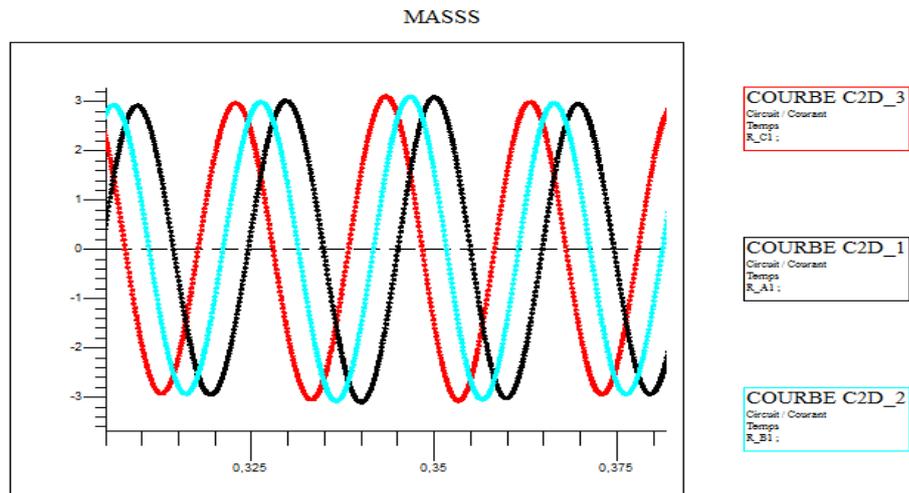


Figure 3.12: Zoom des Courants statoriques superposés au niveau des résistances ; R-A1 ,R-B1, R-C1

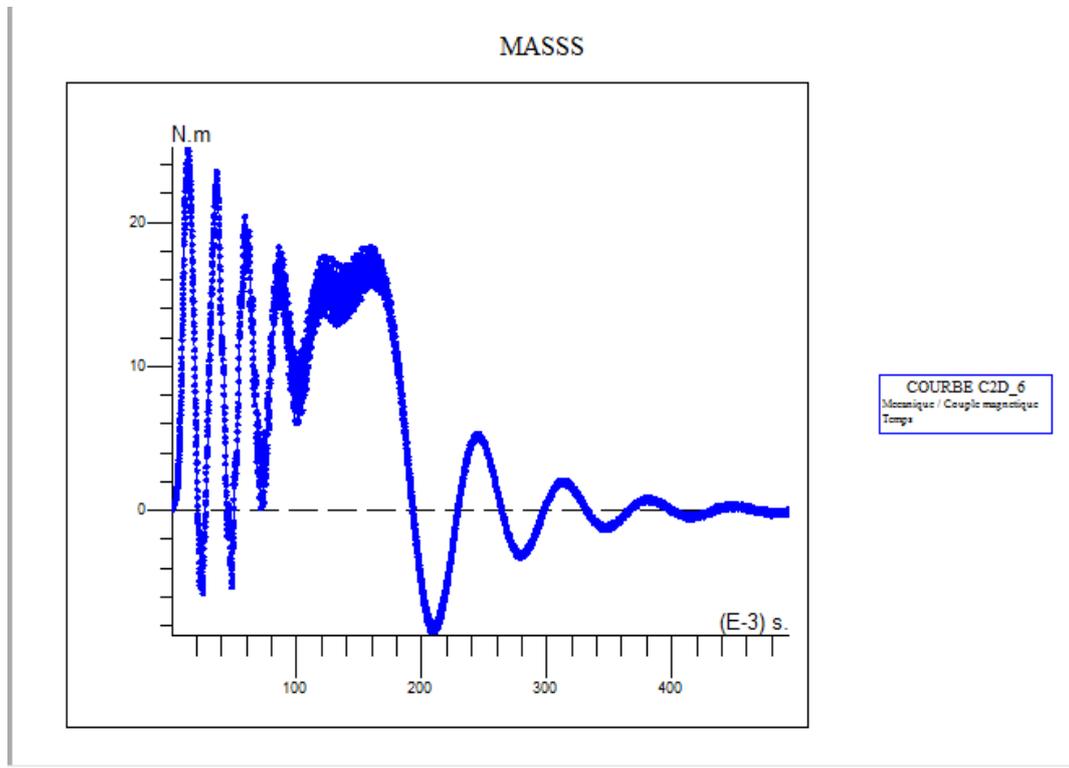


Figure 3.13 : Couple électromagnétique

3.5.1.1. Interprétation

Les figures représentent les résultats de simulation de la machine asynchrone à vide

Au régime transitoire le couple atteint 25 Nm puis il commence à descendre pour atteindre une valeur nul puisqu'il n'y a pas de charge.

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

On remarque un fort appel de courant au démarrage, il atteint des valeurs qui arrivent jusqu'à 6 fois sa valeur nominale.

La vitesse atteint, la vitesse du synchronisme (999 rad/s) après le régime transitoire qui dure environs 0,3s

3.5.2. Fonctionnement en présence de défaut (Court –circuit)

Dans le cas de la présence de défauts dans la machine asynchrone

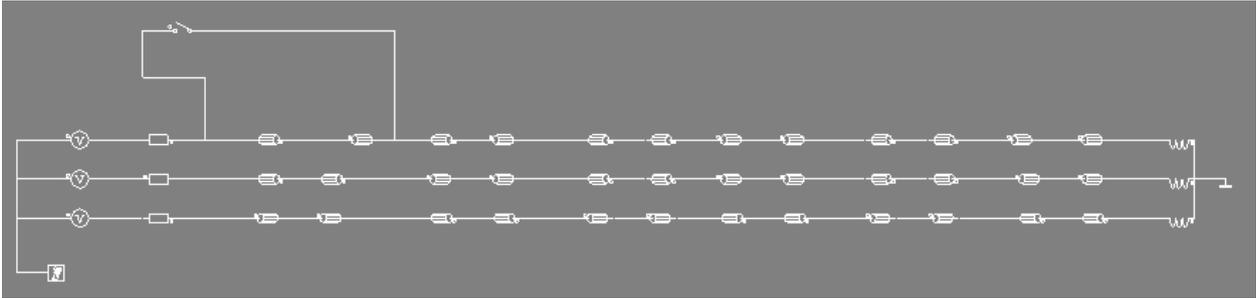


Figure 3.14 : Circuit équivalent en présence de défaut

on a obtenu les résultats suivants.

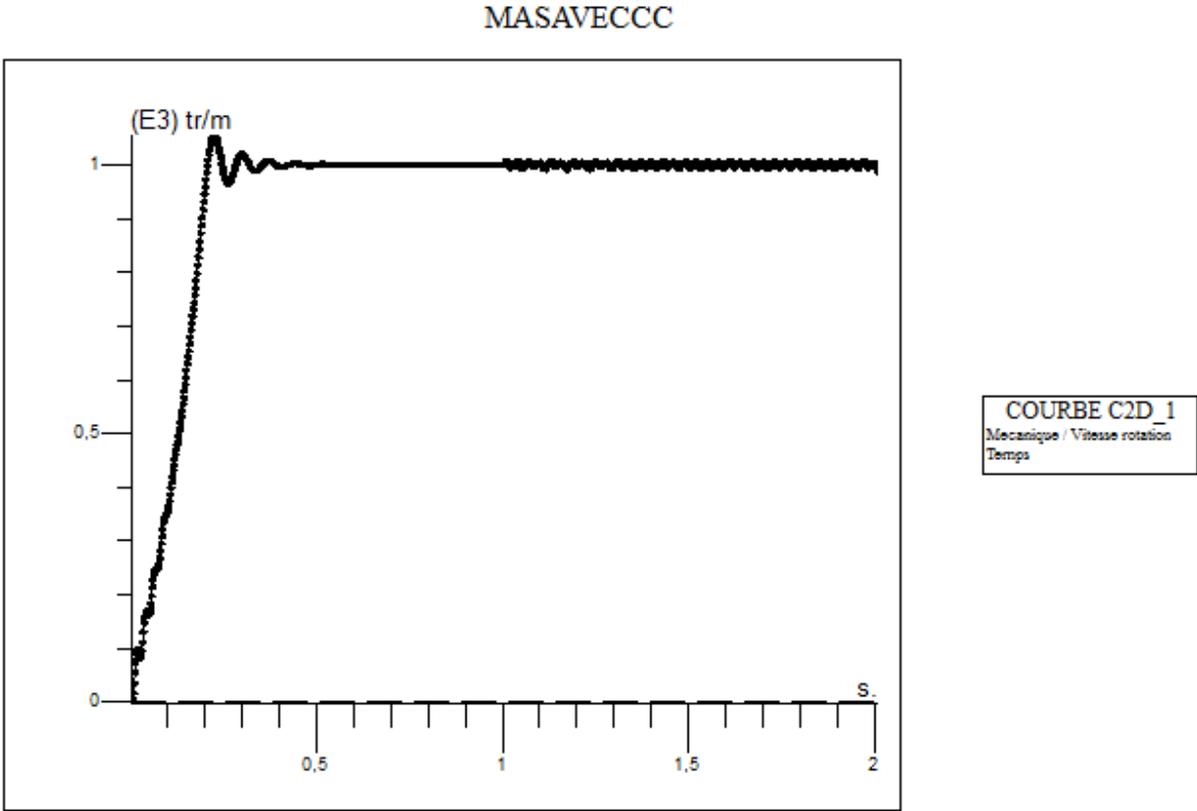


figure 3.15 : la vitesse de rotation en cas de défaut

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

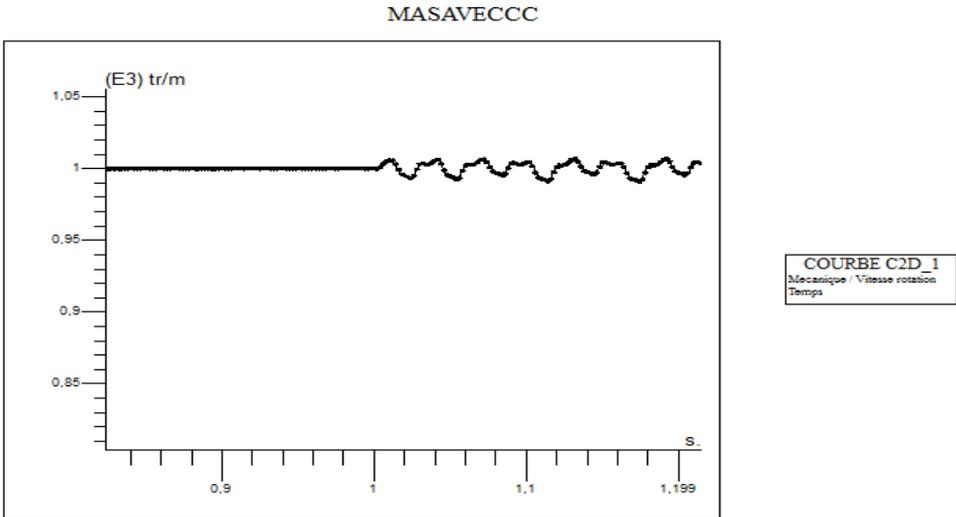


figure 3.16 : zoom de la vitesse de rotation en cas de défaut

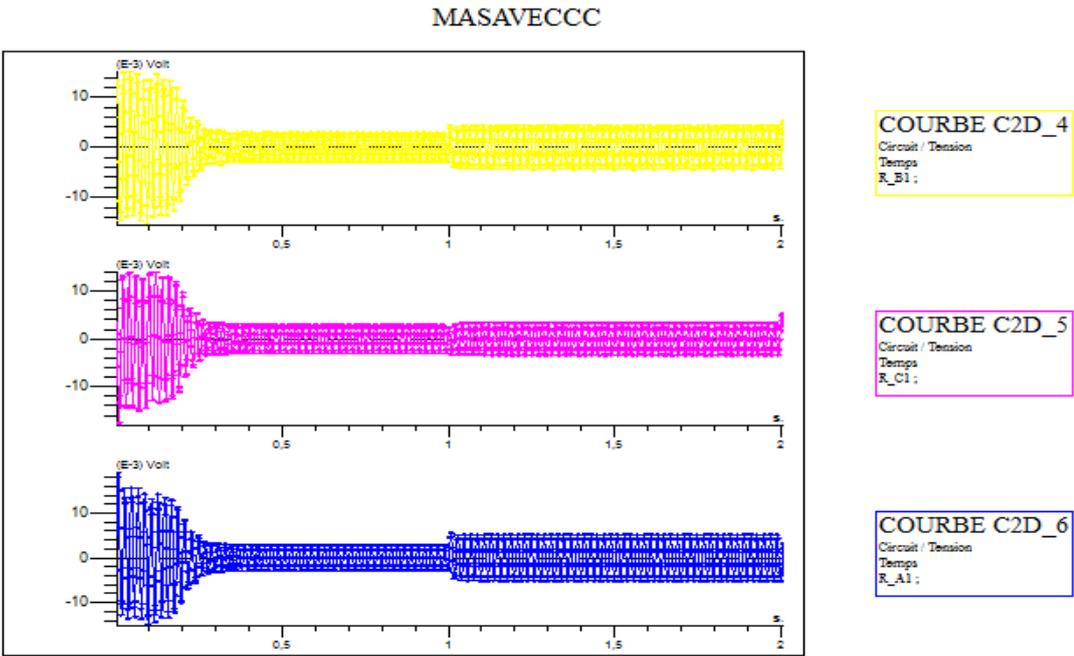


Figure 3.17 : Les Courants statoriques juxtaposé en cas de défaut

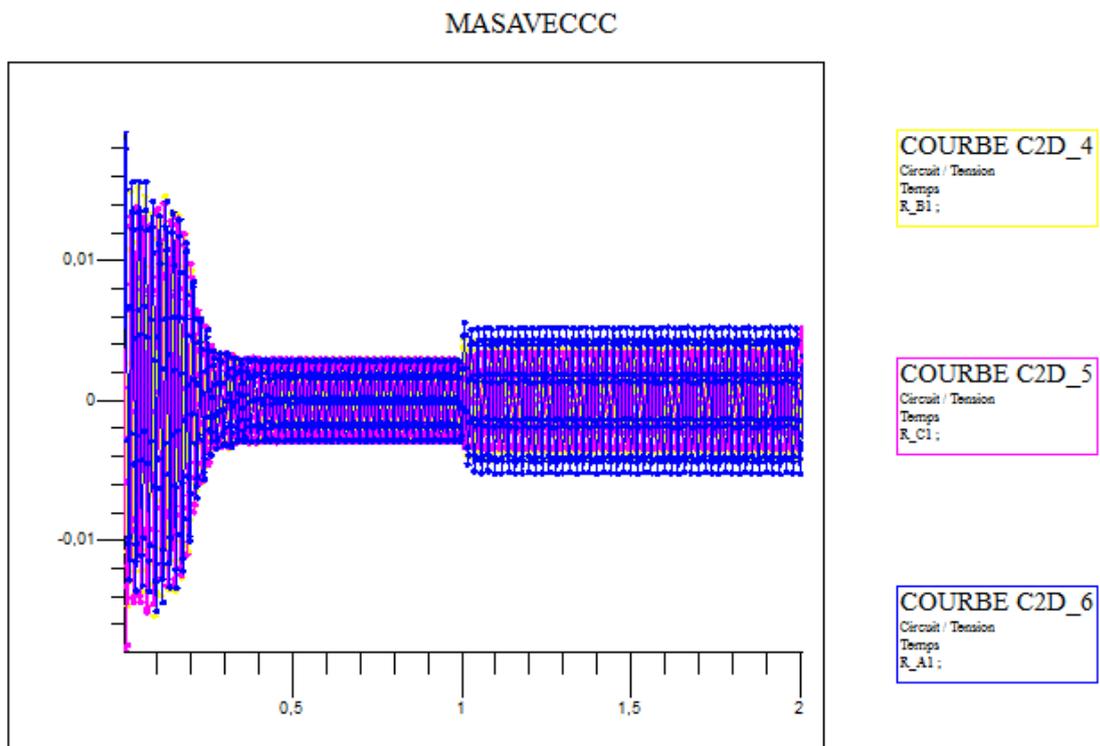


figure 3.18 : Les Courants statoriques superposés en cas de défaut

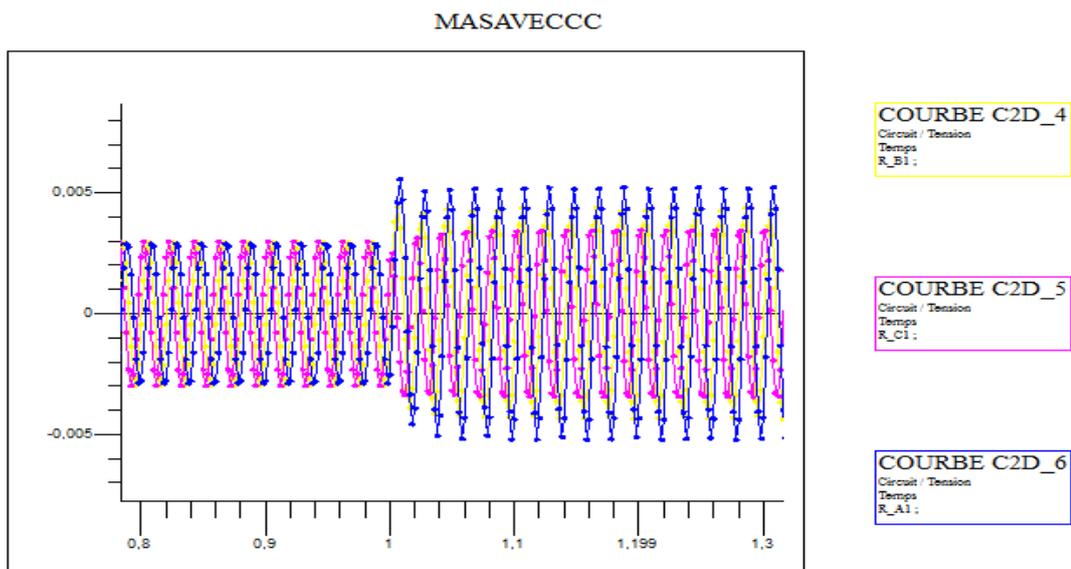


figure 3.19 : Zoom des Courants statoriques superposés en cas de défaut

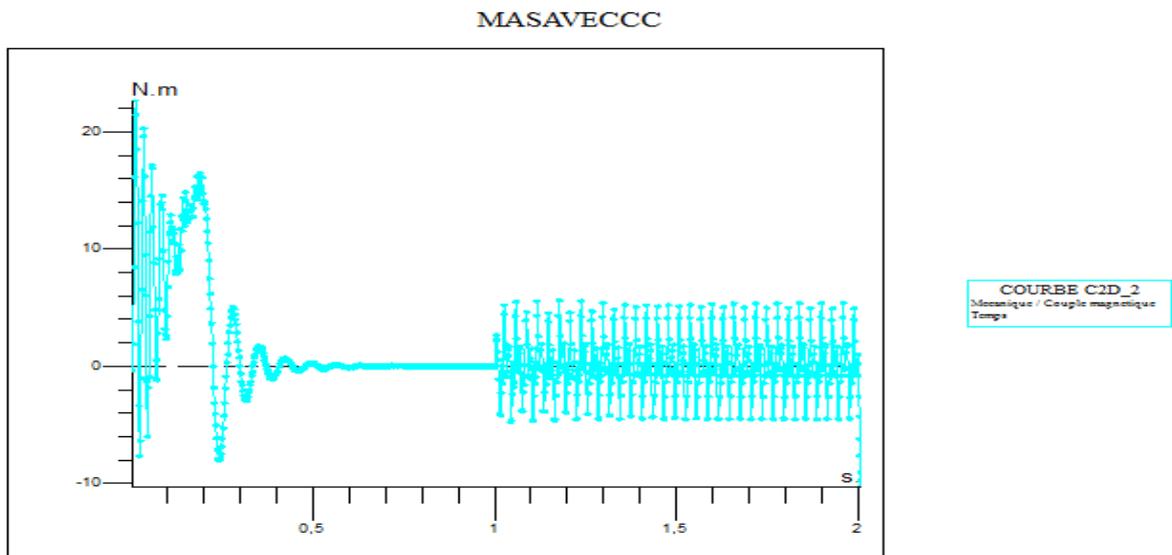


figure 3.20: Le Couple electromagnétique en cas de défaut

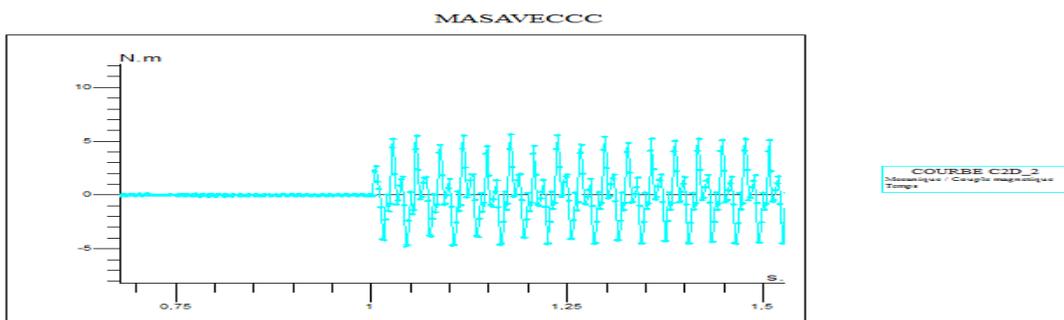


Figure 3.21 : Zoom du Couple electromagnétique en cas de défaut

3.5.2.1. Interprétation

On remarque que le régime transitoire est oscillatoire est dure (0.25s) pour les différentes grandeurs de la machine.

La vitesse atteint une valeur proche de (1015 tr/min). Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale de (20 N.m) au régime transitoire, on note que les courants statoriques ont une valeur importante au démarrage avant la convergence vers de faible valeur due à l'effet réactif de la MAS. Lorsque qu'il y a apparition de défaut (1 s), nous remarquons que la machine répond à cette perturbation, par une diminution de la vitesse tandis que le couple électromagnétique augmente et prend une valeur de (5 N.m).

On constate également que l'amplitude du courant dans la phase la plus infectée est plus grande que celles des autres phases (augmenté dans les phases A, B et diminué dans la phase C).

Chapitre 3 : Résultats du simulations de la machine asynchrone

Le couple électromagnétique ainsi que la vitesse de la machine asynchrone en situation de défauts de court-circuit statoriques ont des valeurs sensiblement égales à celles en régime sain. Mais, on remarque que ces signaux sont bruités pendant l'apparition du défaut.

Lorsque des spires sont en court-circuit, l'inductance propre d'une phase statorique infectée change, et par conséquent les autres courants de phases changent à cause du couplage magnétique. Plus le nombre de spires en court-circuit est important, plus l'augmentation du courant est plus significative.

3.6. Conclusion

L'étude des moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil dans les deux cas de fonctionnement sain (sans défaut) et dégradé (avec défaut) nous exige plusieurs essais réels sur ces derniers (plusieurs puissances, différents défauts) mais le coût de ces essais est onéreux chose qui nous a contraint à procéder à une conception des modèles consistants et proche du moteur réel et qui nous a permis d'étudier ce dernier.

Introduction général

Introduction générale

La machine asynchrone est très utilisée dans l'industrie grâce à ses nombreuses qualités tels que : sa robustesse, son coût de fabrication relativement faible et un système d'entretien minimum. Dans certains cas d'utilisations des moteurs asynchrone, on ne tolère pas les pannes de fonctionnement qui peuvent endommager tout le système, ces pannes peuvent avoir différentes origines, à savoir : mécanique (excentricité du rotor, défaut sur accouplement, défauts des roulements, ...) ou électrique et magnétique (court-circuit dans les bobinages statoriques, cassures des barres ou de portions d'anneaux de court-circuit, cassure de dents,).

D'autres imperfections peuvent aussi être dues également aux éléments de l'entraînement comme les défauts dans l'alimentation, dans la charge ou dans les réducteurs mécaniques.

Lorsqu'un dysfonctionnement se produit dans la machine asynchrone, il peut ne pas provoquer l'arrêt immédiat de cette dernière, mais ça affecte directement ses performances telles que la vitesse, les courants et le couple électromagnétique. Ces défauts de fonctionnement doivent être diagnostiqués, pour ce faire plusieurs méthodes ont vu le jour, dans notre étude on s'intéresse à la méthode des éléments finis.

Ce mémoire présente les différentes étapes de notre travail, tout d'abord, dans le premier chapitre on donne une synthèse des connaissances actuelles concernant la machine asynchrone en indiquant les différents types de défauts qui sont susceptibles de se produire lors du fonctionnement de la machine en question. Dans le deuxième chapitre, on définit la méthode de diagnostic des défauts de la machine, qui est une méthode par éléments finis. Des exemples de calculs et des cas particuliers sont présentés.

Enfin, le troisième chapitre regroupe les résultats de notre travail en donnant les interprétations appropriées, aussi, toutes les étapes du diagnostic des défauts de la machine asynchrone qu'on a effectués sont clairement montrés dans ce dernier chapitre. Une conclusion générale qui englobe les fruits de notre étude est présentée à la fin de ce manuscrit.

Bibliographie

- [01] **A. Bouzida** .diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique des ondelettes. Thèse de Magister .Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Algérie 2008
- [02] **A. Allal**. Grandeurs non invasives pour le diagnostic des machines électriques. Thèse de Magister .Université Ferhat Abbas de Sétif .Algérie 2010.
- [03]. **Gaëtan Didier** « modélisation et diagnostic de machine asynchrone en présence de défaillances » thèse de Doctorat, université Henry Poincaré, Nancy I , octobre 2004.
- [04] **Radouane BOUSSEKSOU** modélisation analytique des machines asynchrones 2007
- [05]. **MERABET AHMED - RECHDANE MOHAMM**. Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence des Défauts Statoriques. Universities Bordj Bou Arreridj. Algérie 2010.
- [06] **achor abdelmalak** réglage par moda glissant d'une machine asynchrone M'SILA 2004-2005
- [07]**BOURDIM SAMIA** «Méthodes ondelettes et Bayésiennes pour le diagnostic : Application aux machines asynchrones» Mémoire de Magister 2011. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF UFAS (ALGERIE)
- [08] **V .Perrier** Idée de la base Application de la théorie des ondelettes, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [09] .Technique de l'ingénieur 2009.
- [10] **M. Misiti. Y. Misiti. G. Oppenheim. J. M. Poggi**. Wavelet Toolbox for Use with MATLAB 2010.
- [11] **BOURDIM SAMIA** Contribution au diagnostic des générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Thèse de Doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna.2015
- [12] **S. Mallat** "A wavelet tour of signal processing" a Harcourt science and technology company Elsevier (USA), 1999.
- [13] **R. Polikar** "The story of wavelets" Rowan University, 1994.
- [14] **H-G. Stark** "Wavelets and signal processing" University of Applied Sciences, ISBN 3- 540-23433-0, Springer, Germany, 2005.

- [15] **M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J.M. Poggi** “ Wavelet Toolbox for use with MATLAB ” by The MathWorks, 2002.
- [16] **Z.K. Peng, F.L. Chu** “Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography” *Mechanical Systems and Signal Processing* journal. Vol.18, pp: 199–221, 2004.
- [17] **B. Tang, T. Song, F. Li, L. Deng** “Fault diagnosis for a wind turbine transmission system based on manifold learning and Shannon wavelet support vector machine” *Renewable Energy*, vol 62, pp:1-9, 2014.
- [18] **Merabet Saddek** « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage d'écurueil par la méthode de reconnaissance des formes» Mémoire d'ingénieur, ENP 10 Avenue Hassan Badi, El-Harrach, Alger 2007.
- [19] **Hubert Razik et Gaëtan Didier** «notes de cours sur le diagnostic de la machine asynchrone» Groupe de recherches en électrotechnique et électrotechnique de Nancy G.R.E.E.N.-U.H.P.-U.M.R.-7037, Université Henri Poincaré-Nancy 2003.
- [20] **Mechai.H et Mansour. L** « modélisations de la machine asynchrone en présence de défauts » Mémoire d'ingénieur, université de Msila 2006.
- [21] **Mechai.H et Mansour. L** « modélisations de la machine asynchrone en présence de défauts » Mémoire d'ingénieur, université de Msila 2006.
- [22] **V .Perrier** Idée de la base Application de la théorie des ondelettes, Laboratoire de Modélisation et Calcul de l'IMAG Institut National Polytechnique de Grenoble 2005.
- [23]. **M. Ayad, D. Chikouche** Application de la transformée en ondelette à l'analyse des signaux vibratoires d'un système d'engrenage en vue d'un diagnostic précoce, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007.
- [24].**Jean-Claude Trigeassou** Diagnostic des entraînements électriques Version du 6 octobre 2010
- [25] **Boumegoura.Tarek,**“ Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue de diagnostic”, Thèse doctorat, 2001, Ecole Centrale de Lyon, France
- [26] **J.Moreira, T.Lipo,**“Modeling of saturated ac machines including air gap flux harmonic components”, *IEEE Transactions on Ind. Appl.*, Vol.28., No.2., March/April 1992
- [27] **Hubert RAZIK,**“ Le contenu spectral du courant absorbe par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art”, *La revue 3EI* N°29 Juin2002 PP 48-52

- [28] X. Luo, Y. Liao, H.A. Toliyat, A. El-Antably, and T.A. Lipo, "Multiple coupled circuit modeling of induction machine", IEEE Trans. Industry Applications, vol 31, no. 2, March/April 1995, pp. 311-318.
- [29] C. Sabonnadière, L. Coulomb, « Calcul des champs électromagnétiques », Technique de l'ingénieur D 3020
- [30] Chouaib Labiod, « Modélisation des phénomènes électromagnétiques dans une machine à reluctance variable », thèse de Magister université de biskra, 12/05/2014
- [31] P. Mas, « Modélisation en électromagnétisme », étude technique, janvier 1992.
- [32] M. Feliachi, « Contribution au calcul du champ électromagnétique par la méthode des éléments finis en vue d'une modélisation dynamique des machines électriques », thèse de docteur ingénieur, conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), Université de Paris VI, Janvier, 1981.
- [33] Khebbab Mohamed, « Etude et Modélisation de Capteur à Courant de Foucault pour le contrôle non destructif (CND) », Thèse de magister, université de Constantine, 2007
- [34] G. Datt et G. Touzot « Une Présentation de la Méthode des Eléments Finis », Maloine S.A. Editeur Paris, Deuxième édition, 1984.
- [35] Ounnadi Mohammed, « Elaboration d'un modèle d'étude en régime dynamique d'une machine à aimants permanents », Thèse de magister, Université de Tizi-Ouzou, 07 avril 2011.
- [36] Nehal Ouassila, « Etude et modélisation des paliers planaires », thèse de magister, Université de Constantine, 2009.
- [37] M. Rachek, « Modélisation par éléments finis de systèmes électromagnétiques en mouvement de structures tridimensionnelles : application au couplage magnétique-mécanique et au contrôle non destructif par courant de Foucault », thèse de doctorat, UMMTO, 2007.
- [38] E. Chauveau, « Contribution au calcul électromagnétique et thermique des machines électriques : application à l'étude de l'influence des harmoniques sur l'échauffement des moteurs asynchrones », thèse de Doctorat de l'université de Nantes, 2001.
- [39] Y. Boutora, « Elaboration de nouvelles méthodes de renumérotation des maillages en vue d'une modélisation électromagnétique des machines synchrones à aimants permanents avec la méthode des éléments finis », thèse de doctorat, ENP, Alger, 2007.

ANNEXE.

Les paramètres et les caractéristiques, en vue de la simulation, du moteur asynchrone :

Partie	Paramètre	Valeur	Unité
Stator	Nombre de phases	3	
	Nombre d'encoches	36	
	Diamètre interne	120	Mm
	Diamètre externe	212	Mm
Rotor	Diamètre externe	119	Mm
	Diamètre interne	40	Mm
	L'épaisseur de l'entrefer	0.5	Mm
	Nombre de barres	32	

Abréviation :

MAS : Machine Asynchrone.

FFT : Transformé de Fourier rapide (Fast Fourier Transformation).

FLUX-2D

Le supervisor comprend un gestionnaire d'annuaire et un gestionnaire de projet pour tous vos flux fichiers de projet, avec Mes programmes, raccourcis vers d'autres programmes

