

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par

MESAI AOUN Hocine

Thème

Diagnostic des Défaits Rotoriques Dans la Machine Asynchrone Triphasée A Cage

Soutenu le 26/05/2016. Devant le jury composé de :

M. BESSOUS Nouredine	Maitre assistant	Président
Mme. HALEM Noura	Maitre de conférences	Rapporteur
M. ZUEGEB Boubaker	Maitre assistant	Examineur

Année Universitaire 2015/2016

A ma famille

A mes amis

REMERCIEMENTS

*Je présente mes gratitudes profondes à dieu qui m'a
aider à faire ce modeste travail, à mes très chers
père et mère pour m'avoir soutenu*

*Je remercie Dr. Noura halem pour tous ses efforts
fournis jusqu'à l'achèvement de ce mémoire.*

SOMMAIRE

Sommaire	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités	3
I.1 Introduction	4
I.2 Définitions	4
I.2.1 La Maintenance	4
I.2.1 Maintenance corrective	4
I.2.1.2 Maintenance préventive	5
I.2.2 La Surveillance	5
I.2.3 Le Diagnostic	5
I.3 Constitution de la machine asynchrone triphasée à cage	6
I.3.1 Stator	6
I.3.2 Rotor	6
I.4 Origines des défauts de la machine asynchrone triphasée	7
I.5 Les défauts majeurs de la machine asynchrone triphasée à cage	7
I.6 Conséquences des défauts	8
I.7 Méthodes de diagnostic des machines asynchrones	8
I.7.1 Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite	8
I.7.2 Diagnostic par analyse du courant statorique	9
I.7.3 Diagnostic par l'analyse vibratoire	9
I.7.4 Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie	9
I.8 Signatures spectrales de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage...	10
I.9 Modélisation de la machine asynchrone en vue de diagnostic	12
I.9.1 Approche analytique	12
I.9.2 Méthode des schémas magnétiques équivalents	12
I.9.3 Méthodes des éléments finis	13
I.10 Conclusion	14
Chapitre II: Méthode des Eléments Finis	15
II.1 Introduction	16
II.2 Présentation de la méthode de calcul par éléments finis	16
II.2.1 Généralités	16
	VI

II.2.2	Méthode des éléments finis (MEF)	20
II.3	Présentation du logiciel ANSYS	21
II.3.1	Généralités	21
II.3.2	Préprocesseur	23
II.3.3	Processeur de calcul	23
II.3.4	Postprocesseur	23
Chapitre III : Modèle Eléments Finis Appliqué à la Machine Asynchrone		25
III.1	Introduction	26
III.2	Construction du modèle élément applique a la machine asynchrone	26
III.2.1	Construction du modèle élément fini appliqué au stator	29
III.2.1.1	Construction du circuit magnétique	29
III.2.1.2	Construction du circuit électrique extérieur	30
III.2.2	Construction du modèle éléments finis appliqué au rotor	32
III.2.2.1	Construction du circuit magnétique	32
III.2.2.2	La construction du circuit électrique extérieur	33
III.2.3	Modélisation de la région d'entrefer	34
III.2.3.1	Définition de la géométrie de l'entrefer	34
III.2.3.2	La bande de mouvement	35
III.3	Résultats de simulation	36
III.3.1	Solution	36
III.3.2	Simulation de la machine asynchrone avec cassure de barres rotoriques....	41
III.4	Conclusion	43
Conclusion Générale		45
Bibliographie		47

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre II: Méthode des Eléments Finis	15
II.1	fonction d'interpolation d'un élément	20
II.2	Organisation du logiciel ANSYS	22
Chapitre III : Modèle Eléments Finis Appliqué à la Machine Asynchrone	25
III.1	Dimensions de la machine asynchrone.	26
III.2	Circuit magnétique de la machine asynchrone	28
III.3	Répartition du bobinage statorique	28
III.4	Direction de la tension d'alimentation	30
III.5	Couplage des encoches statoriques avec le circuit extérieur	31
III.6	Circuit électrique au stator	31
III.7	Géométrie complète du circuit magnétique du rotor	32
III.8	Couplage des encoches rotoriques avec le circuit extérieur	33
III.9	Circuit électrique au rotor	34
III.10	Géométrie d'entrefer	35
III.11	Maillage de la machine (éléments triangulaires)	36
III.12	Tensions d'alimentation	37
III.13	Répartition des lignes d'équiflux (solution statique)	38
III.14	Répartition des lignes équiflux pour une vitesse de 0 rpm	39
III.15	Répartition des lignes équiflux pour une vitesse nominale	39
III.16	Répartition de l'induction magnétique	40
III.17	Courbe de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer	40
III.18	Répartition des lignes équiflux	42
III.19	Courbes de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer	43

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités	3
I.1 Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage	11
Chapitre III : Modèle Eléments Finis Appliqué à la Machine Asynchrone ...	25
III.1 Caractéristiques de la machine (valeurs nominales)	27
III.2 Caractéristiques géométriques de la machine	27

Introduction Générale

Introduction Générale

La majorité des équipements industriels sont à base de machines asynchrones triphasées, du fait de leur robustesse et de leur faible coût. Cependant, bien que robustes, ces machines ne sont pas infaillibles. Les principaux défauts recensés sont les courts circuits entre spires des bobinages du stator et les détériorations des anneaux au rotor et toutes ruptures de barres rotoriques.

Les défauts de la machine asynchrone peuvent fortement affectés la durée de vie de cette machine, en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Elles entraînent par la suite des pertes économiques élevées.

La surveillance et le contrôle sont des éléments clés pour éviter les pertes économiques. Le diagnostic précoce est une partie de la surveillance.

A la suite de ce qui précède, le mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier recense les différents défauts des machines asynchrones d'une manière plus ou moins brève, on y trouve des techniques de détection et de diagnostic des défauts choisies parmi quelques travaux de magistère et de doctorat.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du modèle élément finis de la machine asynchrone pour la simulation des ruptures de barres où nous présentons le logiciel utilisé pour cette simulation.

Dans le troisième chapitre, nous représentons les résultats de la machine saine et avec défauts. A ce niveau les résultats expérimentaux seront confrontés dans le but de valider les résultats de simulation.

Enfin une conclusion clôture notre travail.

Chapitre I

Généralités

Chapitre I

Généralités

I.1. Introduction

De multiples défaillances peuvent apparaître dans la machine asynchrone, elles peuvent être prévisibles ou intempestives, mécaniques, électriques ou magnétiques, et leurs causes sont très variées.

L'étude des défauts des machines asynchrones a un objectif d'analyser leur impact sur le comportement de la machine en déduire leurs signatures.

I.2. Définitions

I.2.1. La Maintenance

Dans tout les systèmes industriels, l'objectif est de garantir la disponibilité, c'est-à-dire, d'assurer que le système fonctionne lorsqu'on le sollicite. La responsabilité de cette tâche repose sur la maintenance. Selon l'association française de normalisation (AFNOR), la maintenance est « *ensembles des activités destinées à maintenir ou à établir un bien dans un état pour accomplir une fonction requise* ». On peut distinguer deux grandes classes de la maintenance [1], [2]:

- ❖ Maintenance corrective ;
- ❖ Maintenance préventive.

I.2.1.1. Maintenance corrective

C'est un ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien. Autrement dit, la maintenance corrective est effectuée après la détection d'une panne : Elle devra s'appliquer automatiquement aux défaillances complètes et soudaines. Ce type de maintenance sera réservé aux matériels peu onéreux, non stratégiques pour la production et dont la panne aurait peu d'influence sur la sécurité.

La maintenance corrective comprend : la localisation de la panne, et son diagnostic, la remise en état et le contrôle du bon fonctionnement avant la remise en service. Le taux d'utilisation de cette politique est égal à 50 % des industries générales [1].

I.2.1.2. Maintenance préventive

Ce type de maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des équipements au cours de l'utilisation. La mise en pratique de ce type de maintenance nécessite la décomposition des sous-systèmes en composants (roulement, circuit magnétique, etc...). Les buts de la maintenance préventive, sont:

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Diminuer le budget de la maintenance.
- Supprimer les causes des accidents graves.

I.2.2. La Surveillance

C'est un ensemble des actions réalisées manuellement ou automatiquement, destinée à observer l'état d'un bien. La surveillance donne une réponse aux besoins d'information de la maintenance ; et elle sert d'une part à signaler les anomalies de fonctionnement et d'autre part, prendre en compte les actions destinées à maintenir l'opération des systèmes [1].

I.2.3. Le Diagnostic

Le diagnostic fait partie de la maintenance. C'est un ensemble des actions consistant à identifier les causes probables de la défaillance. Les deux principales tâches de diagnostic sont : la détection et la localisation des défauts. La détection consiste à signaler l'existence du défaut, tandis que la localisation à pour objet de trouver le type de défaut.

Aucun système industriel ni à l'abri des anomalies ou des perturbations accidentels, qui entraînent un mauvais fonctionnement. Trois types d'anomalies sont à considérer:

- **Erreur** : tout écart entre la valeur mesurée est la valeur réelle ;
- **Défaut** : l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir ses fonctions requises avec des performances définies dans les spécifications techniques ;
- **Défaillance** : l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Le diagnostic a pour objectif de détecter d'une manière précoce un défaut avant qu'il ne conduise à une défaillance totale dans l'installation industrielle. La procédure de diagnostic s'articule autour des étapes suivantes [1], [2], [3]:

- ✓ L'extraction des informations issues de capteurs de la machine pour obtenir des indicateurs de défauts ;
- ✓ Les indicateurs de défauts doivent être évalués afin de produire des symptômes (ou indices) cette étape consiste à définir un seuil à partir du quel on déclarera l'existence du défaut ;
- ✓ La décision représente la dernière étape de la tâche de diagnostic. Il s'agit de déclarer l'élément défaillant à partir de la comparaison de la signature actuelle avec une référence. L'étape de la décision va nous permettre de différencier les défauts, c'est-à-dire, trouver la cause de la l'anomalie.

I.3. Constitution de la machine asynchrone triphasée à cage

La machine asynchrone triphasée souvent appelée moteur à induction est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation.

I.3.1. Stator

Le circuit magnétique du stator est réalisé par un assemblage de tôles ferromagnétiques fines et découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. L'utilisation des tôles minces permet de minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. 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 bobines permettent, quant à elles, la fermeture des courants en organisant leur circulation, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer, pour limiter les oscillations du couple électromagnétique [4].

I.3.2. Rotor

Le rotor est constitué comme le stator de tôles empilées et habituellement du même matériau. Dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. Dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections

montées sur un moyeu. Dans le rotor à cage d'écureuil, les conducteurs sont des barres obtenues par injection d'un alliage d'aluminium ou préformées en cuivre et introduites 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 forte pour que les courants ne circulent pratiquement pas dans les tôles, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre [4].

I.4. Origines des défauts de la machine asynchrone triphasée

Les origines des défauts sont souvent de natures différentes, mais sont généralement fortement liées les uns aux autres. On cite comme causes majeurs [5]:

- Cause thermique : balourds thermiques, points chauds, températures ambiantes élevées...
- Entourage du moteur (tensions et transitoires d'alimentation, inverseurs, air de refroidissement, mauvais courant de charge, surcharges, corrosion, humidité.....).
- Causes mécaniques et mauvais emploi du moteur (Abus) (résonance avec la commande de vitesse, chocs en service, vibrations, jeux excessifs, balourds mécaniques...).
- Fabrication imparfaite.
- Erreurs pendant la réparation (taille et type inapproprié d'enroulement, roulements inadéquats...).
- Épuisement de la durée de vie du moteur.

I.5. Les défauts majeurs de la machine asynchrone triphasée à cage

Les défauts majeurs qui peuvent affecter les machines électriques, et en particulier, les machines asynchrones, sont [5]:

- ❖ Défauts statoriques : Ouvertures de phases, court-circuit phase-phase ou phase-terre, court-circuit entre spires, court-circuit entre bobines de la même phase.... etc.
- ❖ Connexion anormale des enroulements statoriques.
- ❖ Les décharges partielles : Les décharges surviennent dans les isolants, entre conducteurs, ou entre les conducteurs et la masse, et s'amplifie avec le vieillissement de l'isolation.
- ❖ Défaut du circuit magnétique (rupture de tôles).

- ❖ Cassures partielles ou totales des barres et des anneaux de court-circuit de la cage rotorique.
- ❖ Dissymétrie du rotor : on parle généralement d'excentricité statique ou bien dynamique, axiale ou bien radiale .On y' inclus aussi la déformation du rotor (flexion désalignement...).
- ❖ Court-circuit de l'enroulement rotorique (cas des rotors bobinés).
- ❖ Défaillance au niveau des roulements.

I.6. Conséquences des défauts

Les défauts qui surviennent sur les machines asynchrones conduisent à de multiples problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale, et qui peuvent aller jusqu'à l'arrêt total. On cite parmi les conséquences des défauts [5]:

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

I.7. Méthodes de diagnostic des machines asynchrones

Il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure, tel que la mesure du champ magnétique, de bruit, de vibration, du courant...etc. d'autres sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques avec celles du moteur sain (courant statorique, couple électromagnétique, et vitesse mécanique).

I.7.1. Diagnostic par mesure du flux magnétique axial de fuite

Pratiquement, de multiples solutions permettent de capter le flux de fuite axial dans une machine électrique, tel que les sondes à effet Hall. Mais l'exemple de base consiste à enrouler une bobine autour de l'arbre de la machine, celle-ci sera le siège d'une FEM induite liée au flux de fuite axial. La réalité fait que les circuits électriques et magnétiques de la machine ne sont jamais parfaits à causes des tolérances et des défauts de fabrication parmi d'autres, et présentent souvent quelques degrés d'asymétrie permettant la génération des flux de fuite

dont le contenu spectral est lié directement aux harmoniques contenus dans les courants statoriques et rotoriques [5], [6].

I.7.2. Diagnostic par analyse du courant statorique

Parce qu'il est facilement accessible, et vue sa capacité de détecter aussi bien les défauts électromagnétiques que mécaniques, l'analyse du courant statorique occupe une place privilégiée dans le diagnostic par analyse des signaux. Cette technique est connue sous l'abréviation MCSA (Motor Current Signature Analysis). La MCSA était l'objet de plusieurs travaux de recherche, elle consiste à affecter à chaque défaut une signature spectrale le caractérisant. Dans le même contexte, il a été démontré que la sévérité du défaut est fonction de l'amplitude des composantes fréquentielles qu'il génère, et notamment, des raies déjà présentes dans le moteur sain (harmoniques d'espace) ...etc [5], [6].

I.7.3. Diagnostic par l'analyse vibratoire

Le diagnostic par l'analyse vibratoire fait partie des techniques mécaniques qui sont employées pour déceler des défauts au niveau des machines électriques. Une vibration est souvent accompagnée d'un bruit sonore qui peut être élevé même pour des faibles amplitudes de vibration. Le diagnostic des défauts en utilisant l'analyse vibratoire est la méthode la plus connue dans la pratique telle que dans les unités d'exploitation de la SONATRACH et la SONELGAZ. Les problèmes vibratoires dans les moteurs asynchrones ont une complexité accrue à cause de la présence de champs magnétique tournant. Selon leurs origines, ces problèmes sont d'ordre mécanique ou magnétique. En réalité, les moteurs électriques industriels sont généralement fixés sur des structures à supports communs avec l'équipement entraîné. Par conséquent, le spectre vibratoire devient très riche en harmoniques d'origines diverses (engrènement, roulement, desserrage, ...) transmises par les structures supports, ce qui complique le problème et impose l'identification des images vibratoires spécifiques [5].

I.7.4. Diagnostic par analyse de la température : La Thermographie

Grâce à des dispositifs à infrarouge, on perçoit les zones chaudes dont les températures dépassent les températures limites prédéterminées. Pour ce faire, un balayage systématique de l'ensemble de l'installation électrique, et notamment du moteur asynchrone, est effectué. Les systèmes examinés étant en fonctionnement, les éléments qui composent l'installation électrique sont en charge normale. En fait, ils vont nous apparaître, sur l'image infrarouge, plus ou moins rayonnant suivant leur rôle, leur conception, leur charge et leur matériau.

L'opérateur fait la part de choses entre les températures normales de fonctionnement et les anomalies. Les anomalies sont localisées spatialement, un réglage des paramètres de l'objet (émissivité, ambiance...) permet le calcul direct de la température maximale observée et éventuellement la surchauffe. Un calcul complémentaire peut, dans le cas où le système n'est pas à sa charge normale, permettre d'estimer la surchauffe ramenée à son fonctionnement normal. La surchauffe étant calculée, nous rapprochons celle-ci de la cinétique de dégradation et donc des degrés d'urgence. Cette détermination est très importante car elle permet une véritable localisation dans le temps ; d'où une gestion aisée du traitement des anomalies. Un cliché dans l'infrarouge et une photo dans le visible mémorisent le défaut. La détection serait possible suite à l'analyse du spectrogramme obtenu [5].

I.8. Signatures spectrales de défauts de la machine asynchrone triphasée à cage

L'analyse spectrale représente la méthode la plus usitée 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 courts-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.

Pratiquement, la surveillance par analyse spectrale de la machine asynchrone consiste donc à effectuer une transformée de Fourier des grandeurs affectées par le défaut, et visualiser les fréquences parasites constituant la signature d'un défaut dans la machine. Les grandeurs choisies sont soit électriques, comme la puissance instantanée, et plus particulièrement le courant statorique, soit mécaniques (vibration couple électromagnétique), ou bien magnétique (induction magnétique).

Le tableau I.1 résume les signatures spectrales qui caractérisent les défauts de la machine asynchrone à cage.

Tableau I.1. Signatures spectrales des défauts de la machine asynchrone à cage.

<i>Défauts</i>	<i>Signatures spectrales</i>
Roulement	$f_{roul} = f_s \mp k f_v , k = 1, 2, \dots$ $f_{bille} = \frac{PD}{BD} f_r \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right]$ $f_{b.int} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$ $f_{b.ext} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right]$
Court-circuit statorique	$f_b = (1 \mp 2ks) f_s, k = 1, 2, 3, \dots$
Excentricités	$f_H = \left \left(\lambda \mp (kR + n_d) \frac{(1-s)}{p} \right) f_s \right $ $f_{exc} = f_s \mp k f_r , k = 1, 2, 3, \dots$
Cassure de barres rotoriques	$f_b = f_s \left[\frac{n}{p} (1-s) \mp k \right], n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots$

Avec:

P est le nombre de pair de pôles; f_s est la fréquence du réseau d'alimentation; s est le glissement.

f_v est l'une des fréquences caractéristiques des vibrations, soit (f_{bille} , $f_{b.int}$ ou $f_{b.ext}$).

n_b est le nombre d'éléments roulants, BD le diamètre d'un élément roulant, PD la distance entre les centres des billes diamétralement opposées, et β l'angle de contact des billes avec les bagues du roulement et f_r est la fréquence de rotation du rotor.

I.9. Modélisation de la machine asynchrone en vue de diagnostic

La modélisation et la simulation des machines constituent une étape primordiale en matière de diagnostic. Elles permettent la compréhension du fonctionnement défectueux, la vérification sur prototype virtuel de l'efficacité des algorithmes de détection de défauts et elles apportent également la possibilité de construire des bases de données sur les manifestations électriques et magnétiques de ces défauts. Parmi les approches de modélisations existantes, nous en privilégions trois qui représentent chacune un niveau de complexité différent : une méthode analytique, une approche par schéma magnétique équivalent et enfin la modélisation par éléments finis.

I.9.1. Approche analytique

Les modélisations analytiques reposent sur le concept d'inductance, notion qui caractérise par définition une relation linéaire flux-courant. Toute considération de la saturation magnétique, phénomène physique (effet de peau, harmoniques de flux d'entrefer) omniprésent dans le fonctionnement normal de la machine, se trouve a priori exclue de cette approche. Cette approche globale des phénomènes électromagnétiques permet d'établir un schéma électrique équivalent de la machine. Chaque branche est constituée d'une résistance en série avec une fem. Cette fem est soit liée (cas des branches correspondant aux spires du stator et aux barres et portions d'anneau), soit indépendante dans le cas des branches de l'onduleur. Ensuite l'utilisation de la théorie des circuits et des systèmes permet de trouver les équations différentielles caractérisant le fonctionnement de la machine. Ces dernières seront intégrées analytiquement ce qui permet de réduire considérablement la complexité des calculs. Dans ce cadre, plusieurs modèles mathématiques ont été développés avec plusieurs degrés de complexité, depuis les modèles triphasés; stator et rotor jusqu'aux modèles triphasés au stator et multi-phasés au rotor (multi-enroulements).

I.9.2. Méthode des schémas magnétiques équivalents

Cette approche consiste à découper le circuit magnétique qui constitue la machine étudiée en tubes de flux, caractérisés chacun par sa réductance ou sa perméance. Ces grandeurs, tout comme les inductances, peuvent être définies selon les valeurs de flux, prenant ainsi en considération la saturation magnétique. Le mouvement de rotation de la machine est pris en compte par l'intermédiaire de perméances d'entrefer variable selon la position du rotor. Les circuits électriques statoriques et rotoriques sont considérés grâce aux équations de couplage électrique/magnétique. Au rotor, les n phases sont constituées par les mailles électriques

limitées par deux barres successives. Ce couplage est concrétisé au niveau de la mise en équation par le choix des inconnues du système qui seront simultanément les flux dans les différentes mailles du réseau magnétique ainsi que les courants statoriques et rotoriques. Pour la résolution des équations, un problème de non-linéarité s'impose et nécessite l'utilisation d'une méthode itérative en pas à pas dans le temps.

1.9.3. Méthodes des éléments finis

Il s'agit cette fois de découper le circuit magnétique de la machine en éléments de dimension suffisamment faible pour que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur les surfaces correspondantes. A partir des formes locales des équations de Maxwell, il est possible d'exprimer le problème à résoudre. La résolution analytique est complexe et ne permet de traiter la saturation que de façon approchée. Les progrès des calculateurs ont permis d'envisager leur résolution numérique. De nombreux outils logiciels leur sont dédiés. Citons, entre autres, ANSYS, FLUX 2D, FLUX 3D et MAXWELL. Cependant, ces logiciels ont historiquement été conçus pour déterminer le champ électromagnétique, et dans l'objectif de l'optimisation du dimensionnement. Nous nous intéressons plus particulièrement à développer un modèle élément finis de la machine asynchrone triphasée (chapitre II).

Ces trois méthodes ont chacune leur place sur la double échelle complexité/précision des approches de simulation. La méthode analytique est la plus simple à mettre en œuvre, vient ensuite celle des schémas magnétiques, enfin celle des éléments finis. C'est cette dernière qui nécessite des moyens et des temps de calculs les plus importants.

L'adéquation de ces méthodes au diagnostic de la machine existe pour chacune d'entre elles selon ce que l'on cherche à diagnostiquer. La méthode des éléments finis, qui reproduit le plus fidèlement le comportement électromagnétique de la machine, permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein avec une manifestation tout à fait localisée du défaut (par exemple, des ruptures de barres). Cependant, les moyens et temps de calcul nécessaires à cette méthode constituent son handicap majeur et freinent son utilisation pour la simulation et l'évaluation d'algorithmes de détection de défauts. La modélisation par schéma magnétique peut tenir compte d'une particularité géométrique du circuit magnétique ou d'une spécificité du circuit électrique. Les résistances rotoriques sont considérées constantes, au même titre que les résistances statoriques, l'effet pelliculaire ne peut être correctement pris en compte.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des termes et des notions très importantes en diagnostic, tels que les défauts qui peuvent affecter la machine asynchrone, leurs causes, leurs conséquences et leurs signatures, ainsi que les techniques de diagnostic utilisées. Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre travail est consacré à l'étude et à la simulation des cassures de barres dans la cage rotorique d'un moteur asynchrone. Pour cela, il faut disposer d'un bon modèle fiable, décrivant le comportement de la machine à l'état sain et avec défaut. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II

Méthode des Eléments Finis

Chapitre II

Méthode des Eléments Finis

II.1. Introduction

La considération du comportement électromagnétique local du moteur permet d'avoir une modélisation plus précise. La résolution numérique *des équations de Maxwell* régissant le comportement des champs électromagnétiques et la prise en considération des équations électriques représentant le circuit d'alimentation du moteur, permet de réduire les simplifications faites dans les modèles classiques et ainsi d'avoir un modèle plus proche de la machine électrique réelle.

Pour avoir une idée précise de l'effet des défauts sur le comportement d'un moteur sans pour autant détruire des machines, nous pouvons les étudier avec un modèle qui représente la machine réelle. Dans ce but nous nous orientons vers la modélisation par la méthode des éléments finis cette dernière qui a pour objet de permettre la représentation d'une rupture de barres pour une machine asynchrone à cage. Dans cette perspective, on a développé un modèle basé sur la méthode de calcul par les éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS. Le modèle élément finis en $2D$ de la machine asynchrone représente la cage rotorique qui permet la simulation des barres cassées.

II.2. Présentation de la méthode de calcul par éléments finis

II.2.1. Généralités

La détermination des champs électromagnétique est d'un grand intérêt pour la conception des machines électriques. En effet, le dimensionnement et l'évaluation des performances d'une machine asynchrone à cage reposent sur la connaissance et l'identification des inductances dont découle le calcul des efforts dans les conducteurs des ampère-tour consommés dans les circuits magnétiques, des flux utiles et des flux de fuites de réactances.

L'analyse de ces phénomènes électromagnétiques est basée sur la résolution *des équations de Maxwell* dont la complexité est telle qu'elle est exclue dans la plupart des cas du formalisme analytique.

Plusieurs méthodes numériques transforment les équations aux dérivées partielles à des systèmes d'équations algébriques dont la solution fournit une approximation de l'inconnue en différents points situés aux nœuds du réseau géométrique correspondant à la discrétisation.

Parmi ces méthodes, nous distinguons deux méthodes principales de résolution des équations des champs électromagnétiques.

❖ **Méthode des différences finis (MDF)**

C'est la méthode la plus ancienne, connue depuis Gauss. Le principe fondamental de cette méthode consiste à appliquer au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse, permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement limité en série de Taylor de la fonction à déterminer dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équations algébriques égales au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

❖ **Méthode des éléments finis (MEF)**

Autorisent l'emploi d'éléments de toute forme à l'intérieur desquels le potentiel est approché par un polynôme ; la résolution se ramène à la minimisation d'une fonctionnelle liée à l'énergie emmagasinée dans les éléments. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul long qui nécessite souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Cette méthode ne s'applique pas directement aux équations aux dérivées partielles, mais à une formulation intégrale qui est équivalente au problème à résoudre, en utilisant l'une des deux approches suivantes [7]:

- La méthode des résidus pondérés ou méthode projective qui consiste à minimiser le résidu induit par l'approximation de la fonction inconnue.
- La méthode variationnelle qui consiste à minimiser une fonctionnelle qui représente généralement l'énergie du système étudié.

L'utilisation de la méthode numérique de calcul par élément finis nous apporte plusieurs avantages [8, 9]:

- ✓ Prise en compte de la géométrie de la machine.
- ✓ Prise en compte de la saturation des matériaux magnétiques.

- ✓ Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques.
- ✓ De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

Les équations qui régissent le champ électromagnétique dans les systèmes électromagnétiques sont *les équations de Maxwell*, accompagnées des relations constitutives du milieu considéré. Elles font intervenir les champs magnétique et électrique \vec{H} et \vec{E} , les inductions magnétique et électrique \vec{B} et \vec{D} [8].

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

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.2})$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{II.3})$$

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{H} = \mu \vec{B} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

A noter, que nous avons omis le terme $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ dans (II.3). Les courants de déplacement étant négligeables devant les courants de conduction \vec{J} dans les machines électriques.

A partir de l'égalité (II.2), nous pouvons poser $\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$ d'où une nouvelle écriture du champ électrique :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} V \quad (\text{II.8})$$

Les potentiels scalaire V et vecteur A seront choisis comme inconnues du système d'équations précédant ; de plus, dans les machines électriques classiques, nous pouvons supposer que les courants et le potentiel vecteur se trouvent dirigés suivant le même axe. Le problème se ramène, donc à deux inconnues A et V , et se résout par une formulation bidimensionnelle [9]:

Egalement, la loi $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ s'écrit :

$$\vec{J} = \sigma \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} V \right], \text{ peut être réduite selon le domaine où l'on travaille ; dans les}$$

barres d'une machine asynchrone à cage, le courant induit \vec{J} est simplement égal à : $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$, si l'on considère parfait le court-circuit des anneaux (il n'existe pas de différence de potentiel entre deux extrémités de la machine, le terme $\text{grad} V$ est donc nul). Par contre, au stator, nous considérons que les seuls courants \vec{J} qui interviennent sont ceux imposés par l'alimentation.

L'équation générale que nous aurons à résoudre s'écrit, compte tenu de ces considérations:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \text{rot} \left(\frac{1}{\mu \text{rot}(\vec{A})} \right) = \vec{J} + \text{rot}(\vec{H}) \quad (\text{II.9})$$

A : Potentiel vecteur magnétique (Weber/m)

H : champ magnétique (A/m)

J : Densité de courant uniforme (A/m²)

μ : perméabilité magnétique (H/m)

σ : Conductivité électrique (1/Ω.m)

t : temps (s)

Notant que J représente la densité de courant imposée dans les conducteurs. Les conditions aux limites du domaine d'étude qui devront être associés à l'équation (2.9) seront soit du type Dirichlet ($A = A_0$ imposé au contour extérieur du domaine), soit du type Newman ($\frac{\partial A}{\partial n}$ imposé au contour de symétrie).

Le principe de la méthode de calcul par éléments finis est de résoudre les équations électromagnétiques sur des éléments de surface (résolution bidimensionnelle) de dimension réduite.

II.2.2. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche les valeurs de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié (y compris l'espace environnant).

Sur chaque élément du découpage, la fonction d'interpolation est de la forme :

$$A = \sum_{m=1}^{ns} A_m \varphi_m(x, y) \quad (\text{II.10})$$

Où ns est le nombre de sommets de cet élément.

Le polynôme d'approximation (du second degré pour un élément quadrilatéral est déterminé par ces coefficients (ici six).

$$\varphi_m(x, y) = a_m + b_m x + c_m y + d_m x^2 + e_m xy + f_m y^2 \quad (\text{II.11})$$

Les coefficients peuvent être déterminés par les valeurs de la fonction en des points particuliers appelés nœuds de l'élément (ici les sommets du triangulaire dans la figure 2.1). Ainsi, le potentiel est défini à l'intérieur de chaque élément.

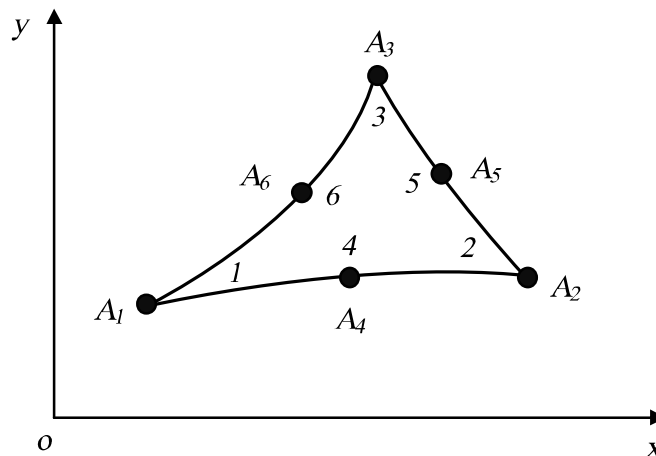


Figure II.1 : fonction d'interpolation d'un élément.

Le processus de discrétisation par éléments finis aboutit, alors, à un système algébrique de la forme :

$$[K][A] + [F] = 0 \quad (\text{II.12})$$

Où $[A]$ est un vecteur dont les composantes sont les inconnues du problème et représentent les valeurs nodales du potentiel magnétique ; $[K]$ est une matrice symétrique dont les composantes sont fonction des propriétés magnétiques des matériaux composant le système et indépendantes des sources du champ ; $[F]$ est un vecteur fonction des sources du champ (courants, tensions, aimants).

Ainsi la détermination des valeurs, A_1, A_2, \dots, A_n , que la fonction inconnue $A(x, y)$ prend en chaque nœud de chaque élément de découpage, représente le déroulement des calculs pour arriver à la solution du problème [7].

II.3. Présentation du logiciel ANSYS [9]

II.3.1. Généralités

La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul de champ débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé. Si, lors des premières tentatives de calcul par des méthodes numériques, on écrivait, pour chaque nouveau problème, un programme différent tenant compte de sa géométrie particulière, de ses particularités physiques et de ses conditions aux limites, on s'oriente aujourd'hui vers la réalisation de *logiciels généraux* dont la structure informatique est adaptée au traitement d'un grand nombre de problèmes d'un même type.

Le logiciel utilisé dans cette étude est ANSYS. Celui-ci permet de réaliser le schéma du circuit magnétique de la machine asynchrone en deux dimensions. Ainsi, ce logiciel permet de réaliser *le couplage entre le circuit magnétique et le circuit électrique extérieur d'alimentation* avec la présence d'une bande de mouvement dans l'entrefer, pour suivre le comportement dynamique de la machine (mouvement du rotor).

Le logiciel ANSYS a pratiquement la structure représentée sur la figure (II.2) qui consiste en un programme, appelé *préprocesseur*, qui permet, à l'aide de techniques issues de la *Conception Assistée par Ordinateur (CAO)*, de décrire la géométrie du domaine, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites et de réaliser un découpage de manière automatique ou manuelle avec assistance du programme. *Le processeur* de calcul résout les équations linéaires, ou non linéaires, issues de l'assemblage des éléments et fournit un ensemble de résultats bruts qui sont les valeurs de la grandeur inconnue en tous les nœuds du découpage. Ces résultats, stockés dans un fichier de sortie, sont alors repris par *le*

postprocesseur qui les met en forme pour fournir au concepteur un ensemble de résultats cohérents sous la forme de grandeurs physiques significatives (flux, forces, couples, énergies, inductances) ou de courbes associées aux grandeurs physiques intéressantes (induction le long de l'entrefer, champ électrique le long d'un isolant, etc.).

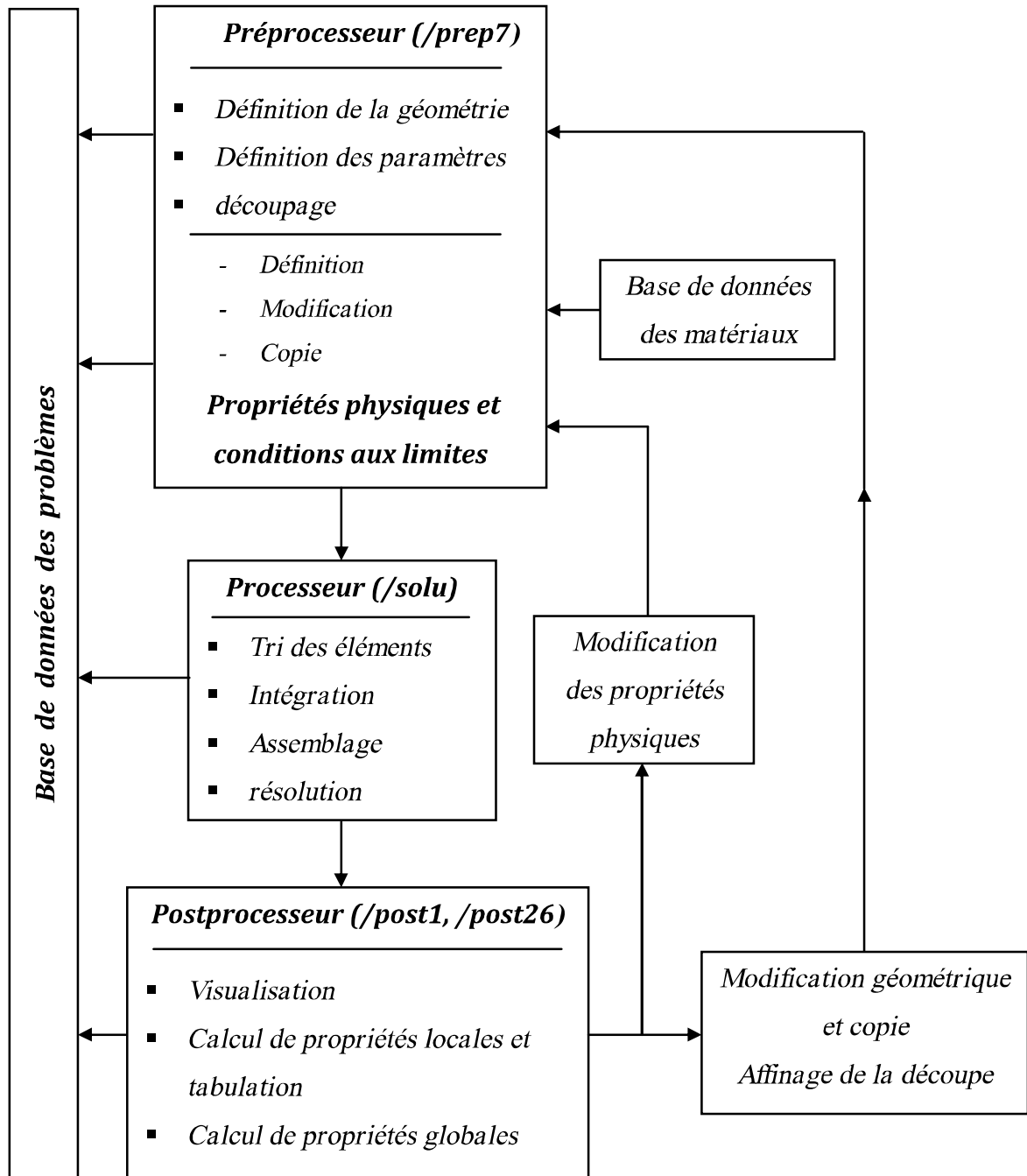


Figure II.2. Organisation du logiciel ANSYS [9].

II.3.2. Préprocesseur

La première des fonctions du préprocesseur est la définition des types des éléments (magnétique et électrique) suivant le type et les caractéristiques du problème que l'on veut étudier, et les résultats que l'on veut obtenir.

La deuxième fonction du préprocesseur est la description de la géométrie de la machine que l'on veut étudier. Cette opération est programmée suivant le principe d'un jeu de construction. À partir des points dont les coordonnées sont entrées au clavier, on définit des lignes (qui peuvent être des segments de droite ou des arcs de courbe) et l'on décrit des régions comme des parties de domaine délimitées par ces lignes. À chaque région est attribué un matériau extrait d'une base de données et le type d'élément choisi.

La fonction suivante du préprocesseur est la discrétisation en éléments finis. Cette fonction de maillage, qui représente une opération complexe, est intégrée au logiciel qui la réalise de manière automatique.

II.3.3. Processeur de calcul

À partir des éléments de la géométrie et de la physique de la machine et du découpage en éléments finis du domaine ainsi que le type du problème, le processeur fait le calcul des éléments de la matrice Jacobienne et réalise l'assemblage des éléments pour construire la matrice globale et le second membre du problème. La résolution des équations est ensuite enchaînée de manière automatique en laissant à l'utilisateur le soin de définir la précision recherchée et le nombre maximal d'itérations qu'il autorise dans le cadre de la méthode de Runge-kutta pour le cas du non linéarité.

II.3.4. Postprocesseur

À l'intérieur de ce module, on présente les résultats à l'utilisateur sous une forme adaptée à sa perception de la physique du problème. Par exemple, dans un problème d'électrostatique le tracé des équipotentielles est un résultat très utilisé. En magnétostatique, les lignes de flux, ou un ensemble de vecteurs d'induction, informent sur la répartition du champ. Enfin, dans l'étude des courants induits, on peut, en fixant l'instant de la représentation, se ramener au cas précédent, mais aussi tracer les lignes d'égale densité de puissance dissipée, afin de caractériser la localisation des pertes par effet Joule associées aux courants induits.

Parmi les facilités qui sont très utiles à l'intérieur du postprocesseur ANSYS, on trouve la possibilité de tracer la courbe représentative d'une grandeur le long d'une ligne intérieure au domaine (segment, cercle ou arc de cercle). Cette grandeur peut être le potentiel ou le module, la composante normale ou la composante tangentielle du champ. L'utilisation de dégradés de couleur ou de gris pour visualiser la répartition d'une grandeur scalaire ou le module d'une grandeur vectorielle est également très significative par exemple la présentation de la densité du courant électrique.

Aussi, le postprocesseur ANSYS comporte le calcul de grandeurs globales, telles que les forces et les couples, les forces électromotrices, l'énergie et les inductances et les capacités qui sont généralement les paramètres que le concepteur cherche à évaluer afin de les introduire dans le modèle global des performances de la machine qu'il est en train de définir.

Chapitre III

**Modèle Eléments
Finis Appliqué à La
Machine Asynchrone**

Chapitre III

Modèle Eléments Finis Appliqué à la Machine Asynchrone

III.1. Introduction

Dans ce chapitre la machine asynchrone sera étudiée avec un modèle qui représente la machine réelle. Dans ce but nous utilisons la modélisation par la méthode des éléments finis. Cette dernière qui représente une grande fidélité du comportement électromagnétique, ainsi que sa considération de la géométrie réelle de la machine. Le modèle élément finis de la machine asynchrone sera développé par l'utilisation l'outil logiciel ANSYS. La technique des circuits couplés sera utilisée en présence d'une bande de mouvement dans l'entrefer pour suivre le comportement dynamique de la machine.

III.2. Construction du modèle élément appliqué à la machine asynchrone

Une modélisation en deux dimensions de la machine asynchrone est suffisante pour simuler la machine à l'état sain et avec défaut, et permet de réduire sensiblement le temps de calcul. Les dimensions géométriques de la machine étudiée dans ce mémoire sont présentées par la figure III.1 [9] [10].

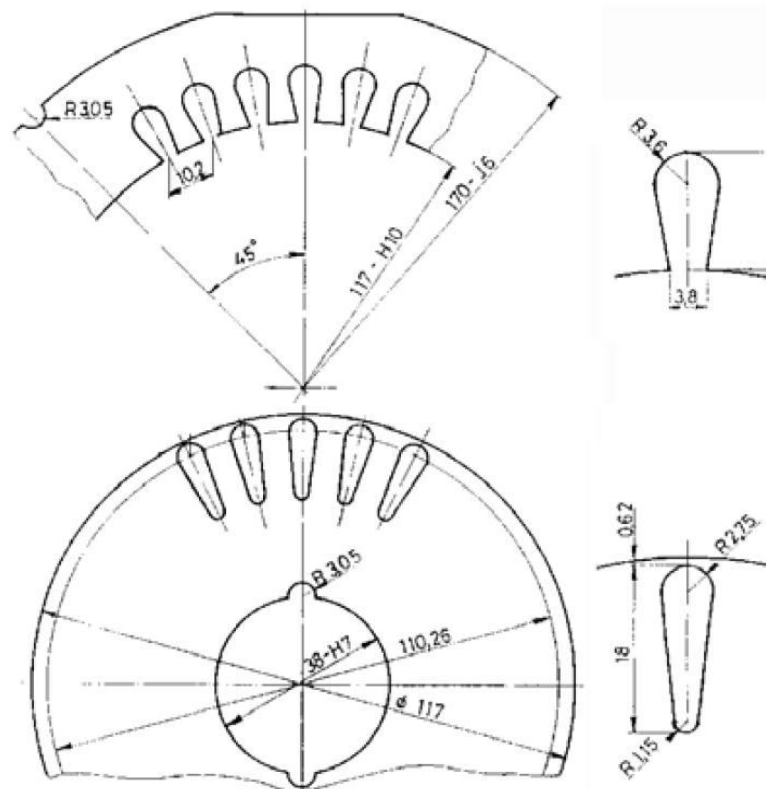


Figure III.1. Dimensions de la machine asynchrone.

Les valeurs nominales de la machine étudiée est donnée par le tableau III.1. Les caractéristiques de la géométrie et du bobinage sont données par le tableau III.2.

Tableau III.1. Caractéristiques de la machine (valeurs nominales) [10].

Valeurs nominales	
Puissance	4.15 kW
Tension	190 V
Fréquence	50 Hz
Vitesse	1459 rpm

Tableau III.2. Caractéristiques géométriques de la machine [10].

Géométrie et bobinage	
Générale	
Epaisseur d'entrefer	$e = 0.25 \text{ mm}$
Longueur du paquet de tôles	$l = 139.5 \text{ mm}$
Stator	
Nombre d'encoche	$N_s = 36$
Nombre de spires en série / encoche	44
Type de connexion	Etoile-Etoile
Nombre de paires de pôles	$p=2$
Diamètre de la culasse	$D_c = 170 \text{ mm}$
Diamètre interne	$D_s = 117 \text{ mm}$
Résistivité du matériau (alliage de cuivre)	$\rho_{Cu} = 1.724\text{e-}8 \text{ } \Omega \text{ m}$
Facteur de bobinage	$f = 0.4171$
Résistance / phase	$R_s = 1.115 \Omega$
Inductance / phase	$L_s = 0.0042 \text{ H}$
Nombre d'encoches / pole / phase	3 encoches
Rotor (cage d'écureuil)	
Nombre d'encoche	$N_r = 28 \text{ bars}$
Résistivité du matériau (aluminium)	$\rho_{Al} = 2.826\text{e-}8 \text{ } \Omega \text{ m}$
Diamètre extérieur	$D_r = 116.5 \text{ mm}$
Diamètre de l'arbre	$D_{arbre} = 38 \text{ mm}$
Résistance d'une portion d'anneau	$R_r = 2.5\text{e-}6 \text{ } \Omega$

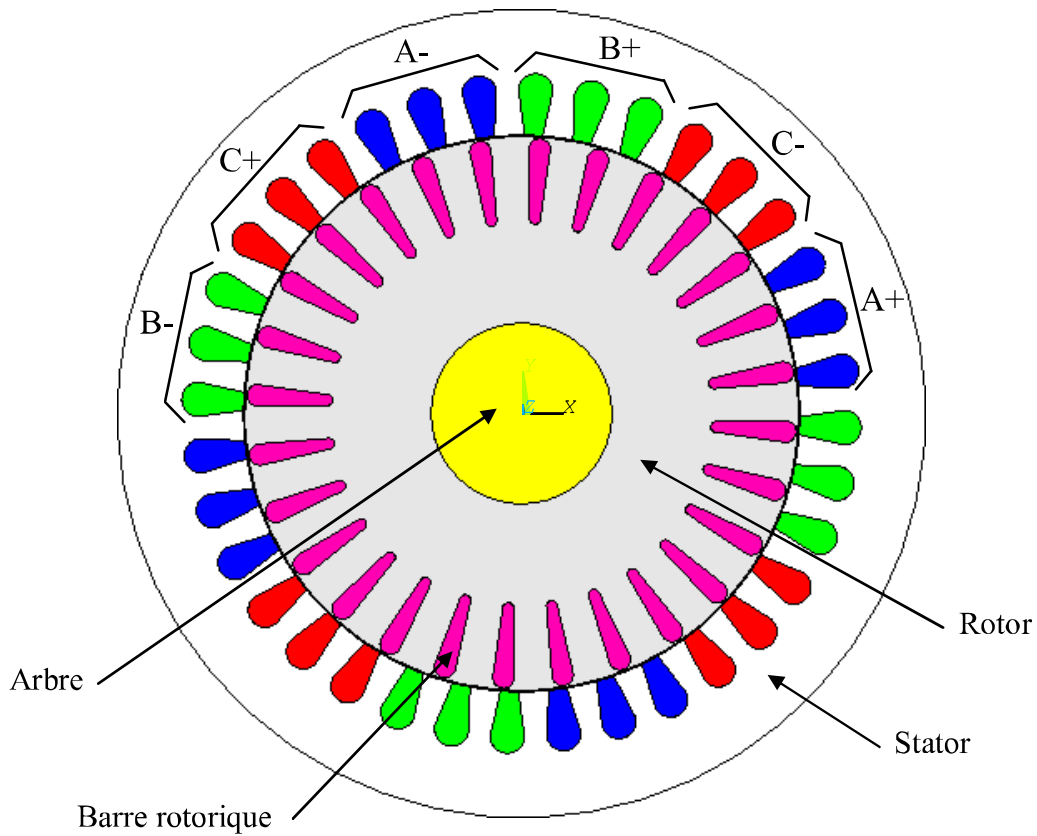


Figure III.2. Circuit magnétique de la machine asynchrone [9].

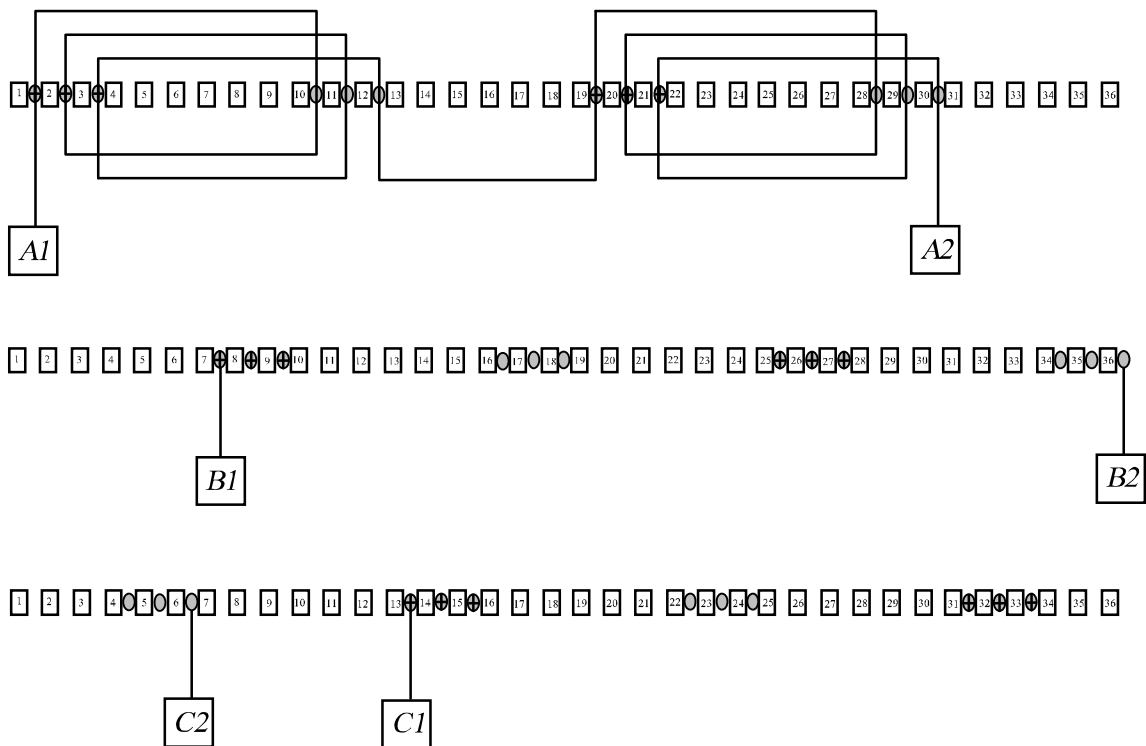


Figure III.3. Répartition du bobinage statorique [9].

La figure III.2 représente le circuit magnétique de la machine asynchrone, la géométrie est très voisine de la machine réelle, tant que la machine est alimentée par une source de tension sinusoïdale triphasée. La figure III.3 présente aussi la répartition de ces trois phases d'alimentation sur les encoches statoriques.

III.2.1. Construction du modèle élément fini appliqué au stator

III.2.1.1. Construction du circuit magnétique

La technique de la construction de la géométrie en utilisant le logiciel ANSYS est très compliquée, puisque les surfaces des régions désirées ne sont pas automatiquement créées par les lignes qui sont déjà créées dans l'espace. Ce qui demande de créer les surfaces à partir des lignes ou des points qui sont déjà définis.

La géométrie complète sera facilement obtenue par le copiage **36 fois** d'une seule portion qui est déjà définie dans le sens antihoraire.

a. Propriétés des matériaux

On a deux régions [9]:

- ❖ *Les encoches statoriques* : sont définies par un matériau qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique $\mu_r=1$, et de sa résistivité électrique, pour notre cas le matériau utilisé est le cuivre ($R_{SVX}=1.724 \cdot 10^{-8} \Omega m$).
- ❖ *La culasse* : est définie par un matériau magnétique qui est caractérisé par sa perméabilité magnétique $\mu_r=1000$ pour le cas linéaire, ou d'une courbe $B(H)$ pour le cas de la non linéarité.

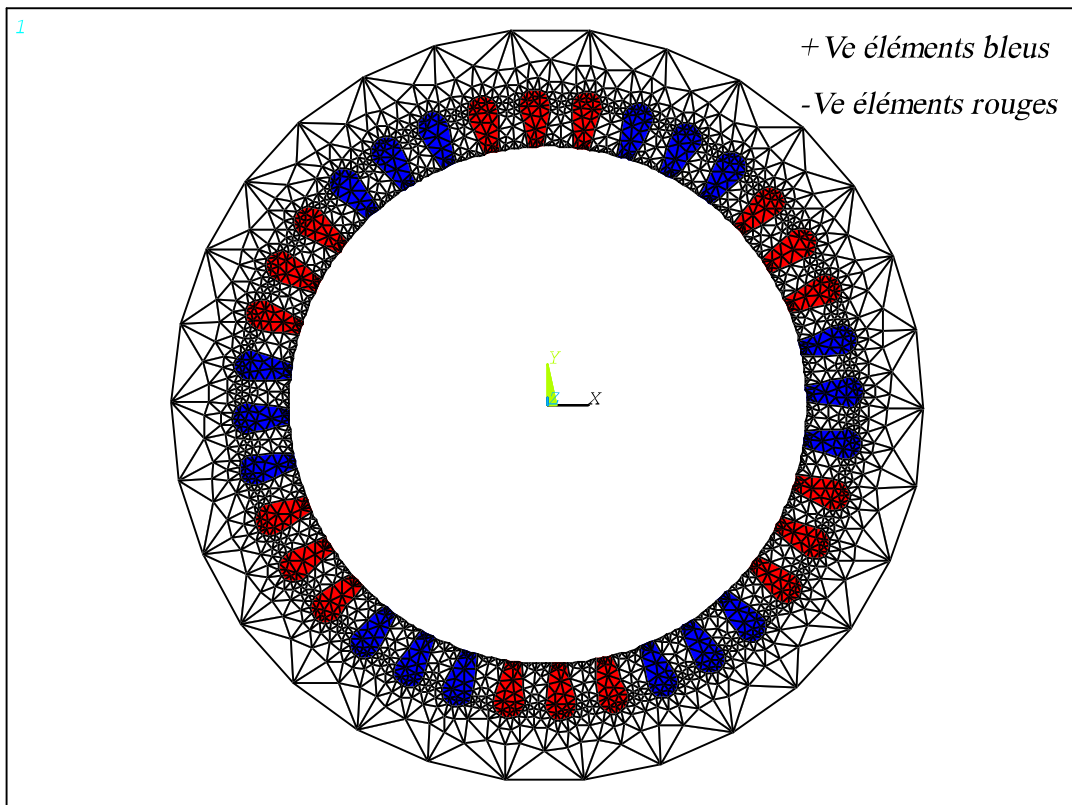


Figure III.4. Direction de la tension d'alimentation [9].

III.2.1.2. Construction du circuit électrique extérieur

Le circuit magnétique du stator étant modélisé, le schéma de connexion des conducteurs électriques est introduit par le circuit électrique extérieur qui comporte des bobines qui seront liées au schéma magnétique de la machine. Elles représentent les conducteurs logés dans les encoches statorique.

La création d'élément de couplage dans le circuit électrique dépend essentiellement de la direction du courant électrique dans l'encoche correspondante. La figure III.5 présente le couplage de trois encoches de la première phase avec les éléments de couplage dans le circuit électrique.

Dans ce modèle la machine est alimentée par une tension sinusoïdale triphasée, le type de connexion est étoile-étoile, alors le circuit électrique extérieur possède trois sources de tension sinusoïdale (V_a , V_b , V_c).

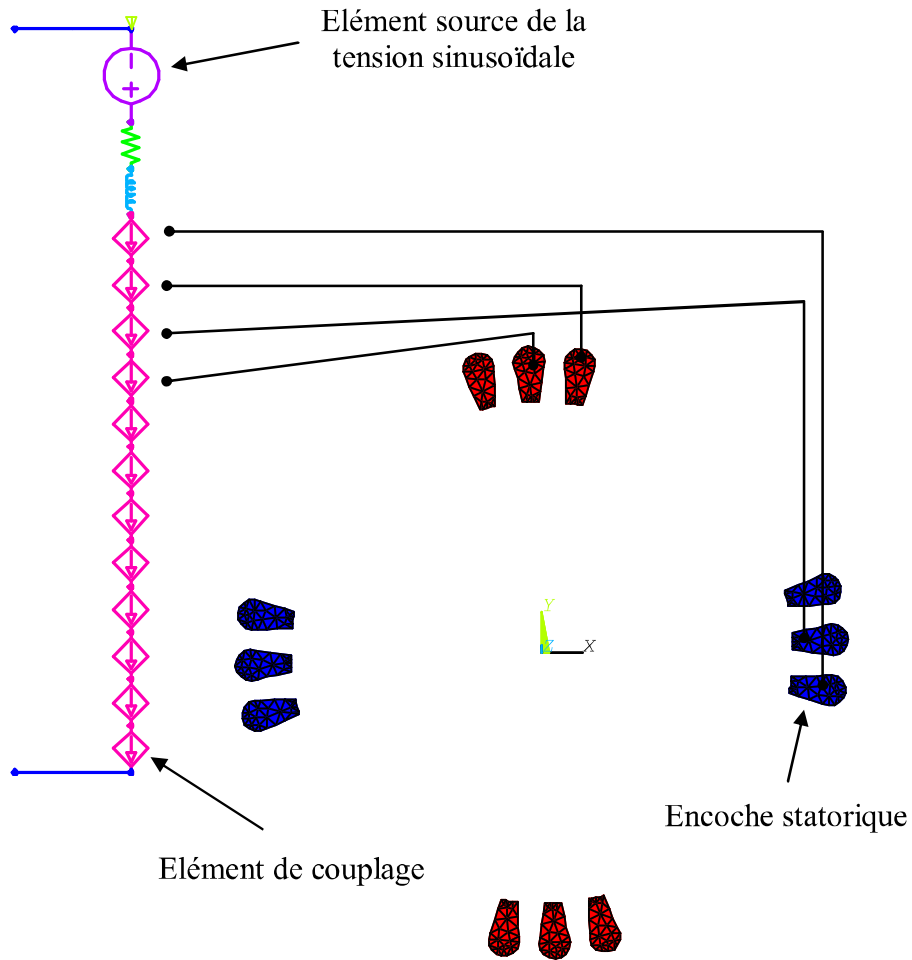


Figure III.5. Couplage des encoches statoriques avec le circuit extérieur [9].

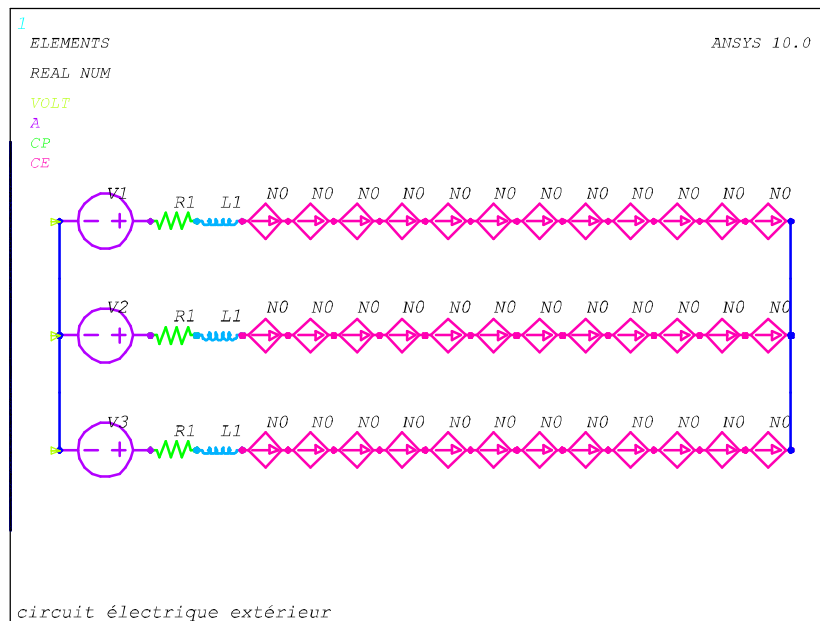


Figure III.6. Circuit électrique au stator.

III.2.2. Construction du modèle éléments finis appliqué au rotor

III.2.2.1. Construction du circuit magnétique

a. Définition de la géométrie

On commence par la définition de la première portion qui correspondante **(360/28) degrés**, le point $(0,0)$ est toujours le centre de symétrie. Le premier arc de cette portion est construit à partir du diamètre extérieur du rotor, ainsi que l'autre arc est construit à partir du diamètre intérieur du rotor. Les lignes de bars sont générées au milieu de cette portion.

Après la construction d'une seule portion rotorique **(360/28 degrés)**, la géométrie complète du rotor sera générée, par le copiage 28 fois de cette portion, afin de sommer toute les portions (figure III.7).

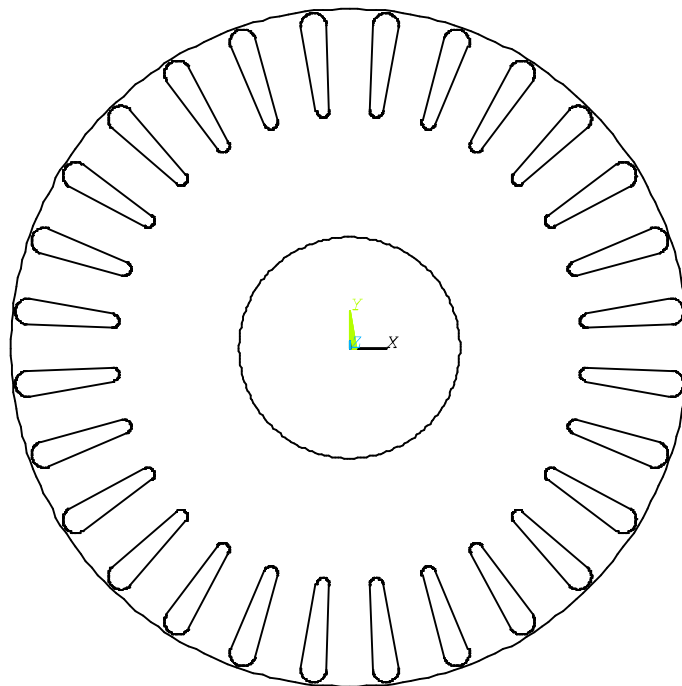


Figure III.7. Géométrie complète du circuit magnétique du rotor.

a. Propriétés des matériaux

La simulation des bars rotoriques par le logiciel ANSYS, nécessite la définition de la résistivité lors de la détermination de la propriété du matériau, dans notre modèle les bars rotoriques sont en aluminium, donc la résistivité de cet dernier sera utilisée.

Pour la région laminée, seulement nous utilisons un matériau ferromagnétique caractérisé par une courbe d'aimantation $B(H)$ pour le cas non linéaire, ou une perméabilité constante pour le cas linéaire.

III.2.2.2 La construction du circuit électrique extérieur

Dans le modèle élément fini du rotor, les bars rotoriques sont liées aux anneaux du court-circuit par les résistances de ces derniers ($R_r = 2.510^{-6} \Omega$), en utilisant l'élément conducteur massif de couplage, ce dernier est l'intermédiaire entre la région des éléments finis (circuit magnétique du rotor) et la région extérieure (circuit électrique du rotor) (figure III.8).

Tant que l'effet des inductances de l'anneau est négligé, l'élément de la résistance de l'anneau est connecté entre chaque deux barres adjacentes, c'est-à-dire entre les deux éléments conducteurs massifs correspondants aux ces barres, et de même façon pour les autres extrémités des éléments de couplage, qui sont liées aussi avec les éléments résistances de l'anneau, pour construire le deuxième anneau de la cage. Tous les éléments de ces résistances doivent posséder une condition aux limites définis par "0 VOLT", appliquée aux nœuds de ces éléments [9].

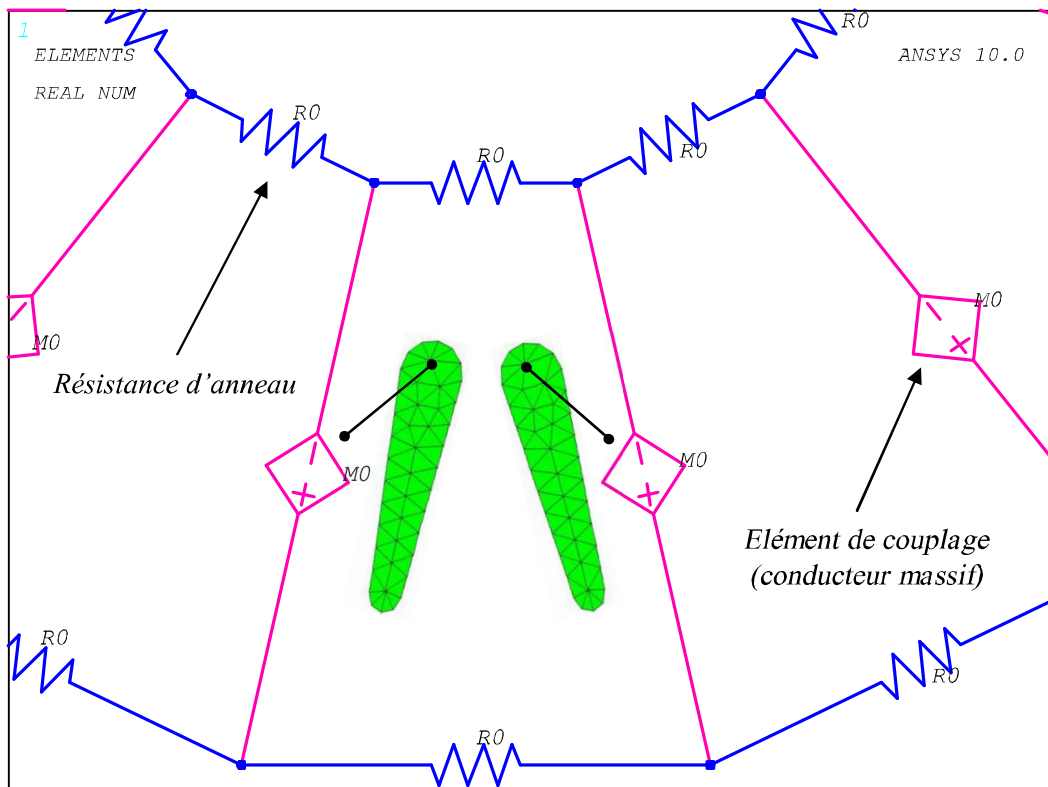


Figure III.8. Couplage des encoches rotoriques avec le circuit extérieur [9].

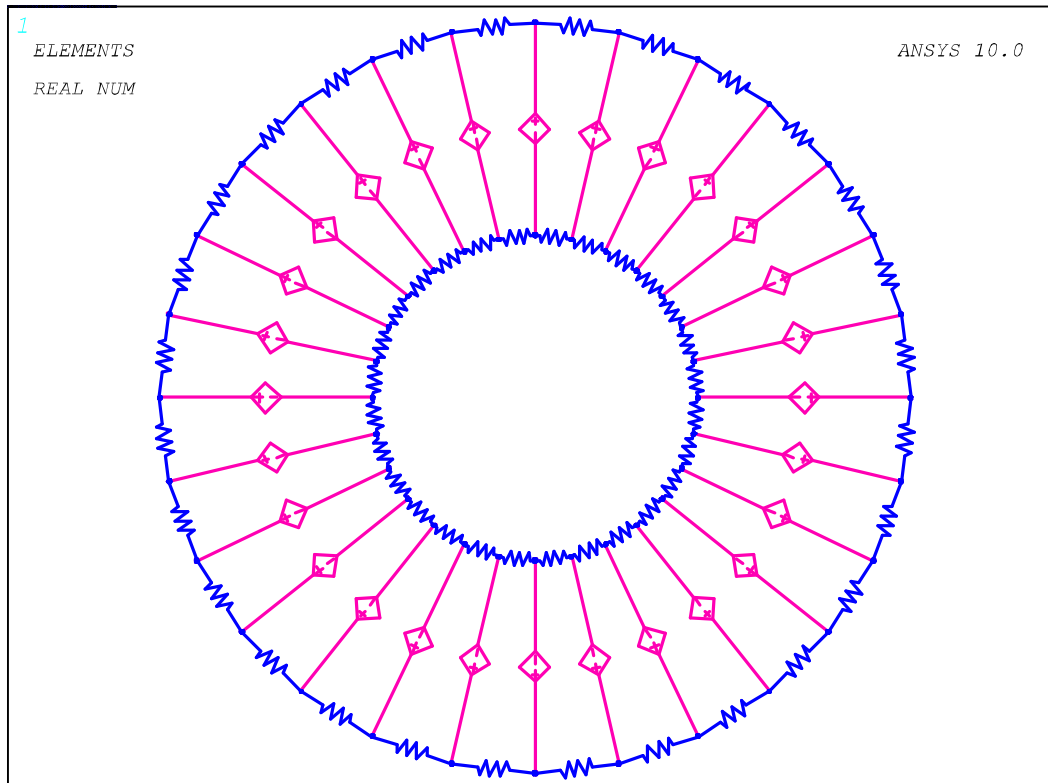


Figure III.9. Circuit électrique au rotor.

III.2.3. Modélisation de la région d'entrefer

La simulation magnétodynamique de la machine avec la méthode des éléments finis nécessite l'utilisation du mouvement, ce mouvement va prendre son lieu dans la région de l'entrefer. Ce qui demande une définition géométrique plus précise par rapport aux autres régions, ainsi cette région doit être maillée d'une manière différente que les autres régions.

III.2.3.1. Définition de la géométrie de l'entrefer

Après la définition de la géométrie complète du stator, ainsi que la géométrie complète du rotor, la région de l'entrefer est automatiquement générée, avec une épaisseur de 0.25 mm , mais dans ce cas l'entrefer est définie comme une seule partie, mais notre technique de mouvement où bien l'utilisation d'une bande de mouvement nécessite de diviser la région de l'entrefer en deux régions équivalentes, chaque région a une épaisseur de 0.125 mm , la première est liée au stator, nommée *STATOR_AIR*, et la deuxième région liée au rotor, nommée *ROTOR_AIR*, donc au milieu de l'entrefer il y a deux lignes qui occupent le même espace, la première ligne est liée au *STATOR_AIR*, tant que la deuxième ligne est liée au *ROTOR_AIR* [11].

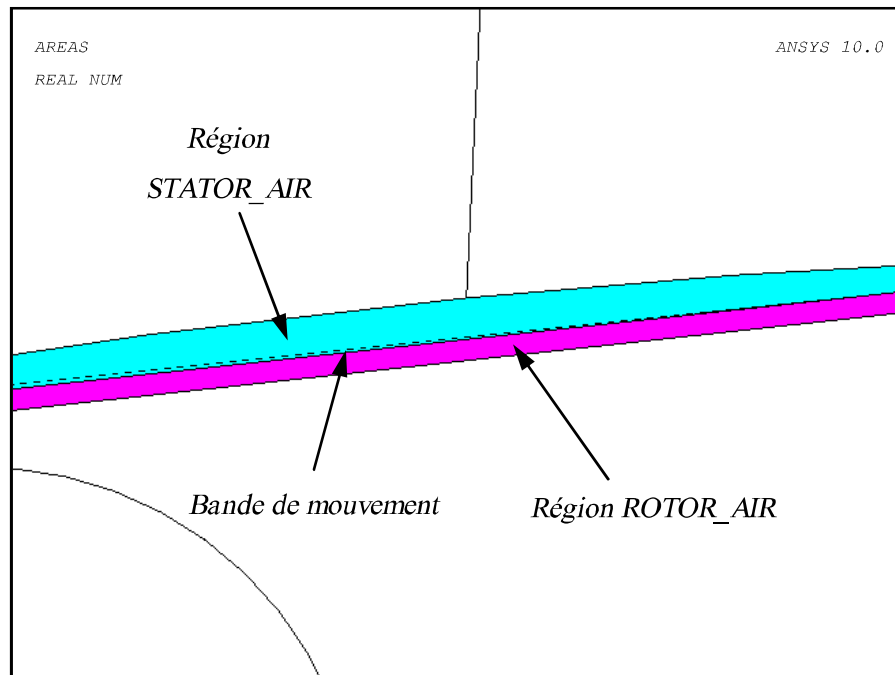


Figure III.10. Géométrie de l'entrefer [9].

III.2.3.2. La bande de mouvement

Dans le domaine de la modélisation des machines électriques tournantes par la méthode des éléments finis, plusieurs méthodes de mouvement existent, selon le logiciel utilisé. Parmi ces méthodes on cite, la méthode des macros éléments, et la méthode de la bande de mouvement. Dans notre cas les régions du rotor et *ROTOR_AIR* sont couplés avec la région du *STATOR_AIR*, on utilisant les équations de couplage (*COUPLING EQUATIONS*), les nœuds liés à la ligne du *STATOR_AIR*, et les éléments liés à la ligne du *ROTOR_AIR*, sont couplés entre eux par la commande « *CEINTF* » [11].

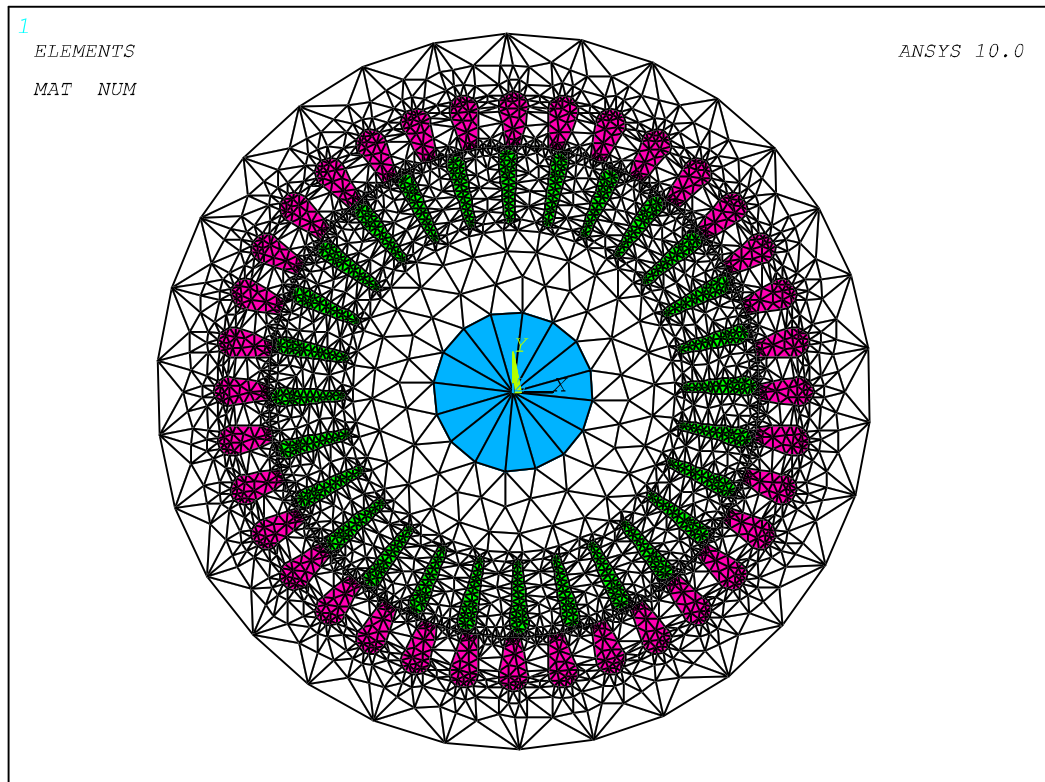


Figure III.11. Maillage de la machine (éléments triangulaires)

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 le temps de calcul sans perte sensible d'information.

III.3. Résultats de simulation

III.3.1. Solution

La machine est alimentée par un système de tension sinusoïdale triphasée (voir figure III.12). Le circuit électrique extérieur du stator possède trois sources de tension sinusoïdale (V_a , V_b , V_c).

Tant que notre technique de solution utilisée est la technique *pas à pas dans le temps*, le type de solution de ce modèle magnétodynamique est **Transient Dynamic**.

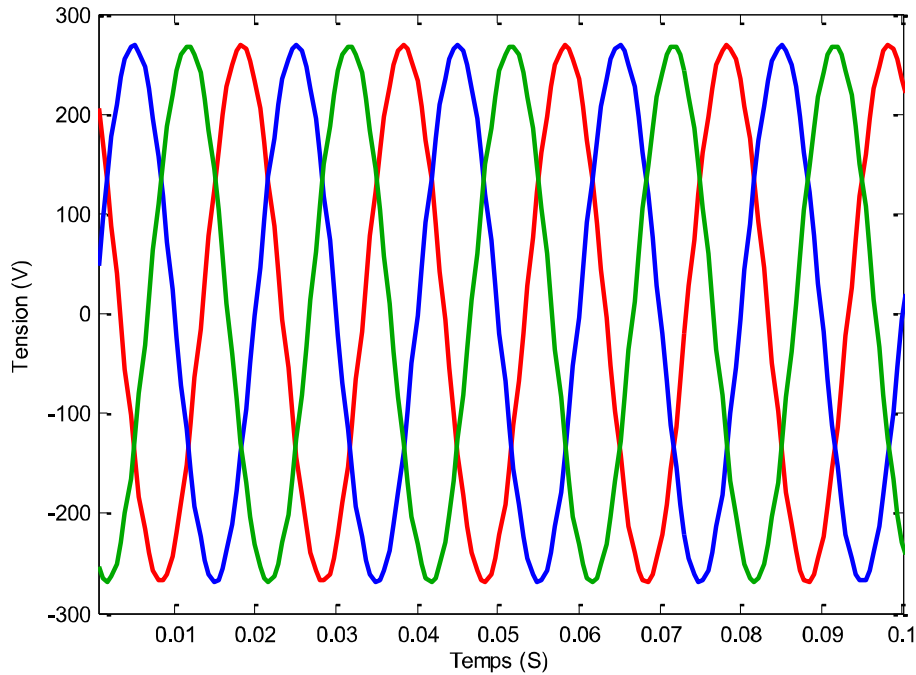


Figure III.12. Tensions d'alimentation.

À partir de l'utilisation de la technique de solution de la machine asynchrone pas à pas dans le temps par la méthode des éléments finis et après la détermination du champ magnétique, la force magnétique et le couple sont calculés par la résolution des équations de Maxwell.

La solution de la partie mécanique est assurée par la méthode de *Runge-Kutta*, et après que l'équation mécanique détermine les deux nouvelles positions angulaire et radiale du rotor, le modèle éléments finis de la machine sera réarrangé par la technique du mouvement d'éléments (*Moving Mesh Technique*), pour recalculer le champ magnétique.

Pour analyser le comportement dynamique de la machine asynchrone en utilisant le type *Transient Dynamic* [11].

Pour notre modèle nous nous utilisons ce type de solution avec les conditions suivantes [9]:

- Pour une vitesse rotorique constante de 1459 rpm, le cycle électrique est divisé en 72 pas discrets, chaque pas est de 0.000571 s.
- Pour chaque pas, les équations de couplage qui se trouvent au milieu de l'entrefer "*Coupling Equations of the Slide Boundary*" sont supprimées, juste après cette suppression, le rotor tourne de "5 degrés" (degré électrique), après cette rotation de nouvelles équations de couplage sont reconstruites.

- Le premier pas sera un pas statique à 0 s, (actuellement on utilise 10^{-9} , puisque ANSYS n'accepte pas le 0).

La figure III.13 présente la répartition des lignes d'équiflux pour la solution statique où nous observons les deux paires de pôles de la machine, qui sont symétriques, alors dans ce premier pas statique nous stabilisons le champ magnétique avant de lancer la solution pas à pas.

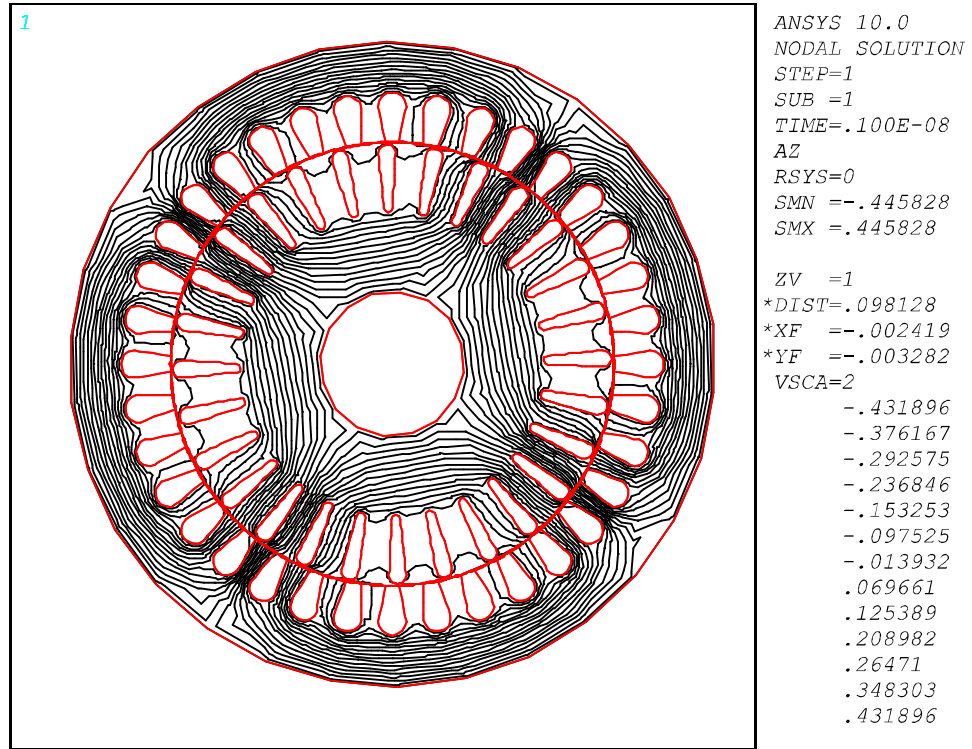


Figure III.13. Répartition des lignes d'équiflux (solution statique).

La figure III.14 présente la distribution des lignes d'équiflux pour une vitesse de 0 rpm, c'est à dire au début du calcul avant d'éteindre le régime permanent, tandis que la figure III.15 présente la distribution des lignes d'équiflux pour une vitesse de 1459 rpm en régime permanent.

Nous observons sur la figures 3.14 que les lignes de champ magnétique traversent les barres perpendiculairement aux parois verticales et que la densité de courant est d'autant plus élevée que l'on se rapproche de l'entrefer (haut de la barre).

Pour une vitesse de 1459 rpm, c'est-à-dire pour un glissement faible, les lignes de flux se passent jusqu'au l'intérieur du rotor (figure III.15). Nous remarquons bien la présence de deux paires de pôles, la distribution des lignes est quasi symétrique par rapport aux axes des pôles.

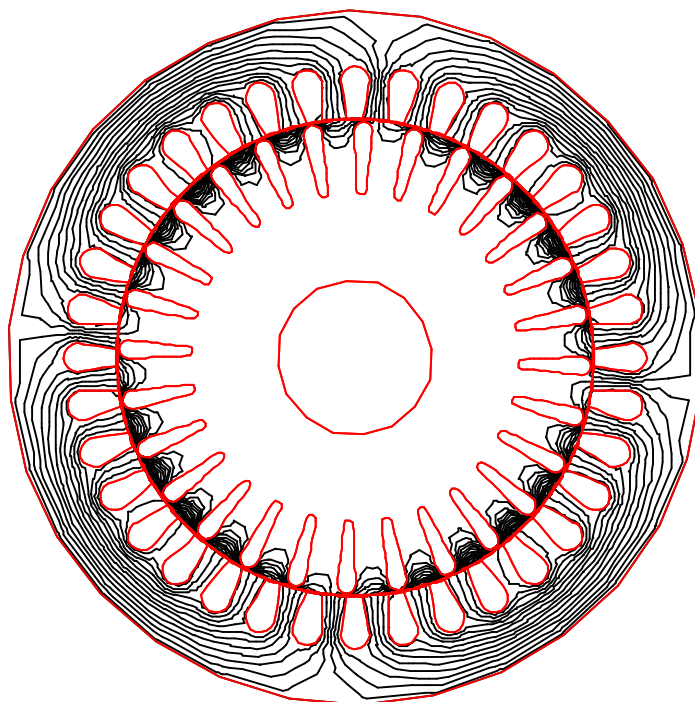


Figure III.14. Répartition des lignes équiflux pour une vitesse de 0 tr/min.

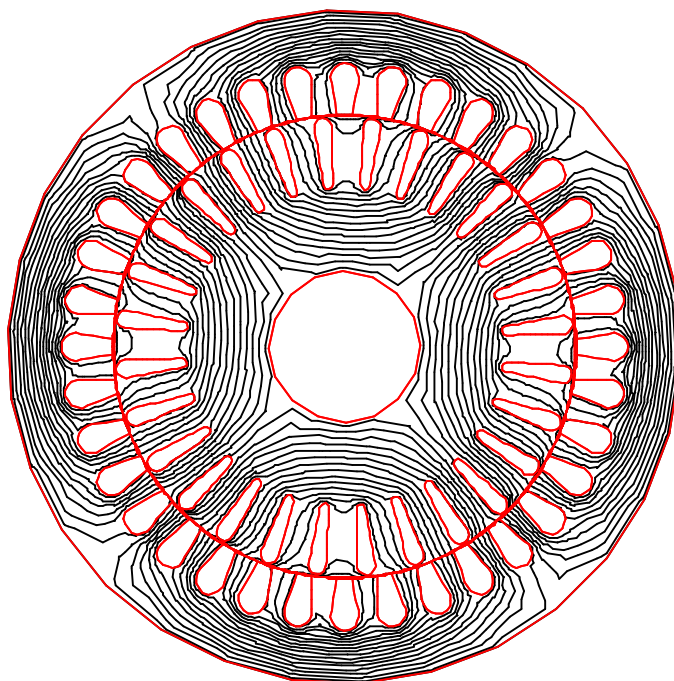


Figure III.15. Répartition des lignes équiflux pour une vitesse nominale.

La figure III.16 présente la répartition de l'induction magnétique dans le circuit magnétique. Cette répartition de l'induction est quasi-symétrique.

La figure III.17 présente la courbe de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer. Nous remarquons une distribution symétrique pour les deux paires de pôles.

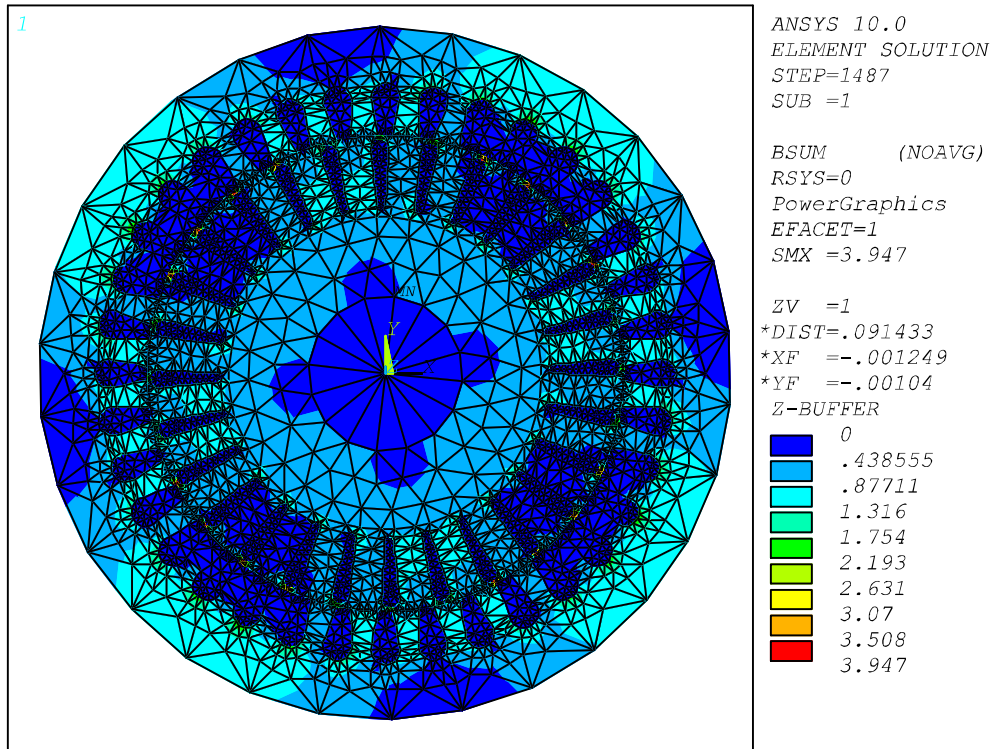


Figure III.16. Répartition de l'induction magnétique.

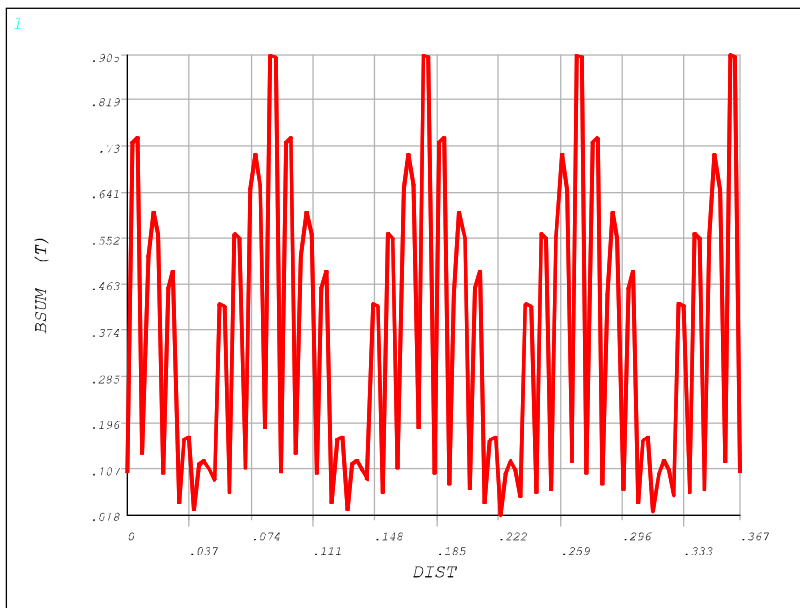


Figure III.17. Courbe de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer.

III.3.2. Simulation de la machine asynchrone avec cassure de barres rotoriques

La simulation de défaut de cassure de barre rotorique, nous permettons de prévoir des détériorations générées dans le moteur.

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

Pour un moteur sain, les courants dans les barres entraînent une répartition symétrique des lignes de flux, l'absence de courants dans les barres cassées annule leur contribution à la création du flux, ce qui explique le resserrement des lignes de flux autour de ces barres (voir figure III.18). Plus il y aura de barres cassées plus le déséquilibre de répartition des lignes de flux s'accroîtra.

La figure III.19, montre l'effet du défaut de cassure des barres rotoriques sur la répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer, pour un moteur sain la répartition de l'induction est symétrique pour les deux paires de pôles, l'apparition du défaut provoque une dissymétrie. Cette dissymétrie augmente fortement avec le nombre des barres

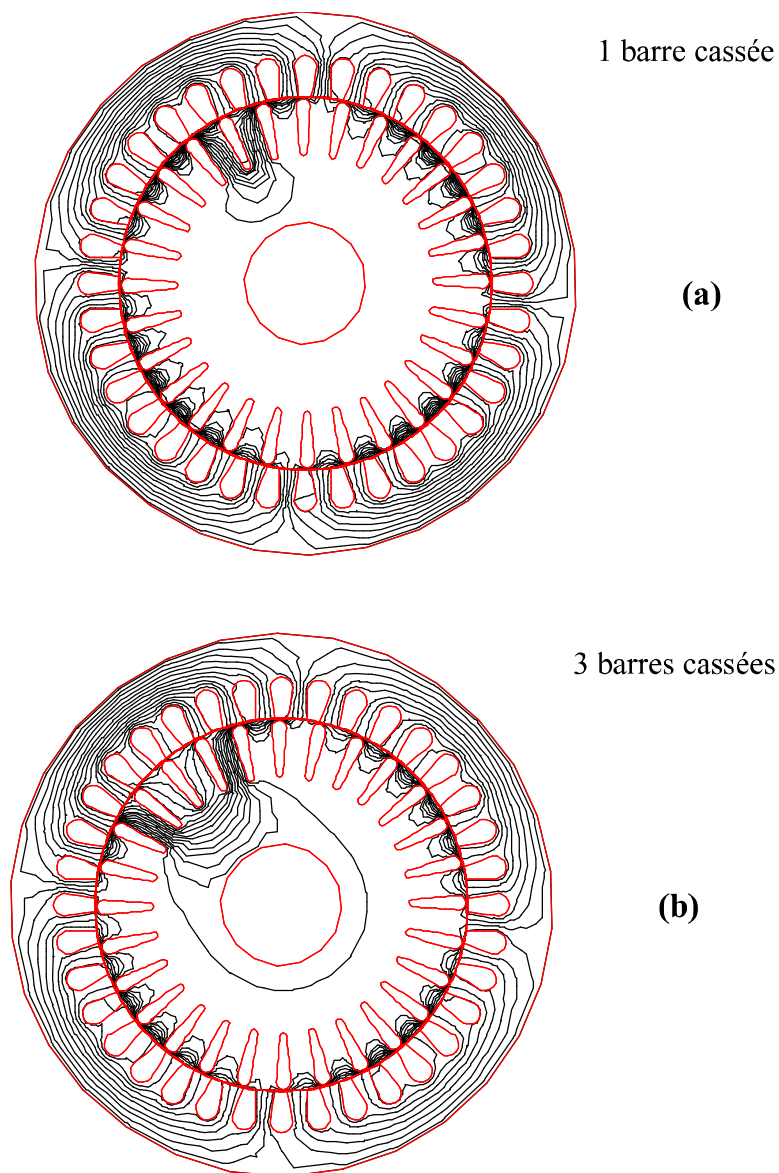


Figure III.18. Répartition des lignes équipotential.

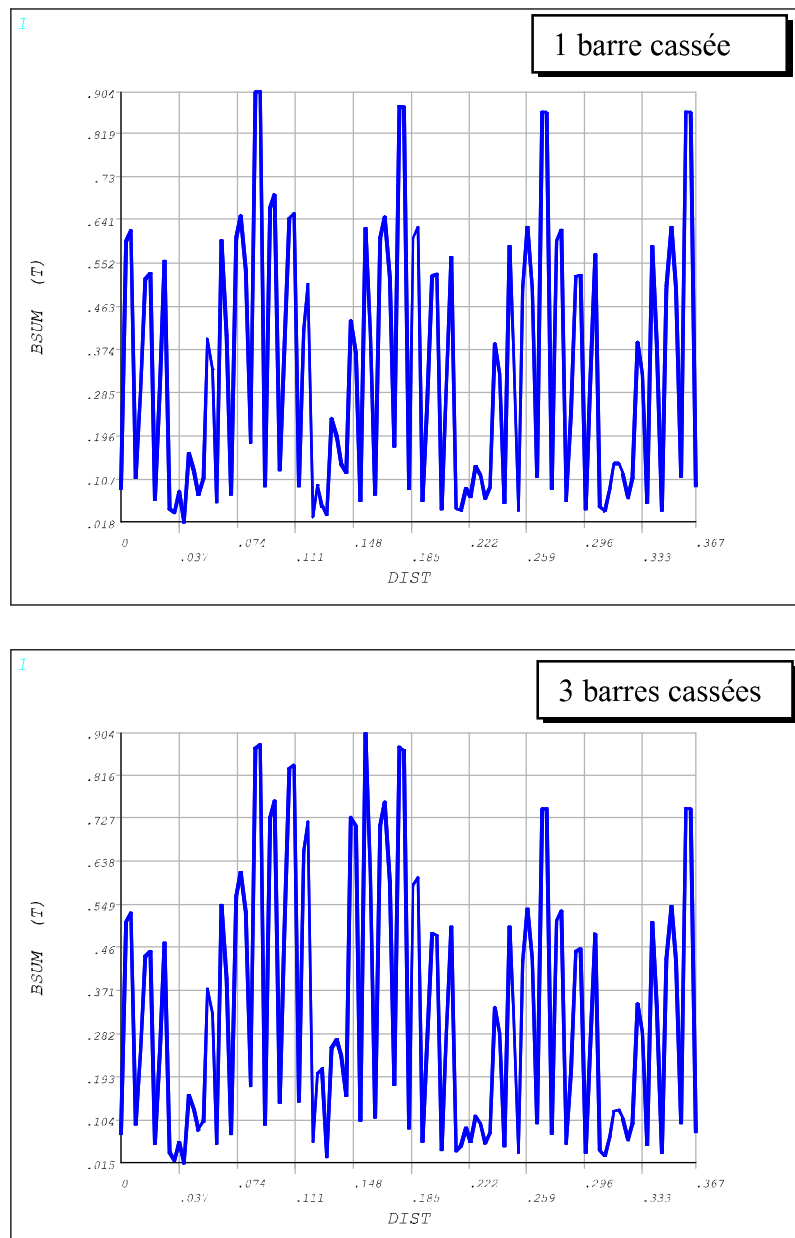


Figure III.19. Courbes de l'induction magnétique le long d'un contour circulaire à l'entrefer.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre un modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone a été développé en utilisant la technique de couplage entre les deux circuits. Le circuit magnétique étant modélisé, le schéma de connexion des conducteurs électriques est introduit. Le circuit électrique représentant le bobinage statorique et les conducteurs massifs de la cage rotorique sont construits séparément.

A travers ce modèle nous simulons un défaut de cassure de barres pour un nombre de barres différent. La visualisation des résultats tirés de cette simulation montre que la cassure des barres rotoriques provoque un déséquilibre sur la répartition des lignes de flux magnétique. La distribution de l'induction magnétique montre aussi un déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Ces déséquilibres augmentent avec le nombre de barres cassées. Les barres saines adjacentes au défaut sont plus sollicitées.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail qui a été présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil. Ce diagnostic a concerné précisément les ruptures de barres.

Au terme de cette étude nous pouvons dégager quelques indices en faveur de nos objectifs, ainsi, un premier chapitre a permis de révéler les fréquents défauts, ainsi que les différents modèles dédiés au diagnostic de la machine asynchrone. L'accent a été mis sur la nécessité d'avoir un modèle optimal afin de pouvoir diagnostiquer au mieux les défauts de la machine asynchrone.

Parmi ces modèle, le modèle éléments finis appliqué à la machine asynchrone est le plus fidèle, le comportement électromagnétique de la machine permet de simuler des dysfonctionnements réels en son sein, avec une manifestation tout à fait localisée du défaut.

Pour aborder notre étude nous donnerons dans le deuxième chapitre une description sur les modèles éléments finis de la machine asynchrone, et le logiciel utilisé.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une modélisation basée sur la résolution des équations électrique et magnétique de la machine asynchrone par la méthode de calcul par éléments finis à travers de la technique de circuits couplés. Notre choix s'est porté sur un modèle magnétodynamique en deux dimensions pour modéliser au mieux le fonctionnement et le comportement réel de la machine asynchrone à cage, afin de simuler des défauts rotoriques.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] M. Sahraoui, "Etude Comparative des Méthodes de Diagnostic des Machines Asynchrones", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2010.
- [2] M. Khov, "Surveillance et Diagnostic des Machines Synchrones à Aimants Permanents: Détection des Courts-Circuits par Suivi Paramétrique", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2009.
- [3] A. Abed, "Contribution à l'Etude et au Diagnostic de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, France, Mars 2002.
- [4] N. Halem, "Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Éléments Finis", Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Algérie, 2015.
- [5] A. Ghoggal, "Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée: Modèle Dédié à la Détection des Défauts", Mémoire de Magistère, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [6] M. Sahraoui, "Contribution au Diagnostic d'une Machine Asynchrone Triphasée à Cage", Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie, 2003.
- [7] J.C Sabonnadière, J.L Coulomb "Calcul des Champs Électromagnétiques". Techniques de l'Ingénieur D3020.
- [8] M. Bouharkat, "Etude de l'évolution des Courant Rotoriques d'une Machine Asynchrone à cage en Régime Dynamique", Thèse de doctorat, université de Batna, Algérie, 2006.
- [9] N. Halem, "Modélisation des Machines Asynchrones en Vue du Diagnostic avec Prise en Compte Adéquate de Circuit Magnétique par Eléments Finis" Mémoire de Magistère, Université d'El-Oued, Algérie, 2010.
- [10] J. Spoorten "Finite Element and Electrical Circuit Modeling of Faulty Induction Machines-Study of Internal Effect and Fault Detection Techniques", Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles (ULB), 2007.

- [11] N. Tong, F. Zhang, J. Wang, "Analysis of Single-Phase Induction Motor by Using Circuit Coupled Finite Element Method", International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, ICEMS 2008, 17-20 Oct. 2008, pp. 4127-4130.