

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE Amar Telidji de Laghouat
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الالكتروتقني
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTENCHIQUE
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

Réalisé par :

**HAMMADI Mohammed Ali
Harouache Boulerbah**

THEME

***Diagnostic des Défauts d'Excentricité d'un Moteur
Asynchrone en Utilisant RMxpert & ANSYS-Maxwell***

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. DOUIDI	Brahim	Président
Mr. SAROUTE	Mohamed	Examineur
Mme BENLARBI	Keltoum	Encadreur
Mr. MOKRANI	Lakhdar	Co-encadreur

Année Universitaire 2022/2023

ملخص : الهدف من هذه المذكرة هو تشخيص أعطال التمحور اللا مركزي في الآلات الكهربائية غير المتزامنة ثلاثية الأطوار ذات قفص السنجاب بواسطة نموذج محاكاة يعتمد على طريقة العناصر المنتهية ثنائية الأبعاد. بدأنا بعرض حال يخص تشخيص الأعطاب في الآلات غير المتزامنة. ثم استخدمنا برنامج *ANSYS-RMxpert* لتحديد خصائص المحرك المدروس ذي إستطاعة قدرها 30 كيلو واط. بعد ذلك، قمنا بمحاكاة الجهاز المدروس في حالته السليمة وفي حالة العطب باستخدام برنامج *ANSYS-Maxwell 2D*. وأخيراً، تم استخدام تقنية التحليل الطيفي لتيار العضو الثابت للمحرك باستعمال تحويلة فورييه السريعة (FFT) بنجاح لتشخيص أعطال التمحور اللا مركزي الثابتة والديناميكية في الآلة غير المتزامنة المدروسة.

كلمات مفتاحية : محرك لانتزامني ذو إستطاعة قدرها 30 كيلواط، برنامج *ANSYS-RMxpert*، حساب خصائص المحرك، طريقة العناصر المنتهية، برنامج *ANSYS-Maxwell 2D*، نموذج ثنائي الأبعاد لمحرك سليم، نموذج ثنائي الأبعاد لمحرك ذي عطل التمحور للا مركزي الثابت و الديناميكي، التحليل الطيفي بواسطة *FFT*، تيار العضو الثابت للمحرك، تشخيص اعطال التمحور الا مركزي.

Résumé : L'objectif de ce mémoire est le diagnostic des défauts d'excentricité dans les Machines ASynchrones (MAS) triphasées à cage d'écureuil par un modèle de simulation basé sur la méthode des éléments finis 2D. Nous avons commencé par établir un état de l'art sur le diagnostic des défauts dans les machines asynchrones. Ensuite, nous avons utilisé logiciel *ANSYS-RMxpert* pour caractériser le moteur étudié d'une puissance de 30 kW. Puis, en utilisant le logiciel *ANSYS-Maxwell 2D*, nous avons simulé la machine étudiée en mode sain et en mode défaillant. Et enfin, la technique d'analyse spectrale par *FFT* du courant statorique a été utilisée avec succès pour diagnostiquer des défauts d'excentricité statique et dynamique dans la machine asynchrone étudiée.

Mots clés : MAS de 30 kW, *ANSYS-RMxpert*, Caractérisation du MAS, Méthode des éléments finis, *ANSYS-Maxwell 2D*, Modèle 2D du MAS en mode sain, Modèle 2D du MAS en mode défaillant, Excentricité statique et dynamique, Analyse spectrale par *FFT*, Courant statorique, Diagnostic de défaut d'excentricité.

Abstract: The objective of this memoir is the diagnosis of eccentricity fault in a three-phase squirrel cage Induction Motor (IM) by a simulation model based on the 2D finite element method. We started by establishing a state of the art on the diagnosis of faults in asynchronous machines. Then, we used *ANSYS-RMxpert* software to characterize the studied motor with a power of 30 kW. Next, using the *ANSYS-Maxwell 2D* software, we simulated the studied machine in healthy and faulty mode. Finally, the stator current *FFT* spectral analysis technique was successfully used to diagnose static and dynamic eccentricity faults in the asynchronous machine under investigation.

Keyword: IM of 30 kW, *ANSYS-RMxpert*, IM Characterization, Finite element method, *ANSYS-Maxwell 2D*, IM 2D model in healthy mode, IM 2D model in faulty mode, Static and dynamic eccentricity, Spectral analysis by *FFT*, Stator current, Eccentricity fault diagnosis.

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu, qui m'a offert le courage et la volonté nécessaires pour affronter les aléas de la vie.

Je dédie ce travail :

à mes très chers parents,

à mon frère et mes sœurs,

à mes chers ami(es) et mes collègues de la promotion

«2^{ème} Master Machines Electriques».

Hammadi Mohammed Ali

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le bon dieu, qui m'a offert le courage et la volonté nécessaire pour affronter les aléas quoi de la vie.

Je dédie ce modeste travail :

à ma chère mère,

à mon cher père,

à ma chère femme et mes enfant,

à mes frères et ma sœur,

à mes chers amis et mes collègues de la promotion

«2^{ème} Master Machines Electriques».

Harouache Boulerbah

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu **Dieu** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années et surtout cette année pour mener à bien notre mémoire de Master.

Ensuite, nous remercions notre encadreur **Mme BENLARBI Keltoum**, pour l'aide et le temps, qu'elle a bien voulu nous consacrer tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous exprimons aussi notre gratitude à notre co-encadreur **Mr MOKRANI Lakhdar** qui nous a aidés à achever dans de bonnes circonstances notre projet de fin d'études.

Nous exprimons également notre gratitude et nos profonds remerciements aux membres du jury qui nous ont honorés par leur présence et leur discussion fructueuse de notre travail, en l'occurrence monsieur **DOUIDI Brahim** en qualité de président du jury et monsieur **SAROUTE Mohamed** en qualité d'examineur.

Finalement, nous tenons à témoigner notre profonde gratitude à l'université de **Laghouat** représentée par les enseignants du département d'électrotechnique ainsi que le personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide et leur disponibilité.

Nous tenons à remercier toutes les personnes, qui nous ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, notamment **Mr Ghozlane Ismaïl**.

Liste des Symboles

Liste des Symboles

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité</i>
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone	-
<i>CAO</i>	Conception Assisté par Ordinateur	-
f_s	Fréquence du courant fondamental statorique	Hz
f_{bt}	Fréquence des harmoniques du courant de phase statorique	Hz
g	Glissement	-
<i>CC</i>	Court-Circuit	-
H_{s0}	Hauteur de la cale dans une encoche	mm
H_{s1}	Hauteur de la tête de la dent	mm
H_{s01}	Epaisseur du fer au niveau de la fermeture d'encoche	mm
H_{s2}	Hauteur de l'encoche	mm
B_{s0}	Ouverture de l'encoche	mm
B_{s1}	Largeur minimale de l'encoche (statorique, rotorique)	mm
B_{s2}	Largeur maximale de l'encoche (statorique, rotorique)	mm
R_s	Résistance de phase statorique	Ohm
N_s	Vitesse de synchronisme	tr/min
N	Vitesse de rotation	tr/min
<i>FFT</i>	Transformée de Fourier Rapide	-

I_n	Courant nominal	A
$2D$	Bidimensionnel	-
dB	Décibel	-
$3D$	Tridimensionnel	-
n_b	Nombre de barres rotoriques	-
n_d	Ordre des harmoniques d'excentricité	-
p	Nombre de paires de pôles	-
ν	Ordre des harmoniques de temps de la FMM	-
f_{exc}	Fréquence d'harmonique d'excentricité	Hz
f_m	Fréquence d'harmonique d'excentricité mixte	Hz
f_e	Fréquence externe (bagues)	Hz
f_i	Fréquence interne (bagues)	Hz
f_s	Fréquence d'alimentation	Hz
f_r	Fréquence de rotation du rotor	Hz
f_{sb}	Fréquence d'encoches au rotor	Hz
k	Nombre entier naturel est impair	-

Liste des Figures

Liste des Figures

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
<i>Figures du Chapitre I</i>	
Figure I.1 Vue éclatée d'un moteur asynchrone	6
Figure I.2 Causes internes des défauts de la MAS à cage	7
Figure I.3 Causes externes des défauts de la MAS à cage	8
Figure I.4 Anneau de proportions des défauts du moteur asynchrone	9
Figure I.5 Différents défauts statoriques	10
Figure I.6 Défauts de court-circuit	12
Figure I.7 Défaut de rupture des barres de rotor	13
Figure I.8 Rupture d'anneau de court-circuit de la cage d'écureuil du rotor	14
Figure I.9 Types d'excentricité : a) statique ; b) dynamique et c) mixte	16
Figure I.10 Diaporama des méthodes de diagnostic des machines électriques	20
Figure I.11 Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	21
<i>Figures du Chapitre II</i>	
Figure II.1 Ansys-Maxwell 2019 R3	27
Figure II.2 Interface de sélection du type de machines dans <i>RMxpert</i>	27
Figure II.3 Fenêtre d'un projet de <i>RMxpert</i>	28
Figure II.4 Fenêtre des grandeurs nominales de la machine dans <i>RMxpert</i>	29
Figure II.5 Fenêtre de quelques paramètres du moteur étudié par <i>RMxpert</i>	30
Figure II.6 Fenêtre des paramètres du stator dans <i>RMxpert</i>	31

Figure II.7 Modèle choisi pour l'encoche de stator	32
Figure II.8 Fenêtre des paramètres des encoches du stator dans <i>RMxpert</i>	33
Figure II.9 Fenêtre des paramètres d'enroulement statorique	34
Figure II.10 Fenêtre de choix du type de l'enroulement statorique	34
Figure II.11 Paramétrage de la partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche	35
Figure II.12 Géométrie du stator du moteur étudié	35
Figure II.13 Type d'encoches choisi au rotor	36
Figure II.14 Fenêtre des paramètres des encoches du rotor	37
Figure II.15 Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor	38
Figure II.16 Géométrie du rotor du moteur étudié	39
Figure II.17 Quelques caractéristiques statiques du moteur étudié	40
Figures du Chapitre III	
Figure III.1 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée	44
Figure III.2 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur étudiée	44
Figure III.3 Répartition des champs magnétiques dans une section 2D du moteur étudié à vide	46
Figure III.4 Quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage à vide	48
Figure III.5 Répartition des champs dans une section 2D du moteur étudié en charge sous maxwell 2D	50
Figure III.6 Quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage en charge	52
Figure du Chapitre IV	
Figure IV.1 Désactivation du partitionnement de la géométrie d'une machine sous <i>RMxpert</i>	56
Figure IV.2 Excentricité statique créée par décalage à gauche du stator de 0.1mm	57

Figure IV.3 Maillage de la section 2D du moteur étudié	58
Figure IV.4 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge dans le cas d'une excentricité statique	59
Figure IV.5 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge dans le cas d'une excentricité dynamique	60
Figure IV.6 Distribution des lignes du flux dans la machine étudiée fonctionnant en charge et en mode défaillant	62
Figure IV.7 Répartition de l'induction magnétique dans la machine étudiée fonctionnant en charge et en mode défaillant	63
Figure IV.8 Zoom du courant statorique en régime établi pour différents modes de fonctionnement	65
Figure IV.9 Spectres du courant statorique pour différents modes de fonctionnement	67

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Page</i>
<i>Tableaux du Chapitre I</i>	
Tableau I.1 Différents harmoniques du courant statorique et de couple	18
<i>Tableaux du Chapitre II</i>	
Tableau II.1 Paramètres nominaux de la machine étudié	29
Tableau II.2 Paramètres du moteur étudié sous <i>RMxpert</i>	30
Tableau II.3 Paramètres du stator du moteur étudié	31
Tableau II.4 Paramètres des encoches du stator	32
Tableau II.5 Paramètres de l'enroulement du stator	33
Tableau II.6 Paramètres du rotor du moteur étudié	36
Tableau II.7 Paramètres des encoches du rotor	37
Tableau II.8 Paramètres des barres de la cage du rotor	38
Tableau II.9 Quelques caractéristiques du moteur étudié calculées par <i>RMxpert</i>	39
<i>Tableaux du Chapitre III</i>	
Tableau III.1 Paramètre de moteur à vide	45
Tableau III.2 Paramètres du moteur au démarrage en charge	49
<i>Tableaux du Chapitre IV</i>	
Tableau IV.1 Effet d'une excentricité de 11% sur les caractéristiques de la machine étudiée	61
Tableau IV.2 Harmoniques principales dues aux encoches pour différents mode de fonctionnement	68

Sommaire

Sommaire

Résumé	I
Dédicaces	II
Remerciements	IV
Liste des symboles	V
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	XII
Sommaire	XIV
Introduction Générale	1

Chapitre I Etat de l'Art sur le Diagnostic des Défauts de la Machines Asynchrones

I.1. Introduction.....	5
I.2. Constitution de la machine Asynchrone	5
I.3. Principe de fonctionnement de la machine Asynchrone.....	6
I.4. Défaillances de la machine Asynchrone	7
I.4.1. L'origine des défauts	8
I.4.2. Défaillances de la machine	8
I.4.2.1. Défauts au stator.....	9
a) Défauts d'isolant dans les enroulements.....	10
b) Court-circuit entre spires	11
c) Court-circuit entre phases	11
d) Défauts de circuit magnétique	12
I.4.2.2. Défauts au rotor.....	12
a) Rupture de barres dans les machines	13
b) Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit.....	14
c) Défauts du flasque	15
d) Défauts de l'arbre	15
e) Excentricité	15
I.5. Défauts d'Excentricité	15
I.5.1. Types d'excentricité	16
I.5.2. Harmoniques dû à l'excentricité.....	17
I.5.3. Différent harmoniques des défauts dans une machine asynchrone	18
I.6. Méthodes de diagnostic	19

I.6.1. Diagnostic des défauts par estimation paramétrique	20
I.6.2. Diagnostic par traitement de signal	20
I.6.3. Diagnostic par le suivi des grandeurs mesurables	21
I.7. Utilisation de la méthode des éléments finis pour le diagnostic des défauts	22
I.8. Conclusion	23

Chapitre II : Caractérisation de la Machine Asynchrone Etudiée par RMxpert

II.1 Introduction	25
II.2 Présentation de la machine étudiée	25
II.3 Présentation du logiciel RMxpert.....	25
II.3.1 Spécification et avantage de RMxpert et ses applications.....	25
II.3.2 Nouvelle conception sous RMxpert	26
II.3.3 Introduction des paramètres caractéristiques de la machine	28
II.3.4 Paramétrage du stator.....	30
II.3.5 Paramétrage des encoches statoriques	32
II.3.6 Paramétrage de l'enroulement statorique	33
II.3.7 Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche	34
II.3.8 Paramétrage du rotor.....	35
II.3.9 Paramétrage des encoches du rotorique	36
II.3.10 Paramétrage de l'enroulement rotorique.....	37
II.4 Caractérisation du moteur étudié	39
II.5 Résultats de simulation	39
II.6 Conclusion.....	41

Chapitre III Simulation du Moteur Etudié sous Maxwell 2D en Mode Sain

III.1 Introduction.....	43
III.2 Etapes de création du modèle Maxwell-2D du moteur étudié	43
III.3 Présentation des résultats de simulation de moteur à étudier avec Maxwell 2D	44
III.3.1 Démarrage à vide du moteur étudié avec Maxwell 2D	45
III.3.2 Démarrage en charge moteur étudié avec Maxwell 2D	49
III.4 Conclusion	53

Chapitre IV Simulation de la Machine Etudié en Mode Défaillant par Maxwell-2D

IV.1 Introduction	55
IV.2 Simulation du moteur étudié sous <i>Maxwell-2D</i> en mode défaillant	55
IV.3 Impact du défaut d'excentricité sur les performances de la machine	58
IV.4 Détection des défauts d'excentricité par analyse spectrale	63
IV.4.1 Analyse spectrale du courant statorique	63
IV.5 Conclusion	68
Conclusion Générale	70
Bibliographie	72

Introduction **générale**

Introduction générale

Ce travail rentre dans le cadre du diagnostic des défauts d'excentricité dans les machines électriques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil en particulier. Ce dernier un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût.

Dans l'ensemble, le domaine d'application du moteur asynchrone à cage est très vaste et caractérisé par une diversité d'exploitation dans différents secteurs stratégiques. Nous citons entre autres la traction ferroviaire, la propulsion électrique des navires, le pompage, la ventilation, les machines-outils ...etc [1]. Il est également, omniprésent dans les secteurs de pointes (comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie,...etc.) qui nécessitent une continuité de service et/ou une maintenance préventive.

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques, un certain nombre de contraintes de différentes natures (thermiques, électriques, mécaniques et d'environnement) peuvent affecter la durée de vie de celle-ci en faisant apparaître des pannes dans le stator et le rotor. Ces pannes occasionnent des pertes économiques considérables. Il est impératif donc de mettre en œuvre des systèmes de surveillance adéquats afin d'éviter des arrêts imprévus [2].

Parmi ces défauts, on trouve des anomalies d'excentricité caractérisée par une perte de coaxialité entre le stator et le rotor et fait apparaître une asymétrie mécanique et électromagnétique au niveau de la machine. C'est dans ce contexte que rentre ce travail qui vise le diagnostic de ce type de défaut d'excentricité en utilisant un logiciel de calcul puissant à base de la méthode des éléments finie à savoir *Ansys-Maxwell*.

Pour ce faire, nous avons subdivisé notre mémoire en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons donner une brève description du moteur asynchrone triphasé. Nous allons aussi présenter les principaux défauts pouvant affecter le fonctionnement de celui-ci, en mettant le point sur les défauts d'excentricité, ainsi qu'une classification des méthodes de diagnostic.

Et dans le second chapitre, nous allons présenter brièvement le module *ANSYS-RMxpert* qui est un outil de conception des machines électriques, que nous allons utiliser pour caractériser le moteur étudié en régime statique.

Dans le troisième chapitre, nous allons élaborer le modèle en éléments finis de la machine en mode sain afin d'effectuer des simulations dynamiques sous *Maxwell-2D* tout en présentant cet outil de *CAO* des dispositifs électromagnétiques.

Et dans le dernier chapitre, nous allons de nouveau élaborer une modélisation sous *Maxwell-2D* et analyser les performances dynamiques de la machine étudiée fonctionnant en mode défaillant concernant des excentricités statique et dynamique. Afin de diagnostiquer ce genre de défauts, une analyse spectrale par *FFT* sera effectuée sur le courant statorique.

Ce mémoire sera clôturer par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et avance quelques perspectives concernant une éventuelle continuation de ce travail.

Chapitre I

Etat de l'Art sur le Diagnostic des Machines Asynchrones

I.1 Introduction

Une machine asynchrone, également appelée moteur asynchrone ou moteur à induction, est un type de moteur électrique largement utilisé dans diverses applications industrielles, commerciales et résidentielles. C'est un type de moteur électrique populaire pour ses avantages économiques, de fiabilité et de facilité d'entretien.

En particulier Le moteur asynchrone à cage d'écureuil est certainement la machine électrique la plus fréquemment utilisée dans l'industrie, du fait de sa grande robustesse, de son bon rendement, de son excellente fiabilité et enfin de son faible coût.

Dans ce chapitre nous allons présenter dans un premier lieu un aperçu sur les différents défauts dans les machines électriques tournantes, leur classification et leurs origines. Puis, nous allons d'écrire les méthodes de diagnostic les plus fréquemment utilisées.

Notamment le défaut d'excentricité de la machine asynchrone qui fera l'objet de ce travail.

I.2 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est constituée de plusieurs composants importants voir figure (I.1) chacun jouant un rôle clé dans son fonctionnement. Les principaux composants de la machine asynchrone sont :

- stator : qui est le composant fixe de la machine est qui génère un champ magnétique tournant.
- rotor : qui est le composant rotatif qui est entraîné par le champ magnétique généré par le stator.
- enroulement de stator : Ce sont les bobines qui sont fixées sur le stator et qui génèrent le champ magnétique tournant.
- la cage d'écureuil : un support en forme de cage qui est placé sur le rotor et qui contient des barres métalliques connectées aux enroulements de rotor.
- bagues de transmission : Ce sont des pièces qui sont utilisées pour transmettre la puissance du rotor au dispositif externe.
- boîtier : C'est le boîtier qui contient tous les composants de la machine.
- ventilateur : Il sert à refroidir la machine en dissipant la chaleur générée par le fonctionnement.

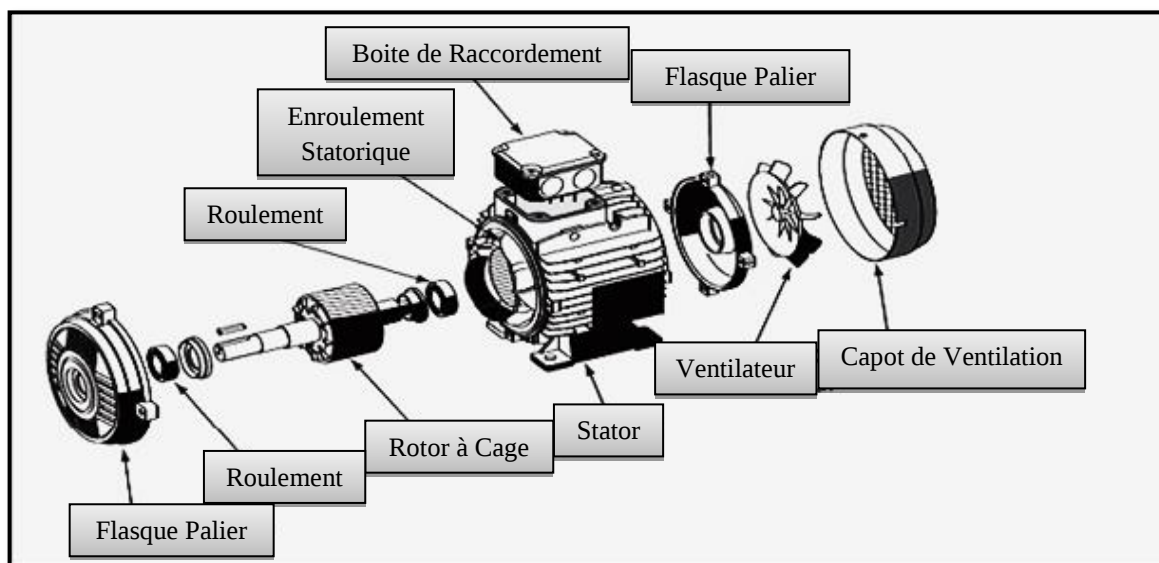


Figure I.1 Vue éclatée d'un moteur asynchrone [1]

I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

La machine asynchrone, également connue sous le nom de machine à induction, est un type de moteur électrique utilisé pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Le fonctionnement de cette machine est basé sur le principe de l'induction électromagnétique. Elle est composée de deux parties principales : le stator et le rotor. Le stator est la partie stationnaire de la machine et est constitué d'un ensemble de bobines enroulées autour d'un noyau de fer. Le rotor est la partie mobile de la machine et est constitué d'un ensemble de barres conductrices reliées entre elles par des anneaux de cuivre. Lorsque l'alimentation électrique est fournie au stator de la machine asynchrone, un champ magnétique tournant est créé. Ce champ magnétique induit un courant électrique dans les barres conductrices du rotor, ce qui crée un deuxième champ magnétique dans le rotor. Les deux champs magnétiques agissent l'un sur l'autre pour produire un couple électromagnétique, qui fait tourner le rotor.

La vitesse de rotation du rotor dépend de la fréquence de l'alimentation électrique fournie au stator et du nombre de paires de pôles dans le stator. La machine asynchrone a une vitesse de rotation légèrement inférieure à la vitesse du champ magnétique tournant créé dans le stator. Cette différence de vitesse est appelée glissement.

En résumé, la machine asynchrone fonctionne en utilisant l'induction électromagnétique pour créer un champ magnétique tournant qui entraîne la rotation du rotor. C'est un type de moteur électrique très couramment utilisé dans de nombreuses applications industrielles et domestiques en raison de sa fiabilité et de son faible coût.

I.4 Défaillances de la machine asynchrone

Malgré sa robustesse la machine asynchrone peut subir des dommages causés par l'utilisation excessive au cours de son fonctionnement ou des conditions dures ce qui provoque sa défaillance. Les principaux défauts de la machine asynchrone peuvent être classés par catégories dans deux types : mécaniques et électriques. Les sources des défauts de la machine peuvent être internes ou/et externes [2].

I.4.1 Origine des défauts

Les défauts d'une machine asynchrone peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories :

a) Défauts internes : Ils sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et rotor, circuit magnétique, cage rotorique, entrefer mécanique, ... etc.), (voir figure I.2.)

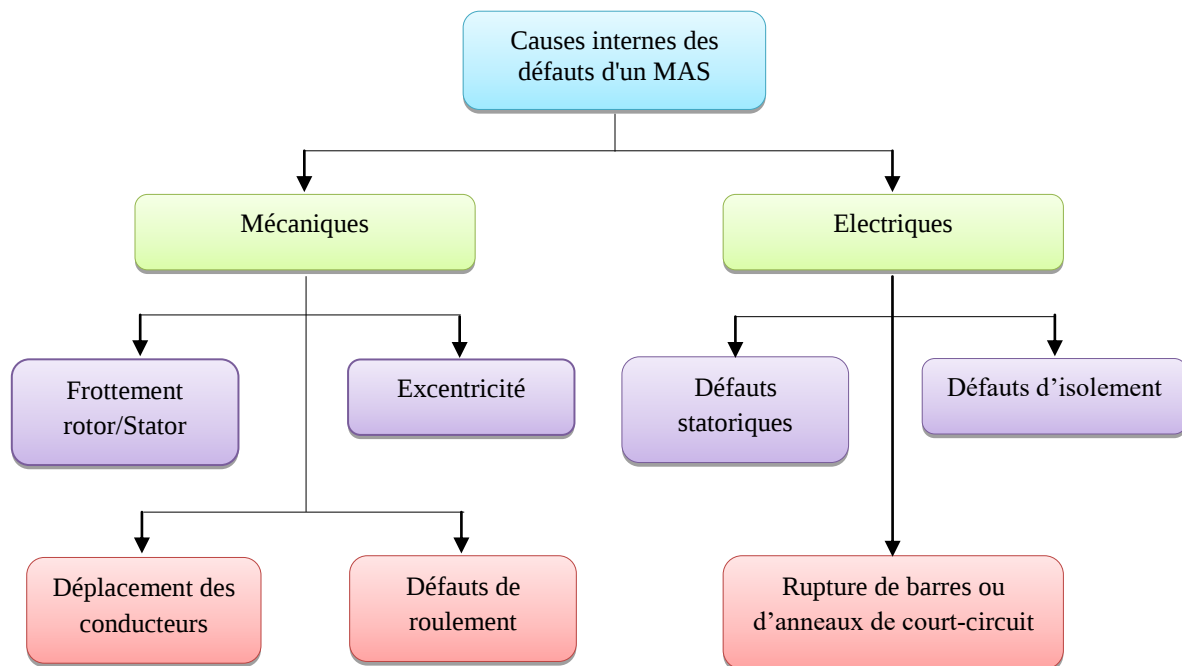


Figure I.2 Causes internes des défauts de la MAS à cage [3]

b) Défauts externes : Ils sont causés par le type d'alimentation, la charge mécanique, ainsi que par l'environnement d'utilisation de la machine (voir figure I.3).

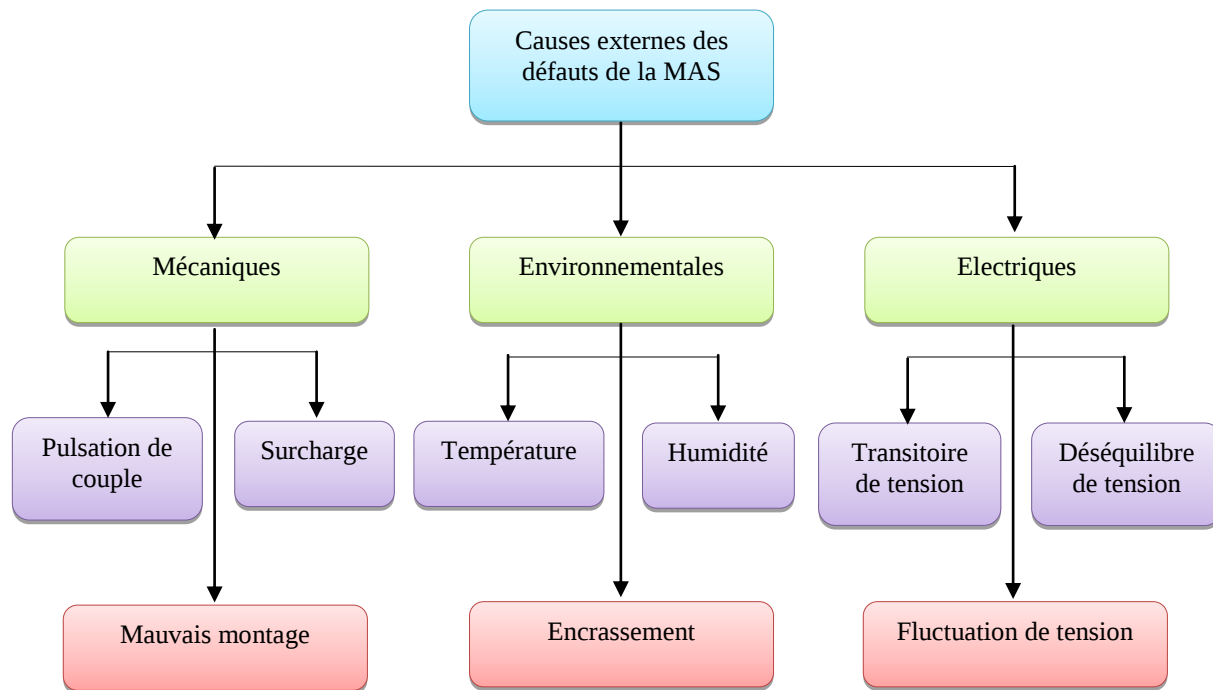


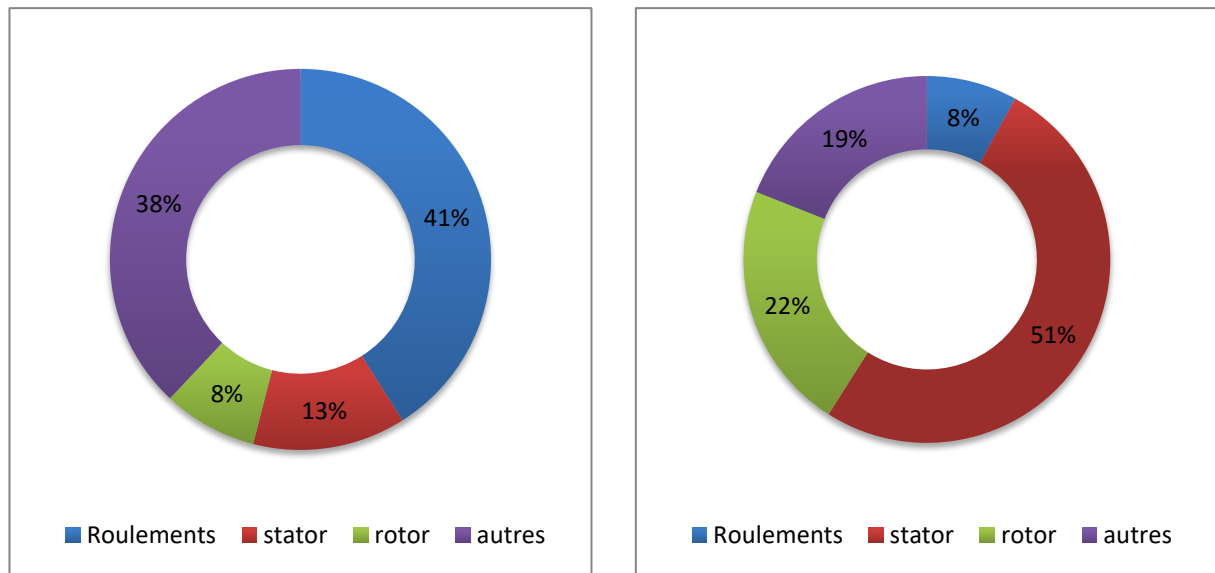
Figure I.3 Causes externes des défauts de la MAS à cage [3]

I.4.2 Défaillances de la machine

Un défaut dans un composant peut résulter d'une usure normale, d'une mauvaise conception, d'un mauvais montage, d'une mauvaise utilisation, ou d'une combinaison de ces différentes causes. Si un défaut n'est pas détecté suffisamment tôt, il peut entraîner la dégradation complète de la machine [3].

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

La figure I.4 montre le pourcentage des pannes qui apparaissent dans les machines asynchrones de forte puissance (voir figure I.4 (a)), et de faible et moyenne puissance (voir figure I.4 (b)).



a) Cas des moteurs de forte puissance

(b) Cas des moteurs de faible et moyenne puissance

Figure I.4 Anneau de proportions des défauts du moteur asynchrone [1],[3],[4]

I.4.2.1 Défauts au stator

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

- Court-circuit entre spires qui peut être provoqué par une surtension une température excessive une vibration ou humidité,
- Court-circuit entre phases qui peut être causé par les hautes températures, une alimentation déséquilibré où un défaut d'installation,
- Défaut d'isolation dû aux démarrages fréquents, décharge partielle, des températures et humidité extrêmes.
- Défaut entre le stator et carcasse causé par un cycle thermique une abrasion de l'isolant, une encrassement des spires par la carcasse, la présence des points anguleux dans les encoches, où un choc,
- Déplacement des conducteurs dû au démarrage fréquent, aux vibrations de têtes de bobines,
- Défaillance des connecteurs à cause d'une vibration excessive,

- Vibration de la carcasse due à une mauvaise installation où un déséquilibre magnétique, un déséquilibre d'alimentation, une surcharge, un mouvement des enroulements, où un contact avec le rotor.

Les défauts localisés au niveau du stator qui sont les plus récurrents, sont présentés dans ce qui suit voir figure (I.5) :

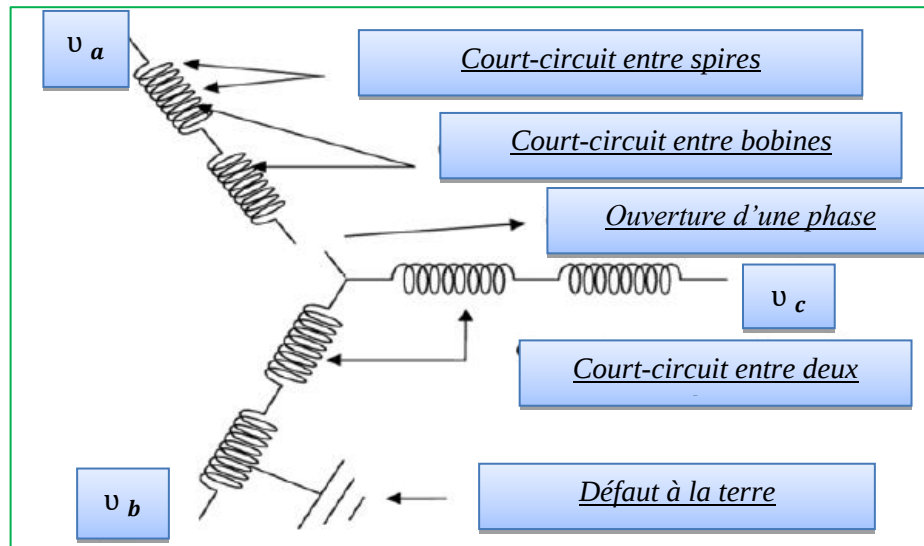


Figure I.5 Différents défauts statoriques [3]

a) Défauts d'isolation dans les enroulements : 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. Les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension et mécanique. De ce fait, si l'environnement de travail d'un matériau d'isolation dépasse une de ces limites, ce matériau se dégrade de manière prématurée ou accélérée, puis finit par ne plus assurer sa fonction.

Les différentes causes pour ce type de défaut sont [5]:

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

- Courant élevé dans l'enroulement dû à un court-circuit, un défaut du convertisseur, une surcharge. Ceci entraîne une élévation de la température dégradant prématurément le matériau d'isolation ;
- Vieillessement naturel des isolants qui ont une durée de vie limitée, en effet, même dans une utilisation 'normale', l'isolant finit naturellement par se dégrader.
- Fonctionnement dans un environnement sévère.

b) Court-circuit entre spires

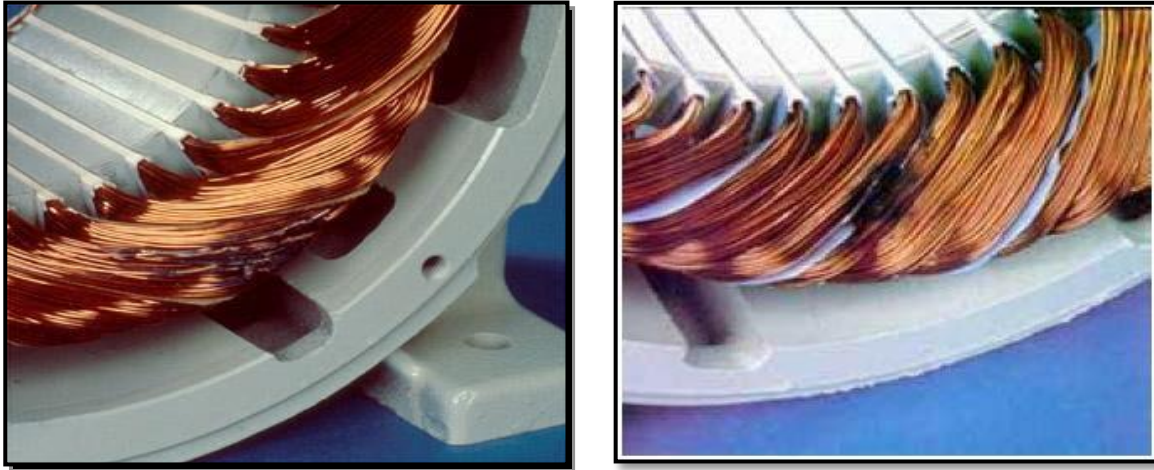
Un court-circuit entre spires de la même phase est un défaut assez fréquent, (voir figure I.6.(a)). Cette défaillance a pour origine un ou plusieurs défauts d'isolant dans l'enroulement concerné.

c) Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut arriver en tout point du bobinage (voir figure I.6.(b)), cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système.

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

Les courants statoriques sont totalement déséquilibrés et ce déséquilibre est proportionnel au défaut qui apparaît. Les courants dans les barres ainsi que dans les anneaux sont augmentés lors de l'apparition de ce défaut. La détection de ce type de défaut peut reposer sur le déséquilibre des courants de phases [6].



a) Court-circuit entre spires

b) Court-circuit entre phase

Figure I.6. Défauts de court-circuit [1]

d) Défauts de circuit magnétique

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

I.4.2.2 Défauts au rotor

Les mécanismes qui conduisent à ce type de défauts sont fortement liés à la fabrication du moteur ainsi qu'aux caractéristiques de fonctionnement pratiquement on trouve :

- Défaut de roulements dû à une mauvaise installation, un déséquilibre magnétique, une haute température, une perte de lubrifiant, une charge ou une déséquilibrée ou une corrosion ;
- Rupture de Barres qui peut être provoquée par un cycle thermique, un régime transitoire à longue durée ou un déséquilibre magnétique ;
- Rupture d'une portion d'anneau causée par un cycle thermique ;
- Excentricité qui peut être une conséquence d'une mauvaise installation, un déséquilibre magnétique ou des défauts des roulements ;
- Désalignement des roulements dû à un défaut de couplage, une mauvaise installation, ou une surcharge ;

- Défaut du circuit magnétique à la fabrication, ou dû à une surcharge ou à un cycle thermique;
- Déséquilibre mécanique causée par un mauvais alignement, un mouvement des anneaux de court-circuit.

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

a) Rupture de barres dans les machines

La rupture de barres d'une machine asynchrone est le défaut le plus couramment étudié aux laboratoires. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche voir figure ci-dessous, soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. Ce défaut entraîne des modifications dans les courants et conduit ainsi à l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal.

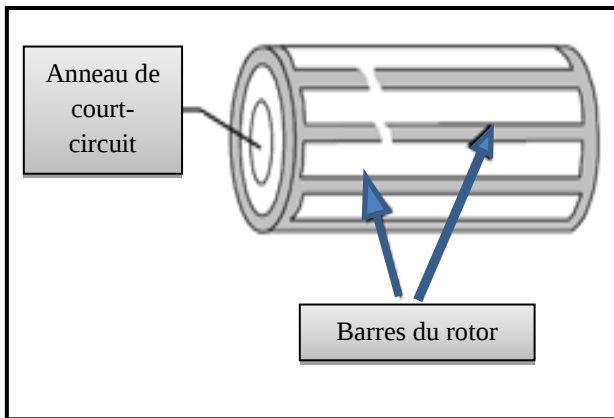


Figure I.7 Défaut de rupture des barres de rotor [3], [7]

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique, augmente l'amplitude des oscillations et provoque des oscillations de la vitesse de rotation ce qui engendre des vibrations mécaniques et un fonctionnement anormal de la machine.

Une grande amplitude de ces oscillations entraîne une détérioration plus rapide de la machine électrique. Des harmoniques de flux et des courants des enroulements statoriques apparaissant aux fréquences :

$$\text{Où:} \quad f_{bt} = f_s \cdot (1 \pm 2g) \quad (\text{I.1})$$

- f_{bt} est la fréquence des harmoniques du courant d'une phase statorique à cause d'une cassure de barre,
- f_s est la fréquence du courant fondamental,
- g est le glissement,

De plus, les amplitudes des raies apparaissant dans les bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défectueuses [8].

b) Rupture d'une portion d'anneau de court-circuit

La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres (voir figure I.8). Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, ce défaut est généralement groupé, voir confondu, avec la rupture de barres dans les études statistiques. Ces portions d'anneaux de court-circuit véhiculent des courants plus importants que ceux des barres rotoriques. De ce fait, un mauvais dimensionnement des anneaux, une détérioration des conditions de fonctionnement (température, humidité, ... etc.) ou une surcharge de couple et donc de courants, peuvent entraîner leur cassure. La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit déséquilibre la répartition des courants dans les barres rotoriques et de ce fait, engendre un effet de modulation d'amplitude sur les courants statoriques [8].

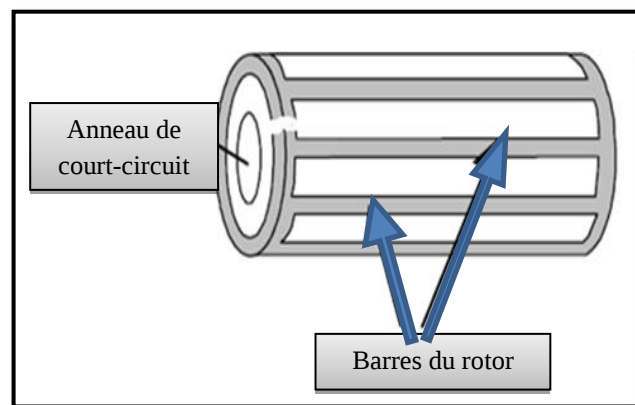


Figure I.8 Rupture d'anneau de court-circuit de la cage d'écureuil du rotor [7]

c) Défauts du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont le plus généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement des roulements à billes, ce qui induit une excentricité au niveau de l'arbre de la machine.

Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire ou une analyse harmonique des courants absorbés par la machine [6].

d) Défauts de l'arbre

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

Par exemple, l'humidité peut provoquer des microfissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité peut induire des efforts considérables sur l'arbre du moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Ce type de défaut peut être détectée par une analyse vibratoire ou une analyse par ultrason [3].

e) Excentricité

L'excentricité se réfère à la distance entre le centre géométrique du rotor et le centre géométrique du stator. Dans une machine asynchrone normalement fonctionnelle, ces deux centres devraient être parfaitement alignés. Cependant, lorsque l'excentricité est présente, il y a un décalage entre les deux centres, ce qui entraîne une variation dans l'espacement entre le rotor et le stator.

I.5 Défauts d'excentricité

Ce défaut modifie le comportement magnétique ainsi que mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité dans l'entrefer induit une augmentation des forces électromagnétiques qui agissent directement sur le noyau statorique ainsi que l'enroulement correspondant, ce qui engendre une dégradation de son isolation. D'autre part, cette augmentation peut avoir comme conséquence des frottements entre le stator et le rotor en raison des forces d'attraction magnétique qui déséquilibrent le système. Ceci donne naissance à des niveaux de vibration considérables dans les enroulements [6].

I.5.1 Types d'excentricité

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées :

- L'excentricité statique (voir figure I.9(a)) est 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 (voir figure I.9(b)) correspond 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 du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes [7].
- L'excentricité mixte (voir figure I.9 (c)) est la somme des deux cas présentés précédemment.

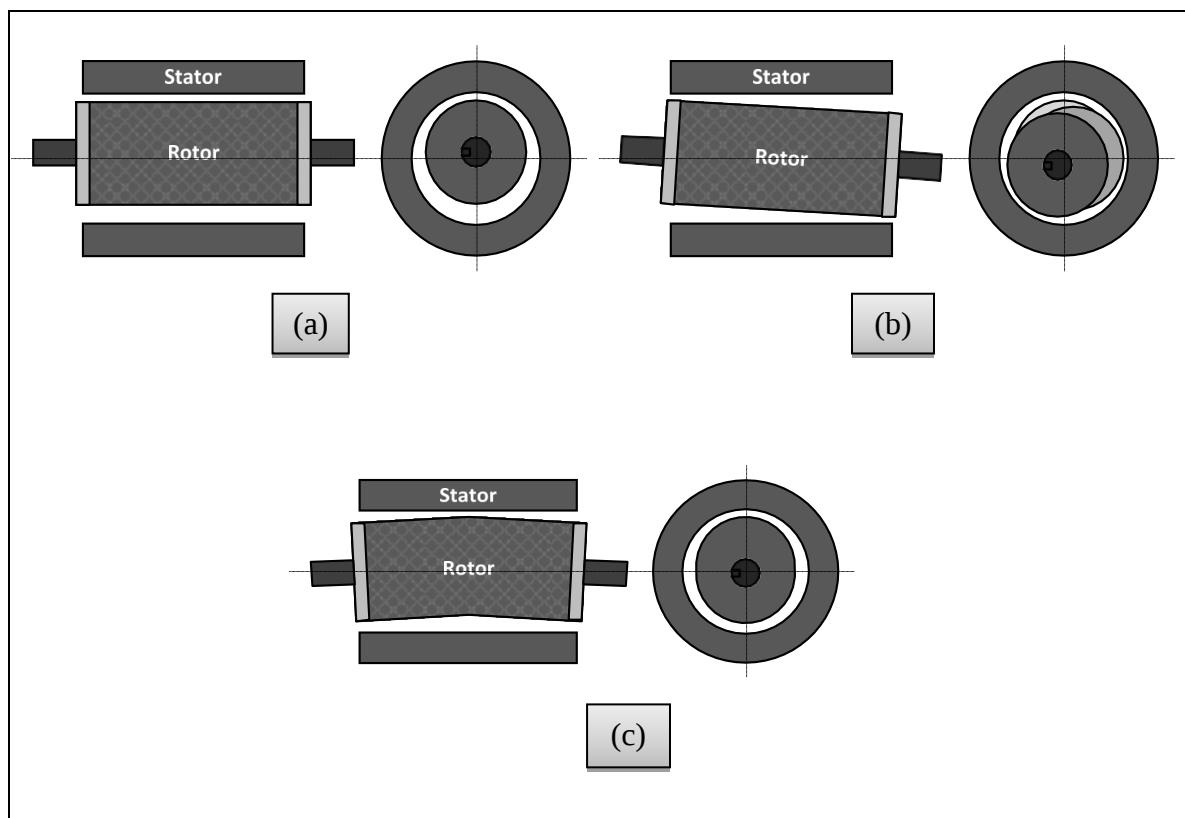


Figure I.9 Types d'excentricité : a) statique ; b) dynamique et c) mixte [7], [9]

I.5.2 Harmoniques dus à un défaut d'excentricité

L'excentricité de la machine asynchrone peut entraîner la présence d'harmoniques dans le courant de la machine. Les harmoniques sont des composantes de fréquence variable dans le courant ou tout autre grandeur électrique ou mécanique de la machine.

Lorsque la machine présente une excentricité, cela peut perturber le champ magnétique dans la machine, ce qui peut entraîner une distorsion du courant. La distorsion du courant peut créer des harmoniques dans le courant qui peuvent affecter les performances de la machine.

Les harmoniques peuvent entraîner des pertes de puissance, des fluctuations de la vitesse de rotation de la machine, des vibrations excessives et une surchauffe de la machine. De plus, les harmoniques peuvent causer des interférences électromagnétiques avec d'autres équipements électriques dans le réseau électrique.

La présence de l'excentricité se manifeste par la création d'harmoniques dans le spectre du courant statorique à des fréquences (f_d) données par l'expression suivante [9]:

$$f_d = f \left[\frac{(kn_b \pm n_d)}{p} (1 - g) \pm v \right] \quad (I.2)$$

Où :

- n_b est le nombre de barres rotoriques,
- n_d est l'ordre des harmoniques d'excentricité ($n_d = 0$ pour une excentricité statique et $n_d = 1, 2, 3 \dots$ pour l'excentricité dynamique),
- p est le nombre de paires de pôles,
- v est l'ordre des harmoniques d'espaces ($v = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots etc$)

De plus, la présence d'une excentricité mixte crée des harmoniques de basses fréquences données par la relation :

$$f_m = |f \pm kf_r| \quad (I.3)$$

Où

$$f_r = f(1 - g)/p \text{ et } k = 1, 2, 3 \dots$$

La détection des harmoniques peut être effectuée en utilisant des techniques d'analyse de spectre de fréquence du courant. Les techniques d'analyse peuvent aider à identifier les niveaux d'harmoniques présents dans le courant et les mesures correctives nécessaires pour résoudre le problème.

Pour réduire les effets des harmoniques dus à l'excentricité, des techniques de réglage de la machine peuvent être utilisées pour minimiser l'excentricité de la machine. Les filtres d'harmoniques peuvent également être utilisés pour réduire les niveaux d'harmoniques dans le courant de la machine. Une maintenance régulière de la machine peut également aider à prévenir l'excentricité et à minimiser les effets des harmoniques.

I.5.3 Différent harmoniques des défauts dans une machine asynchrone

Les défauts d'une machine asynchrone peuvent générer diverses harmoniques spécifiques dans le spectre de courant ou de couple. Voici quelques exemples communs d'harmoniques liés à certains défauts dans les machines asynchrones [11] :

Tableau I.1 Différents harmoniques du courant statorique et de couple

Types de Défaut	Courant	Couple
Harmonique d'encoches	$N_r f_r \pm f_s \pm 2 m \times g \times f_s$	/
Excentricité Statique	$f_{exc} = f_s \left[1 \pm \frac{n \times N_r (1 - g)}{p} \right]$	$f_{cu} = f_s \left[1 - \frac{(1 + g)}{p} \right] n$
Excentricité Dynamique	$f_{exc} = (N_r \times f_r + f_s) \pm f_r$	
Excentricité Mixte	$f_{exc} = f_s \left[1 \pm n \frac{1 - g}{p} \right]$	
Rupture de barres	$f = f_s (1 \pm 2g)$	$f_{sb} = f_s \left[\frac{N_r (1 - g)}{p} \pm n \right] \pm 2 g \times f_s$
Paliers	$f_{pal} = f_s \pm n \times f_{i,e}$	/
Désalignement	$f_s \pm k f_r$	/
Court circuit entre spires	$k f_s \pm n f_r$	/

Avec :

f_{sb} : Fréquence d'encoches au rotor ; $f_e = 0.4 \times n_b \times f_r$ fréquence externe (bagues)

N_r : Nombre d'encoches au rotor ; $f_i = 0.4 \times n_b \times f_r$ fréquence interne (bagues)

f_s : Fréquence d'alimentation; f_r : Fréquence de rotation du rotor

$n = 1, 2, 3, 4, \dots$; g : le glissement

p : Nombre de paires de pôles

Où k est un entier naturel impaire

I.6 Méthodes de diagnostic

La recherche de signatures ou indicateurs de défauts a pour but de caractériser le fonctionnement du système en identifiant le type et l'origine de chacun des défauts. Ceci permet d'assurer une bonne discrimination des pannes ou anomalies survenant aux différents niveaux du processus.

L'apparition d'un défaut au niveau de la machine modifie le fonctionnement de cette dernière, ce qui affecte ses performances. Etant donné la diversité de ces défauts et la complexité des relations de cause à effet, de nombreuses méthodes permettant de réaliser une démarche de diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées.

Ainsi lorsque les observations issues du système sont de type numérique, et que l'on dispose d'un modèle mathématique du système, l'approche par modèle mathématique (méthode interne) est privilégiée pour le diagnostic de systèmes dynamiques. En revanche lorsqu'on ne peut construire un modèle analytique du système ou si sa complexité le rend inexploitable, une alternative est l'approche sans modèle (aucune connaissance à priori)

On retrouve, dans les différents travaux, les trois axes constituant le domaine du diagnostic des machines électriques, qui conduisent à définir trois méthodologies de diagnostic : méthodes par suivi des grandeurs mesurables, méthode par estimation paramétrique et méthodes par traitement de signal (voir figure I.10).

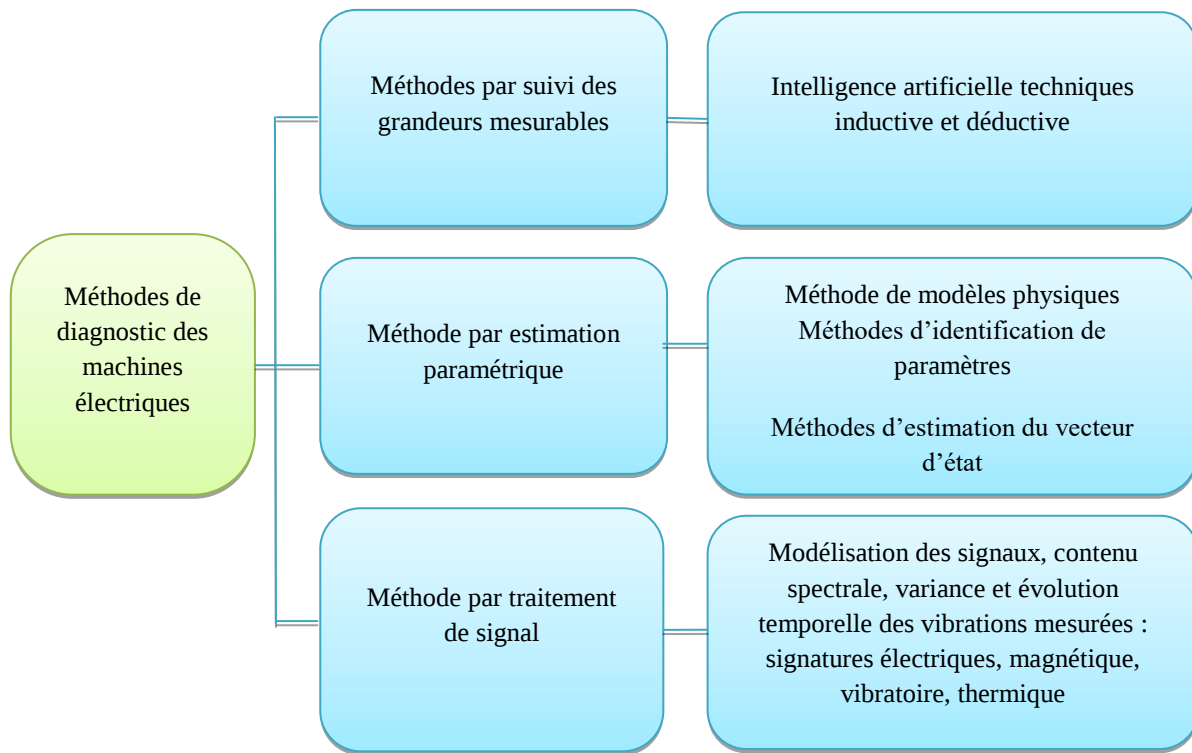


Figure I.11 Diaporama des méthodes de diagnostic des machines électriques [7]

I.6.1 Diagnostic des défauts par estimation paramétrique

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

Les premiers travaux relatant de l'estimation de paramètres ont débuté avec des modèles relativement simples (modèle de Park) utilisés depuis plusieurs années pour la commande des machines électriques. Ces modèles n'ont besoin que de quatre paramètres pour effectuer le diagnostic de défaut ce qui, dans certain cas, ne permet pas de localiser avec précision la défaillance [12].

I.6.2 Diagnostic par traitement de signal

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 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 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 (voire figure I.10). Les grandeurs choisies sont soit les grandeurs électriques (plus particulièrement les courants de ligne) soit les grandeurs mécaniques (vitesse, couple électromagnétique) [13].

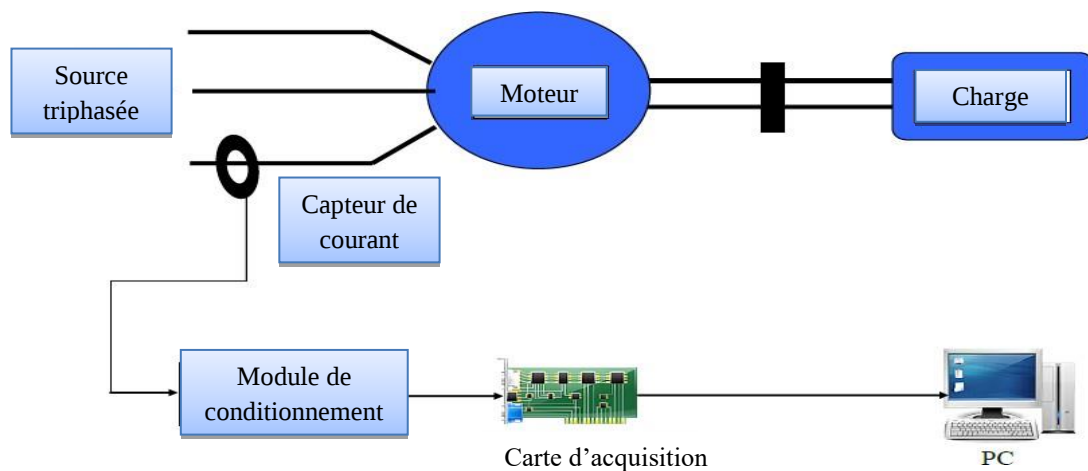


Figure I.12 Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique [9]

Cette technique permet une surveillance rapide et peu onéreuse car elle exige un simple capteur de courant ou de vibration. Cependant, elle nécessite une analyse manuelle par un expert en surveillance des machines électriques.

I.6.3 Diagnostic par le suivi des grandeurs mesurables

A ce jour, c'est l'analyse fréquentielle des grandeurs mesurables qui est le plus souvent utilisée pour le diagnostic de défauts rotoriques.

Les grandeurs accessibles et mesurables d'une machine asynchrone peuvent être :

- les courants absorbés,
- le flux de dispersion,
- la tension d'alimentation,

- la tension du neutre entre le neutre d'alimentation et le neutre de la machine,
- le couple électromagnétique,
- la vitesse rotorique,
- les vibrations.

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

I.7 Utilisation de la méthode des éléments finis pour le diagnostic des défauts

Les différentes approches de modélisation reposent sur la résolution des équations de l'électromagnétisme et de la mécanique, les différences proviennent des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire.

Les modèles décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone en présence de défauts peuvent être groupés en modèles physiques et en modèles comportementaux.

Dans ce travail, on s'intéresse aux modèles physiques qui se basent sur les lois de l'électromagnétisme pour décrire le fonctionnement de la machine.

Les méthodes les plus utilisées dans ce cadre de modélisation sont :

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

Afin d'avoir des modèles plus fins et plus réalistes, nous pouvons avoir recours à des techniques se basant sur la modélisation par éléments finis, dont l'objectif est de prévoir les effets des différents défauts sur la machine asynchrone.

Dans ce travail nous allons mener une étude sur une machine asynchrone à cage en utilisant le logiciel *ANSYS Maxwell & RMXpert*, basé sur la méthode des éléments finis.

I.8 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre certaines notions de base qui concernent le fonctionnement et la constitution du moteur asynchrone ainsi que les divers défauts qui peuvent affecter son bon fonctionnement à savoir (l'excentricité, le court-circuit, la rupture des barres...etc.).

Ensuite, nous avons présenté les différentes techniques de diagnostic, parmi lesquelles sur l'approche signal où nous avons constaté la nécessité d'avoir une méthode de traitement de signal fiable pour pouvoir surveiller les amplitudes des indices des défauts en temps réel, ce qui fera l'intérêt du présent travail.

Chapitre II

Présentation et Caractérisation de la Machine Asynchrone Etudiée

II.1. Introduction

Les moteurs à induction sont les moteurs les plus utilisés dans l'industrie. Depuis de nombreuses années, les méthodes de conceptions sont bien développées.

Les outils de modélisation informatique sont utilisés pour analyser les performances des moteurs avant leur production, Ils permettent de réaliser de multiples itérations de conception à faible coût, de créer de nouveaux designs et même donner la possibilité de comprendre les dégradations des performances des moteurs en raison de certains défauts.

Dans ce chapitre, Nous allons utiliser le logiciel *RMxpert* de *ANSYS*, pour étudier les performances d'une machine asynchrone à cage d'écureuil de 30 KW et de construire sa géométrie qui se prête bien à une étude par *ANSYS-Maxwell* à base de la méthode d'élément finis.

II.2. Présentation de la machine étudiée

La machine étudiée, a été déjà conçue et caractérisée auparavant [1],[2]. C'est une machine asynchrone à cage d'écureuil de 30 kW, parcourue par un courant de 31.21 A et alimentée par une tension de 690 V couplés en étoile, sa vitesse nominale est de 1470 tr/min avec un $\cos \varphi$ de 0.85

II.3. Présentation du logiciel *RMxpert*

RMxpert (*Rotating Machine Expert*) est un outil de conception des différentes machines électriques. Maintenant il est devenu un module du logiciel *ANSYS Maxwell* et permet de répondre à un cahier de charge bien déterminé. Son rôle principal c'est de faciliter le travail et de gagner le temps de simulation sous *Maxwell*.

Cette amélioration consiste à ajouter des modèles ou des exemples prédéfinis auparavant dans une bibliothèque regroupant des centaines d'exemples de machines électriques. Ceci permet à l'utilisateur du logiciel d'établir une géométrie similaire à son besoin ou bien des fois identique.

Ainsi l'utilisateur a juste pour rôle d'apporter quelques modifications des paramètres spécifiques à sa machine à étudier et de commencer la simulation [1] [3].

II.3.1. Spécifications et avantages de *RMxpert* et ses applications

Cet outil de conception et de caractérisation des machines électriques est caractérisé par :

- Calcul analytique rapide des performances des différentes machines électriques
- Prise de décisions de dimensionnement et optimisation de la conception

- Méthode de conception économique
- Base de données très riche en matière de sélection de matériaux
- Construction de modèles 2D et 3D du moteur conçu
- Vérification des performances de la machine avant la production réelle du moteur.

Voici les différents types de machines électriques qui peuvent être analysée et simulées sous *RMxpert* :

- Machine asynchrone triphasée
- Machine asynchrone monophasée
- Machine synchrone triphasée
- Machine synchrone triphasée à pôles lisses
- Machine synchrone à pôles saillants
- Moteur à CC à aimant permanent sans balais
- Machine synchrone à vitesse réglable
- Moteur à CC à aimants permanents
- Moteur à réluctance variable
- Moteur synchrone à aimants permanents
- Moteur universel
- Machine à courant continu
- Machines rotatives génériques, ...etc.

II.3.2. Nouvelle conception sous *RMxpert*

Voici les étapes à suivre pour créer une nouvelle conception de machine électrique sous *RMxpert* :

1. Une fois le logiciel *ANSYS- Maxwell* lancé (voir figure II.1), on clique sur '*Projet > Insérer une conception RMxpert*' ou sur l'icône '*RMxpert*' dans la barre d'outils pour créer une nouvelle conception de machine électrique. Ainsi, la fenêtre '*Sélectionner un type de machine*' apparaît. On choisit alors la machine '*Three phase Induction motor*', qui nous intéresse dans ce travail, (voir figure II.2).



Figure II.1 ANSYS-Maxwell 2019 R3

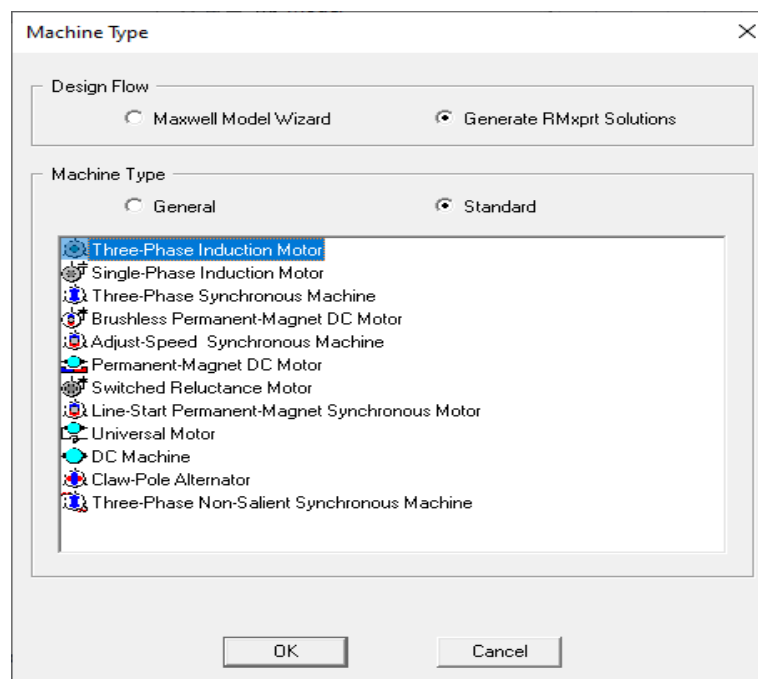


Figure II.2 Interface de sélection du type de machines dans RMXprt

2. Insérer les paramètres des différentes parties du projet 'machine' de 'RMxpert' et paramétrer l'analyse désirée (voir figure II.3) selon les rubriques suivantes :

1. Machine

- Stator
 - ✓ Enroulement
 - ✓ Encoche

- Rotor
 - ✓ Enroulement
 - ✓ Encoche
 - ✓ Arbre

2. Analyse

- Configuration

3. Optimétrie

4. Résultats

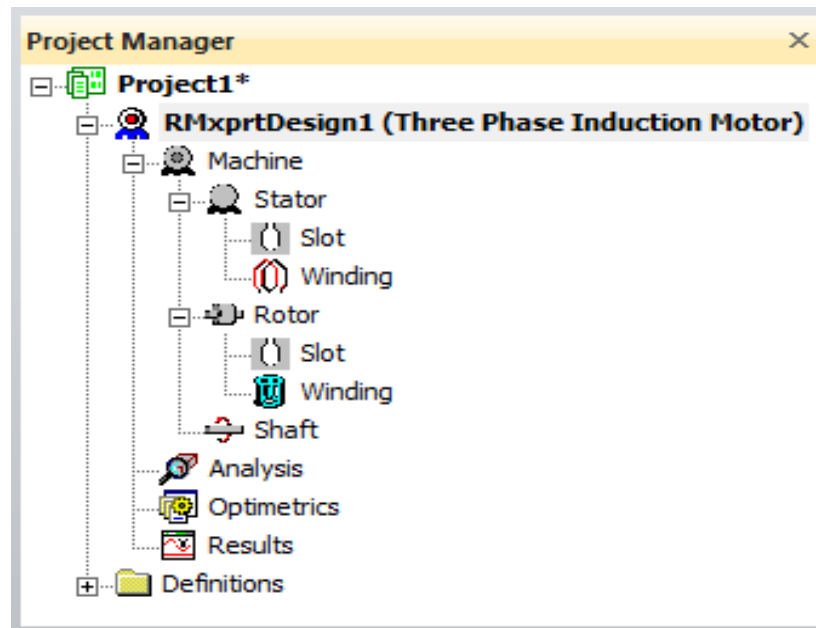


Figure II.3 Fenêtre d'un projet de *RMxpert*

Dans ce que suit, nous allons détailler cette étape de paramétrage de *RMxpert* tout en introduisant les paramètres de la machine étudiée.

II.3.3. Introduction des paramètres caractéristiques de la machine

Dans ce travail, nous avons choisi un moteur asynchrone à cage d'écureuil de 30kW. Ce moteur asynchrone est caractérisé par les grandeurs nominales présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 Paramètres nominaux de la machine étudiée

Paramètre	Valeur	Unité
Puissance	30000	W
Tension	690	V
Vitesse	1470	tr/min
Fréquence	50	Hz
Température de fonctionnement	75	°C

Ses paramètres sont introduits dans le projet *RMxpert* comme l'illustre la figure (II.4).

The image shows a software window titled "Solution Setup" with a close button (X) in the top right corner. It has three tabs: "General", "Three-Phase Induction Motor", and "Defaults". The "General" tab is active. Inside, there is a "Setup Name" field containing "Setup1" and an "Enabled" checkbox which is checked. Below this is a group box containing several parameters: "Operation Type" (dropdown menu set to "Motor"), "Load Type" (dropdown menu set to "Const Power"), "Rated Output Power" (text field "30000" and unit dropdown "W"), "Rated Voltage" (text field "690" and unit dropdown "V"), "Rated Speed" (text field "1470" and unit dropdown "rpm"), and "Operating Temperature" (text field "75" and unit dropdown "cel"). At the bottom of the group box is a "Use Defaults" button. Below the group box is a button labeled "HPC and Analysis Options...". At the very bottom of the window are "OK" and "Annuler" buttons.

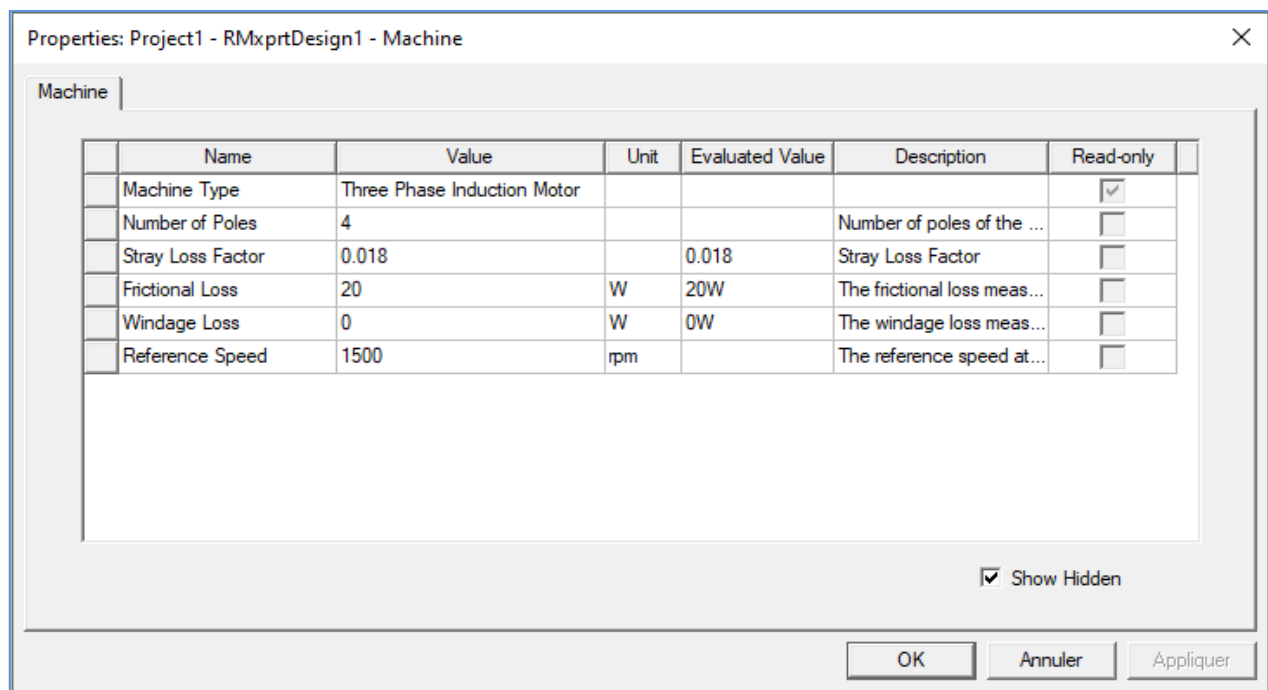
Figure II.4 Fenêtre des grandeurs nominales de la machine dans *RMxpert*

De plus, on doit spécifier les paramètres du moteur étudié qui sont récapitulés dans le tableau ci-après :

Tableau II.2 Paramètres du moteur étudié sous *RMxpert*

Nom		Valeur	Unité
Machine Type	Type de la machine électrique	Triphasée	-
Number of poles	Nombre de pôles	4	-
Stray loss factor	Coefficient des pertes supplémentaires	0.018	-
Frictional loss	Pertes par frottement visqueux	20	W
Windage loss	Pertes par ventilation	0	W
Reference Speed	Vitesse de référence	1500	tr/min

La figure suivante montre comment saisir ces différents paramètres du moteur étudié :

**Figure II.5** Fenêtre de saisie de quelques paramètres du moteur étudié sous *RMxpert*

II.3.4. Paramétrage du stator

Les propriétés générales du stator (telles que le diamètre extérieur et intérieur ainsi que la longueur, le nombre d'encoches, leur type et le facteur d'inclinaison, ...) sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.3 Paramètres statoriques du moteur étudié

	Nom	Valeur	Unité
Outer Diameter	Diamètre extérieur	324.58	mm
Inner Diameter	Diamètre intérieur	200.5	mm
Lenght	Longueur de stator	195.8	mm
Stacking Factor	Facteur d'empilement	0.97	-
Steel Type	Type d'acier	M41-29G	-
Number of Slots	Le nombre d'encoches du stator	48	-
Slot Type	Type d'encoches	2	-
Lamination Sectors	Nombre de tôles	0	-
Press Board Thicknes	Epaisseur des tôles	0	mm
Skew Width	Inclinaison des encoches	0	-

La figure suivante illustre la fenêtre de *RMxprt* qui permet de saisir ces paramètres du stator :

Properties: Project1 - RMxprtDesign1 - Machine

Stator

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Outer Diameter	324.58	mm	324.58mm	Outer diameter of the st...	☐
Inner Diameter	200.5	mm	200.5mm	Inner diameter of the st...	☐
Length	195.8	mm	195.8mm	Length of the stator core	☐
Stacking Factor	0.97			Stacking factor of the s...	☐
Steel Type	M43_29G			Steel type of the stator ...	☐
Number of Slots	48			Number of slots of the s...	☐
Slot Type	2			Slot type of the stator c...	☐
Lamination Se...	0			Number of lamination s...	☐
Press Board T...	0	mm		Magnetic press board t...	☐
Skew Width	0		0	Skew width measured i...	☐

☒ Show Hidden

OK Annuler Appliquer

Figure II.6 Fenêtre de saisie des paramètres du stator sous *RMxprt*

II.3.5. Paramétrage des encoches statoriques

Tout d'abord, la figure ci-après représente le type d'encoches du stator qu'on a choisi dans ce travail.

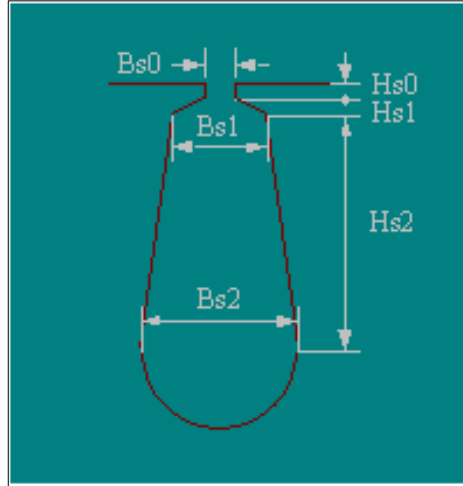


Figure II.7 Modèle choisi pour l'encoche de stator

Les paramètres des encoches statoriques sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau II.4 Paramètres des encoches du stator

Nom	Valeur	Unité
Hs0	1	Mm
Hs1	2.5	Mm
Hs2	21.92	Mm
Bs0	3	Mm
Bs1	6.16	Mm
Bs2	9.51	Mm

La figure suivante illustre la fenêtre de *RMxpert* qui permet de saisir ces paramètres des encoches statoriques :

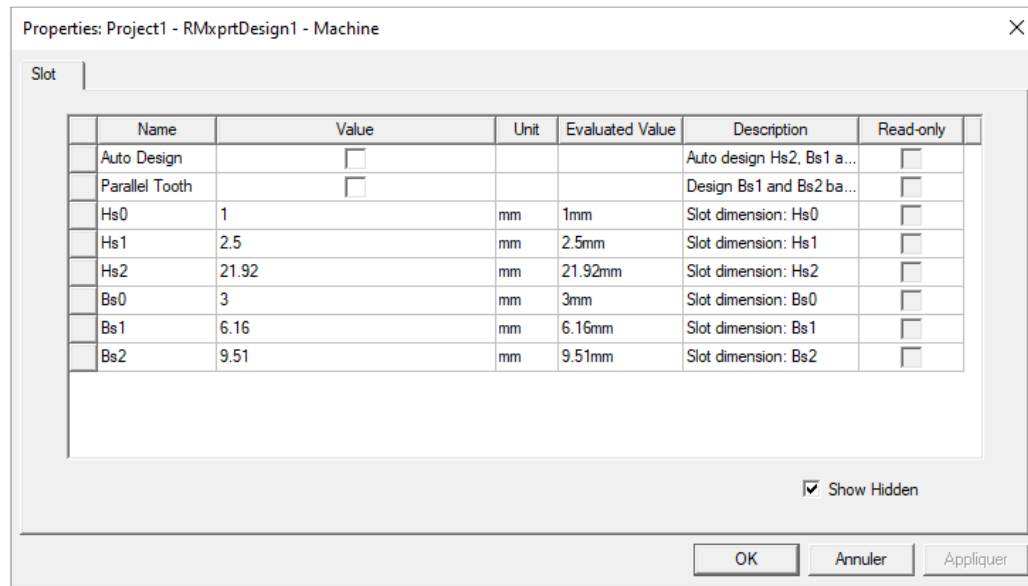


Figure II.8 Fenêtre des paramètres des encoches du stator sous *RMxpert*

II.3.6. Paramétrage de l'enroulement statorique

Le tableau ci-dessous résume les paramètres généraux de l'enroulement statorique de la machine asynchrone étudiée.

Tableau II.5 Paramètres de l'enroulement du stator

	Nom	Valeur	Unité
Winding Layers	Nombre de couches	2	-
Winding Type	Type d'enroulement	Whole-coiled	-
Parallel Branches	Nombre de branches parallèles	2	-
Conductors per slot	Nombre de conducteurs par encoche	28	-
Coil Pitch	Pas d'enroulement	10	-
Number of Strands	Nombre de brins	5	-
Wire Wrap	Epaisseur de l'isolant	0	mm
Wire Size	Diamètre du fil nu	0.93	mm

Ces propriétés sont introduites dans le projet de *RMxpert* à travers la fenêtre illustrée par la figure suivante :

Properties: Project1 - MAS de 30 kW - Machine

Winding | End/Insulation

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description	Read-only
Winding Layers	2			Number of winding layers	☐
Winding Type	Whole-Coiled			Stator winding type	☐
Parallel Branches	2			Number of parallel branches ...	☐
Conductors per Slot	28		28	Number of conductors per sl...	☐
Coil Pitch	10			Coil pitch measured in numbe...	☐
Number of Strands	5		5	Number of strands (number o...	☐
Wire Wrap	0	mm		Double-side wire wrap thickn...	☐
Wire Size	Diameter: 0.93mm			Wire size, 0 for auto-design	☐

☒ Show Hidden

OK Annuler Appliquer

Figure II.9 Fenêtre des paramètres d'enroulement statorique

De plus, la figure suivante montre le type d'enroulement choisi pour le stator.

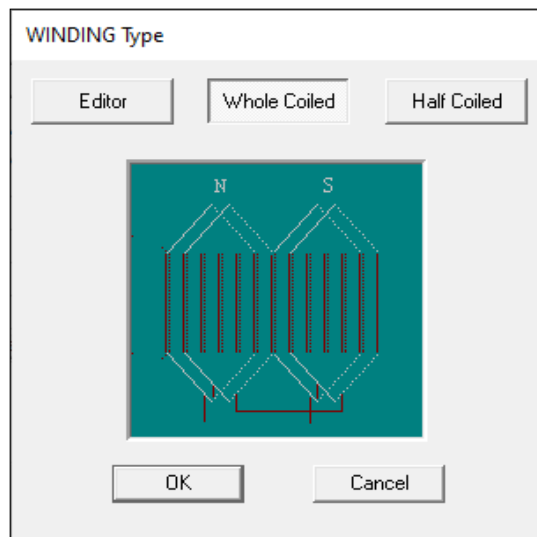


Figure II.10 Fenêtre de choix du type de l'enroulement statorique

II.3.7. Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche

Nous définissons principalement dans cette étape l'épaisseur de l'isolation de l'encoche et le coefficient de remplissage. Le reste des paramètres (épaisseur de la cale isolante et toutes les dimensions de la partie frontale de bobinage) peuvent être choisies nulles et le logiciel choisira des valeurs par défaut.

La figure suivante montre la façon de paramétrer la partie frontale du bobinage statorique et l'isolation de l'encoche.

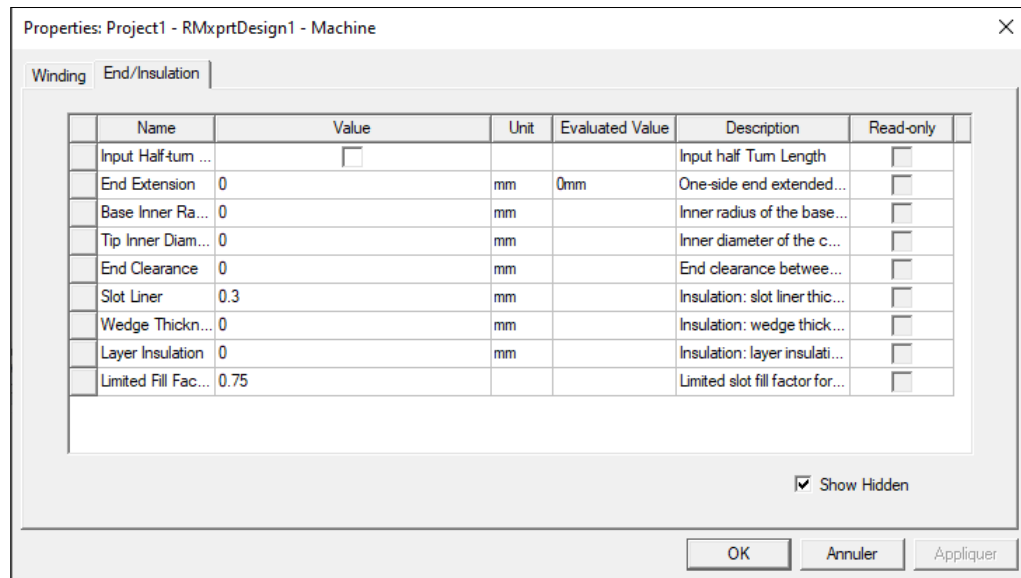


Figure II.11 Paramétrage de la partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche

A ce niveau, on aura bien défini la géométrie du stator du moteur étudié. Une section transversale est illustrée par la figure suivante :

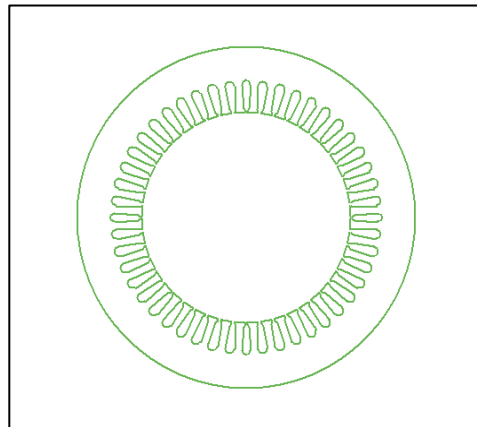


Figure II.12 Section transversale du stator du moteur étudié

II.3.8. Paramétrage du rotor

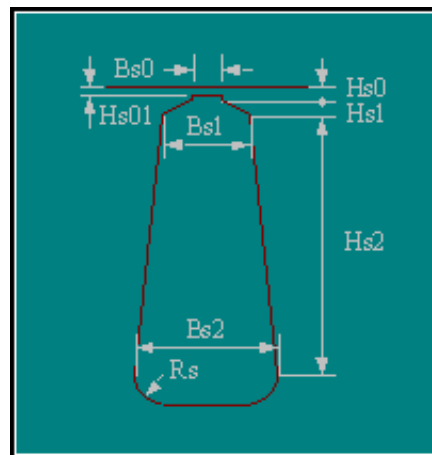
Les propriétés générales du rotor (tels que les diamètres extérieur et intérieur ainsi que la longueur, le nombre d'encoches, leur type et leur inclinaison) sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.6 Paramètres du rotor du moteur étudié

	Nom	Valeur	Unité
Stacking Factor	Facteur d'empilement	0.97	mm
Number of Slots	Nombre d'encoches	44	-
Slot Type	Type de l'encoche	3	-
Outer Diameter	Diamètre extérieur	198.7	mm
Inner Diameter	Diamètre intérieur	87.71	mm
Length	Longueur	195.8	mm
Steel Type	Type d'Acier	M43-29G	-
Skew Width	Inclinaison des encoches	1	-

II.3.9. Paramétrage des encoches rotoriques

RMxpert prend en charge plusieurs types de modèles d'encoches rotoriques. Nous avons choisi celle représentée dans la figure (II.13).

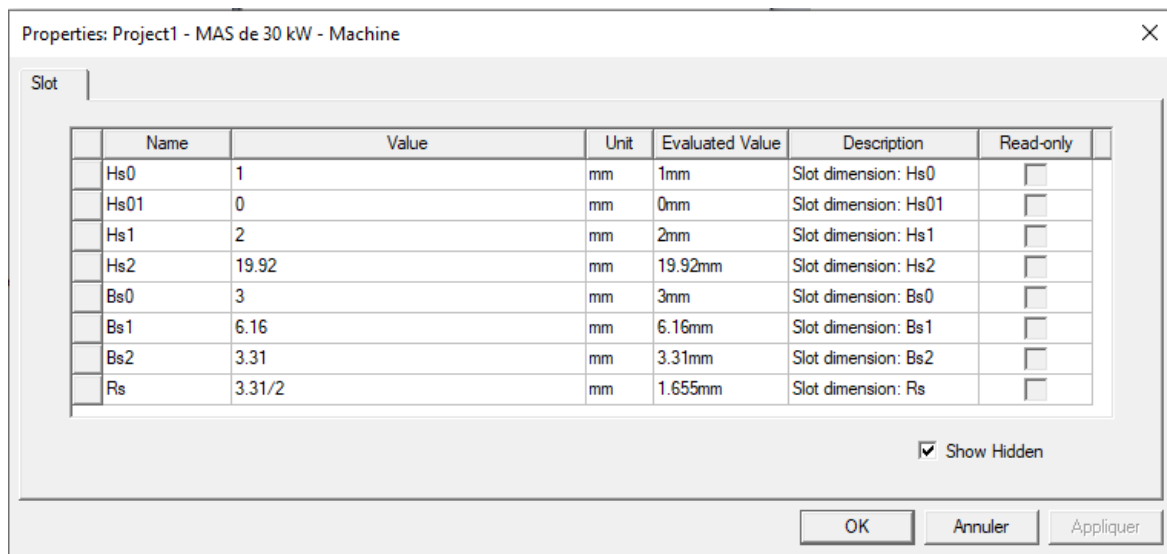
**Figure II.13** Type d'encoches choisi au rotor

Dans ce cas, les dimensions à saisir dans la fenêtre des propriétés des encoches rotoriques (qu'on peut accéder en double-cliquant sur l'icône '*Machine-Rotor-Slot*' de l'arborescence du projet) sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau II.7 Paramètres des encoches du rotor

Nom	valeur	Unité
Hs0	1	mm
Hs01	0	mm
Hs1	2	mm
Hs2	19.92	mm
Bs0	3	mm
Bs1	6.16	mm
Bs2	3.31	mm
Rs	3.31/2	mm

Ces paramètres sont introduits dans le projet de *RMxpert* à travers la fenêtre illustrée par la figure suivante :

**Figure II.14** Fenêtre de saisie des paramètres des encoches du rotor

II.3.10. Paramétrage de l'enroulement rotorique

On double-clique sur l'icône '*Machine- Rotor-Enroulement*' du projet *RMxpert* pour définir les propriétés du bobinage du rotor et ensuite on définit (voir figure II.15) :

- le type de matériau des barres conductrices de la cage,
- et les paramètres des anneaux de court-circuit.

Le tableau suivant résume les paramètres de l'enroulement rotorique.

Tableau II.8 Paramètres de la cage du rotor

	Nom	Valeur	Unité
Bar Conductor Type	Matériau des barres	tsyde-22tsyde-22BarCndutor	-
End Length	Longueur de l'extrémité de la barre	0	mm
End Ring Width	Largeur de l'extrémité de l'anneau	20	mm
End Ring Height	Hauteur de l'extrémité de l'anneau	18	mm
End Ring Conductor Type	Matériau de l'anneau	tsyde-22tsyde-22EndRingConductor	-

Ces paramètres sont aussi introduits dans le projet de *RMxpert* à travers la fenêtre illustrée par la figure suivante :

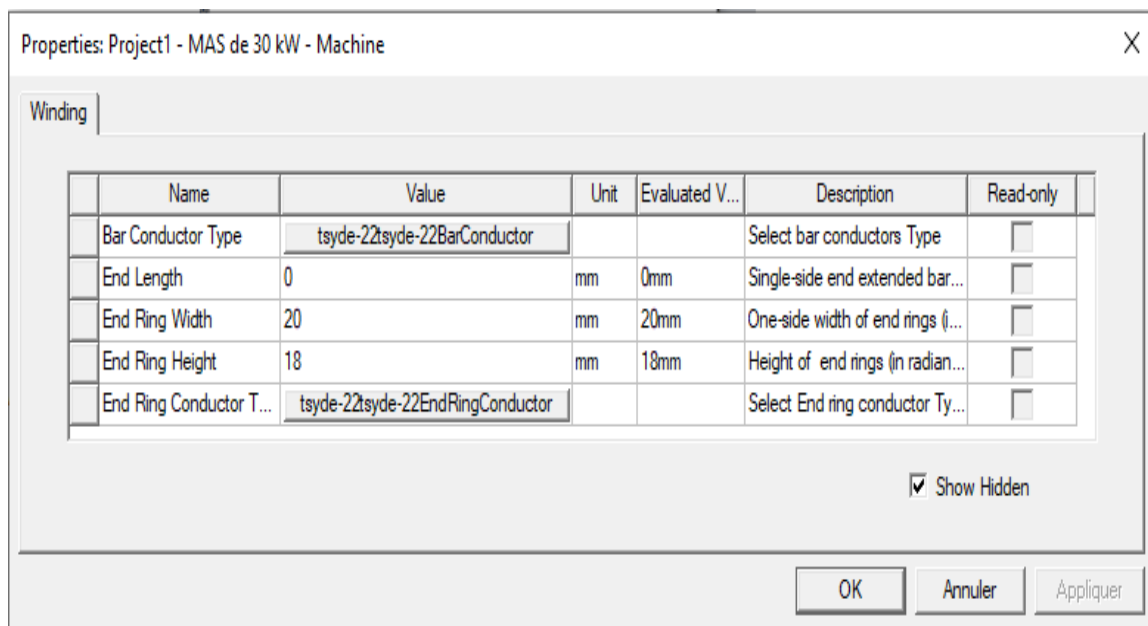


Figure II.15 Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor

Ainsi, on obtient la géométrie du rotor du moteur étudié illustrée par la figure suivante :

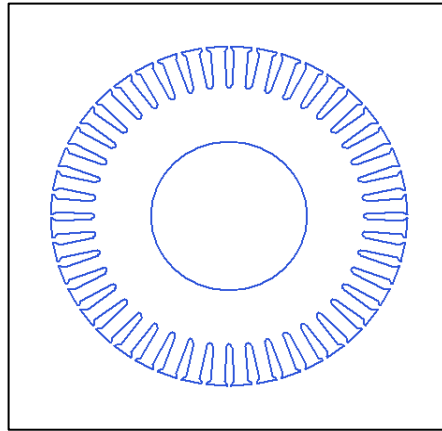


Figure II.16 Section transversale du rotor du moteur étudié

II.4. Résultats de simulation

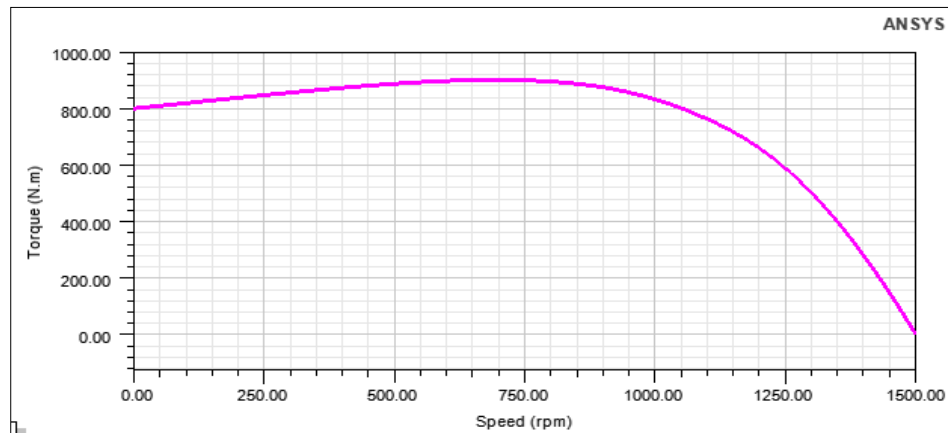
Après avoir introduit les paramètres du moteur étudié dans un projet de *RMxpert*, on peut analyser et caractériser ce moteur à l'aide de ce logiciel.

Le tableau suivant résume quelques caractéristiques du moteur étudié fonctionnement en régime nominal.

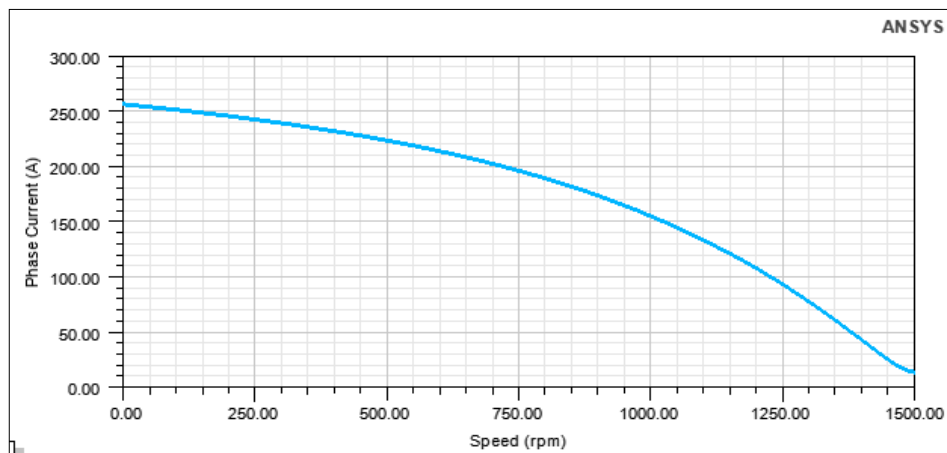
Tableau II.9 Quelques caractéristiques du moteur étudié calculées par *RMxpert*

Nom	Valeur	Unité
Vitesse de rotation	1432.1	tr/min
Courant de phase du stator	31.21	A
Résistance du stator	0.261	Ohm
Puissance utile	29998	W
$\cos \varphi$	0.85	-
Rendement	90.45	%
Couples utile	195	Nm
Pertes totales	3085	W

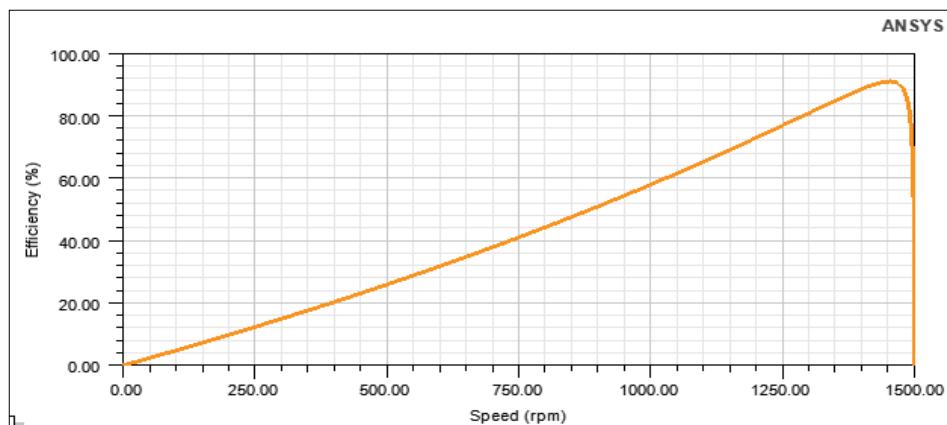
Par ailleurs, la rubrique ‘courbes’ de *RMxpert* permet de tracer un ensemble de caractéristiques statiques de la machine conçue tels que le couple électromagnétique, le courant de phase statorique et le rendement en fonction de la vitesse (voir figure II.17).



a) Allure du couple en fonction de la vitesse



b) Allure du courant de phase statorique en fonction de la vitesse



c) Allure du rendement en fonction de la vitesse

Figure II.17 Quelques caractéristiques statiques du moteur étudié

On note d'après ces figure que lorsque la vitesse augmente le couple augmente, passe par une valeur maximale qu'on appelle couple critique puis décroît en passant par le couple nominal jusqu'à une valeur nulle à la vitesse de synchronisme correspondant au fonctionnement à vide.

D'autre part, le courant statorique est 4.9 fois plus grand que le courant nominal de démarrage. En général, le courant est d'autant plus petit que la vitesse est plus grande.

Nous constatons aussi que le rendement maximal de cette machine asynchrone à cage est de 90.64 %, Il correspond au rendement nominal. Ce rendement diminue progressivement en déchargeant la machine.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation du logiciel *RMxpert* puis nous avons rappelé brièvement les étapes de caractérisation d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil de 30 kW en utilisant cet outil. Les résultats obtenus par *RMxpert* sont proches des résultats théoriques prédéfinies. Au chapitre suivant, nous allons utiliser un outil plus puissant basé sur le calcul en éléments finis pour caractériser cette machine.

Chapitre III

Simulation de la Machine Etudiée en Mode Sain par Maxwell-2D

III.1. Introduction

La modélisation par la méthode des éléments finis '*Finite Element Method*' est parmi toutes les méthodes de modélisation utilisées pour la détection des différents défauts dans la machine asynchrone. Elle offre un espace d'harmoniques plus proche de celui de la machine réelle. Ceci permet une application fiable de la technique d'analyse des différents signaux de la machine. Une grande partie de ce chapitre sera consacré à cette modélisation avec une présentation des étapes nécessaires pour construire un modèle des éléments finis de la machine asynchrone triphasée à cage sous *ANSYS-Maxwell-2D* [11].

Dans notre travail, la détection des défauts dans la machine sera effectuée à travers la technique d'analyse des signatures du courant statorique et de la vitesse de rotation. La technique d'analyse spectrale du courant statorique ou bien d'un autre signal dans la machine à diagnostiquer nécessite une connaissance précoce très forte et sure du contenu spectral de ces signaux à l'état sain. D'ailleurs cette technique compare le contenu spectral du signal choisi à l'état sain avec le contenu spectral du signal à l'état défaillant. C'est pourquoi nous allons nous intéresser en premier lieu dans ce chapitre à l'étude de la machine fonctionnant en mode sain.

III.2. Présentation de logiciel

ANSYS Maxwell est le logiciel de simulation des champs électromagnétiques leader de l'industrie pour la conception et l'analyse des moteurs électriques, actionneurs, capteurs, transformateurs et autres dispositifs électromagnétiques et électromécaniques. Avec Maxwell, on peut caractériser avec précision et étudier les régimes de le mouvement transitoire non linéaire des composants électromécaniques et leurs effets sur la conception du circuit d'entraînement et du système de commande.

Grâce aux solveurs des champs électromagnétiques avancés de Maxwell reliés aux outils de simulation de circuits intégrés et de systèmes, on peut évaluer comprendre les performances des systèmes électromécaniques bien avant de fabriquer le prototype physique.

Ce laboratoire électromagnétique virtuel nous donne un avantage concurrentiel important commercialisation plus rapide, réduction des coûts et amélioration des performances du système à concevoir [14].

III.3. Présentation des résultats de simulations du moteur à étudié avec *Maxwell 2D*

Tout d'abord, nous avons créé un modèle du moteur étudié sous *Maxwell 2D* à partir du projet *RMxpert* pour l'étude et l'évaluation des performances de ce moteur fonctionnement en mode sain. Pour ce faire, il suffit de cliquer sur : *RMxpert* \ *Analogsis setup* \ *Create Maxwell design*.

La figure (III.1) présente la géométrie réduite et importée sous *Maxwell-2D* du moteur étudié :

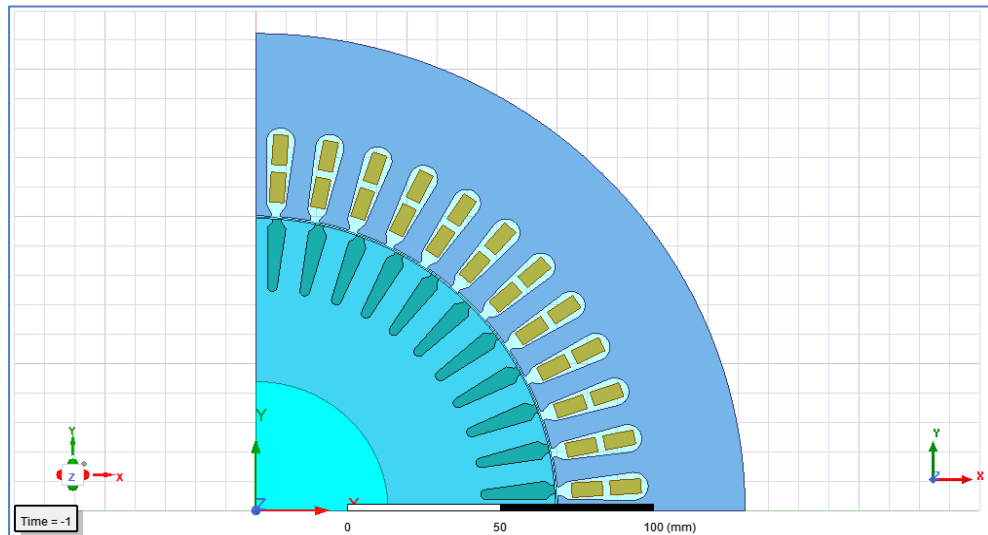


Figure III.1 Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée

Par ailleurs, *Maxwell-2D* permet le maillage de la géométrie réduite du moteur étudié (voir figure III.2).

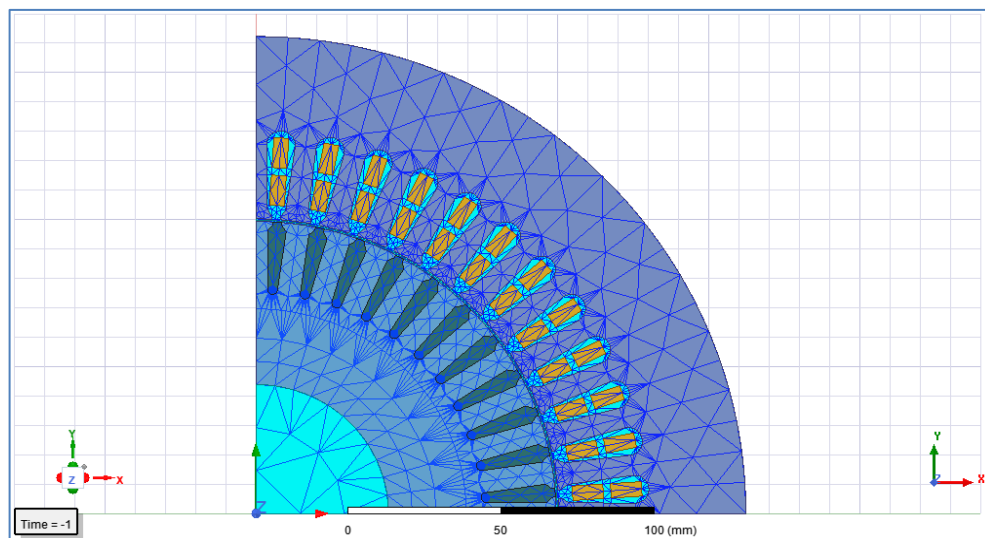


Figure III.2 Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur étudiée

L'utilisation du modèle en éléments finis du moteur étudié a pour objectif de dresser un diagnostic des défauts de cassure de barres rotoriques. Ceci exige un maillage du domaine de calcul assez fin de l'entrefer.

III.3.1. Démarrage à vide du moteur étudié avec *Maxwell-2D*

Nous avons utilisé *Maxwell 2D* pour simuler un régime transitoire concernant un démarrage à vide de la machine étudiée fonctionnant en mode sain. Les paramètres mécaniques de ce moteur sous *Maxwell-2D* sont estimés par le logiciel (voir tableau III.1).

Tableau III.1 Paramètres mécaniques du moteur sous *Maxwell-2D* concernant un démarrage à vide

Nom	Valeur	Unité
Vitesse initiale	0	tr/min
Moment d'inertie	0.233721	kg.m ²
Coefficient des frottements	0.0409407	N.m.s/rd
Couple de charge	0	N.m

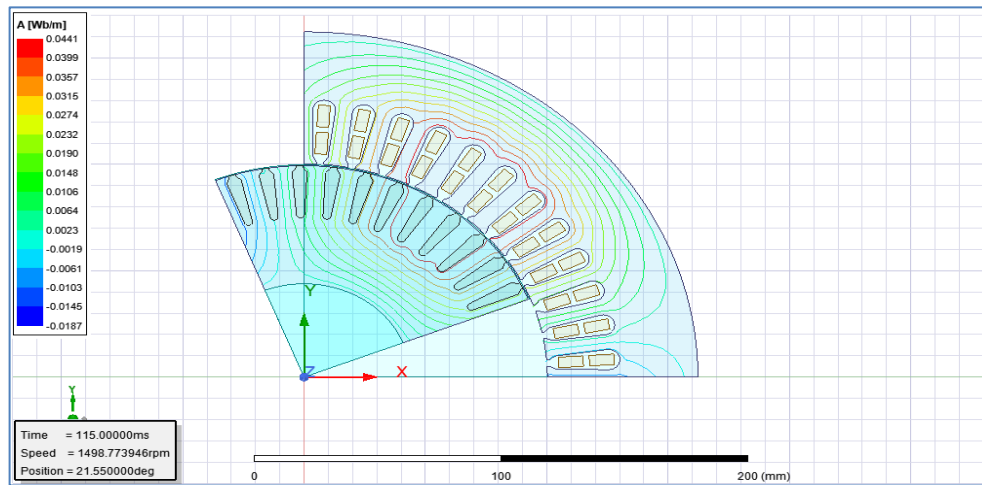
Après lancement de l'analyse, nous aurons la possibilité de visualiser la carte de distribution du champ ou de l'induction magnétique sur la géométrie analysée avec une échelle des équivalues en termes de couleurs.

Pour une vitesse de 1498.68 tr/min, c'est-à-dire pour un glissement faible et quand la machine passe au régime permanent, les lignes de flux pénètrent facilement jusqu'à l'intérieur du rotor (voir figure(III.3)).

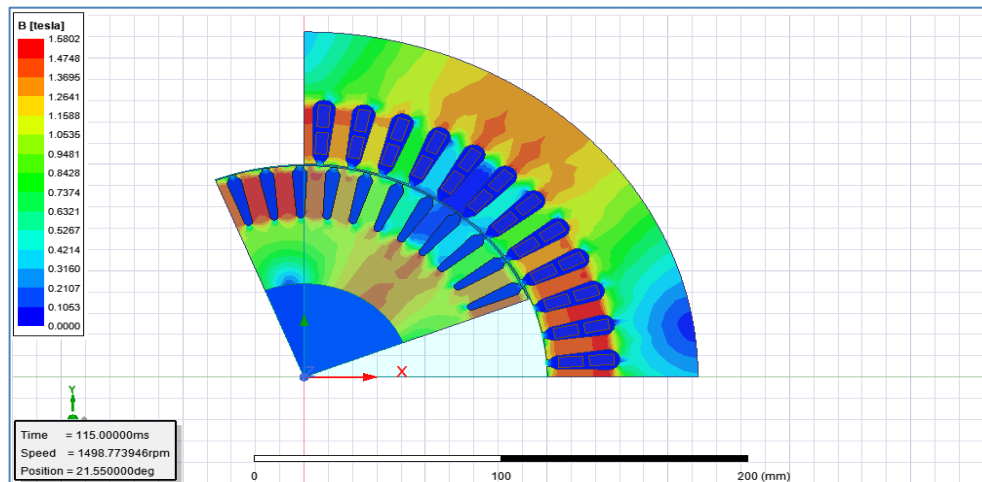
On remarque aussi qu'il n'y a pas de lignes de flux au niveau des encoches statoriques, des barres rotoriques et de l'arbre.

On constate de la figure III.3 (a) que les lignes de flux cernent essentiellement les pôles de la machine et elles passent par l'entrefer pour arriver jusqu'au rotor. La majorité de ces lignes passent par le fer et non pas par les encoches car le fer présente une perméabilité très élevée contrairement à celle des encoches.

Notons également d'après la figure III.3 (b) que l'induction magnétique est concentrée au niveau de la culasse et des dents statoriques et rotoriques. Ceci est dû également à la perméabilité qui est grande dans les régions citées. Cette induction magnétique est moins grande voire nulle dans les encoches statoriques, les barres rotorique et dans l'arbre à cause de leur faible perméabilité (milieux non magnétiques).



a) Lignes de flux

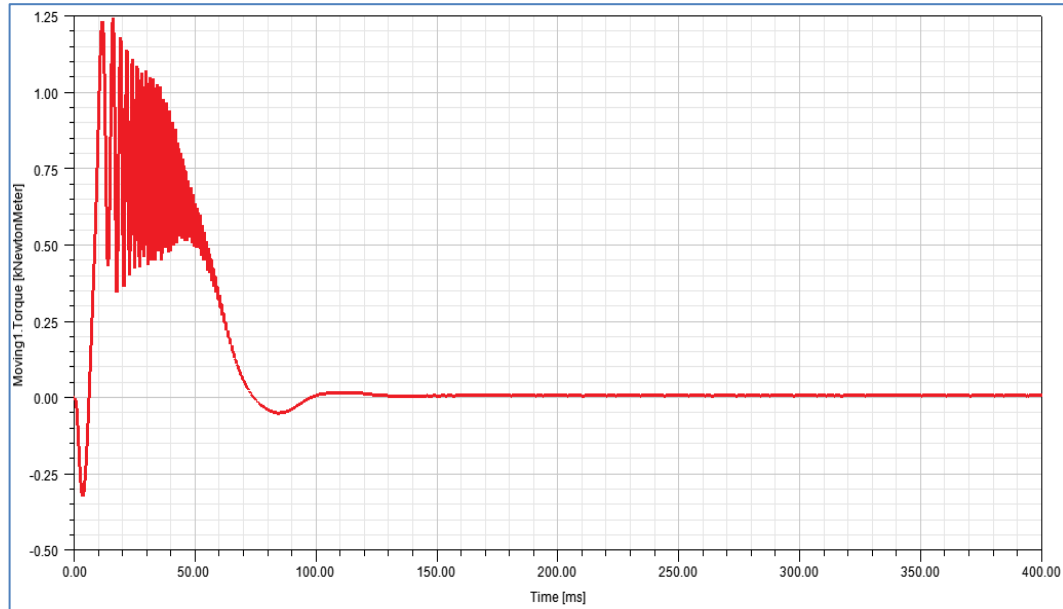


b) Induction magnétique

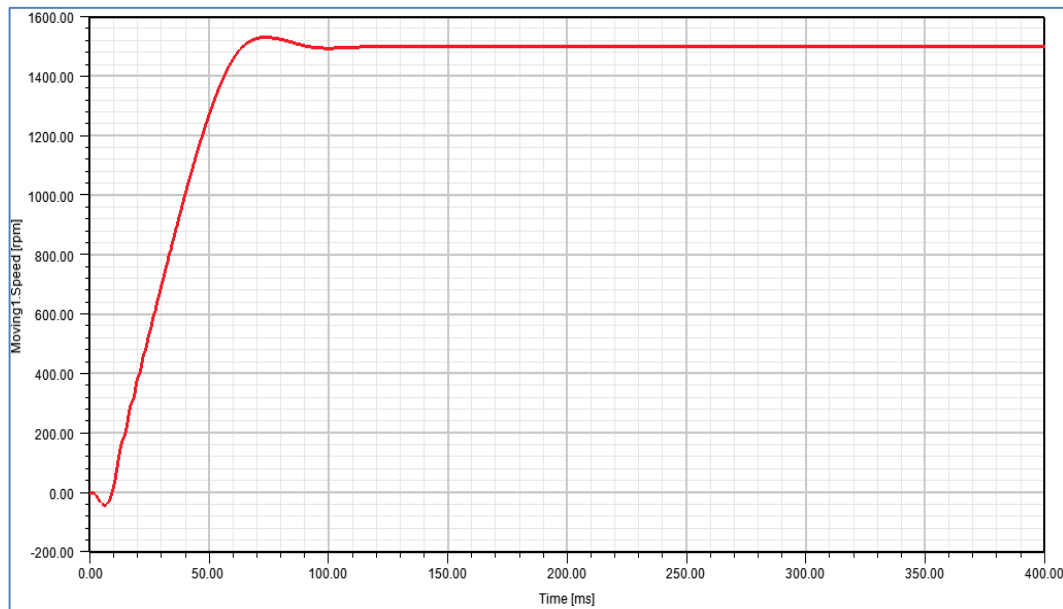
Figure III.3 Répartition des champs magnétiques dans une section 2D du moteur étudié à vide

En outre, l'induction magnétique est plus concentrée au niveau des sections réduites par exemple au niveau des dents statoriques et rotoriques et elle est moins concentrée dans les grandes surfaces telle que la culasse.

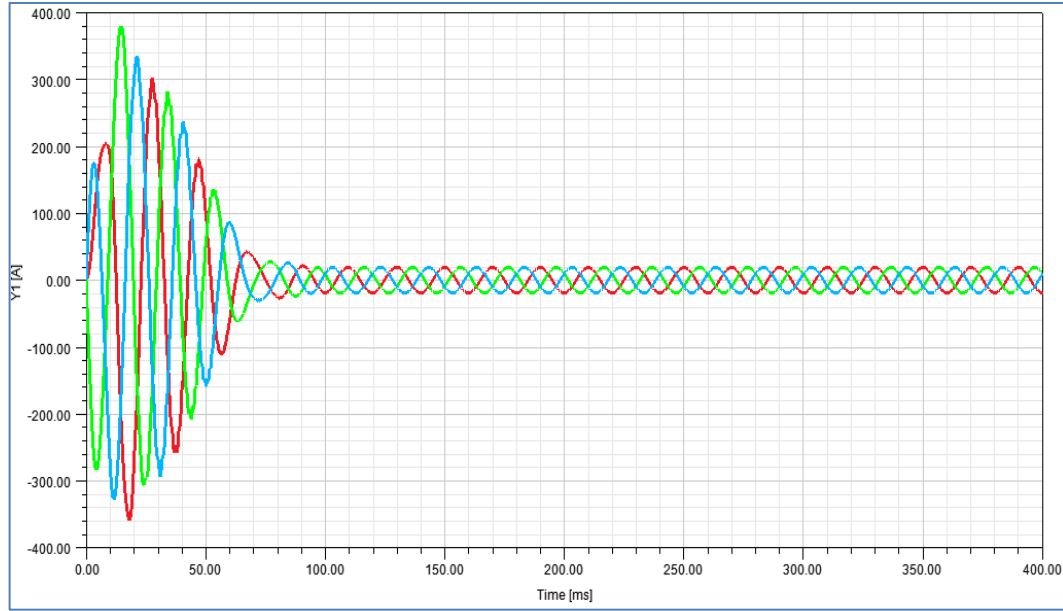
Par ailleurs, la figure (III.4) représente quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage à vide.



a) Couple électromagnétique



b) Vitesse de rotation



c) Courants de phases statoriques

Figure III.4 Quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage à vide

D'après la figure (III.4.a), on note que l'évolution du couple électromagnétique présente de très grands pics et des oscillations en régime transitoire. En régime établi, celui-ci est égale à une valeur au couple résistant qui est dû aux frottements.

D'autre part, la figure (III.4.b) illustre l'évolution de la vitesse en fonction du temps. Celle-ci passe par un régime transitoire de 110 ms environ, puis atteint une valeur très proche du synchronisme ($N=1498.68 \text{ tr/min}$) ce qui correspond à un glissement très faible de :

$$\frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1498.68}{1500} = 0.0008$$

Par ailleurs, la figure (III.4.c) représente l'évolution des courants de phases statoriques en fonction du temps au démarrage à vide du moteur étudié. Aux premiers instants, on enregistre de forts courants pour les trois phases. Ceci est dû au couple de démarrage de la machine où cette dernière fait appel à des courants supplémentaires (courants d'appel), c'est le régime transitoire.

Au-delà de ce régime transitoire, les courants diminuent jusqu'à ce qu'ils se stabilisent à des valeurs (13.6 A) proches des résultats trouvés par *RMxpert* (14.1 A).

III.3.2. Démarrage en charge du moteur étudié avec Maxwell 2D

Le tableau ci-après résume les données du paramétrage d'un démarrage en charge sous Maxwell-2D du moteur étudié

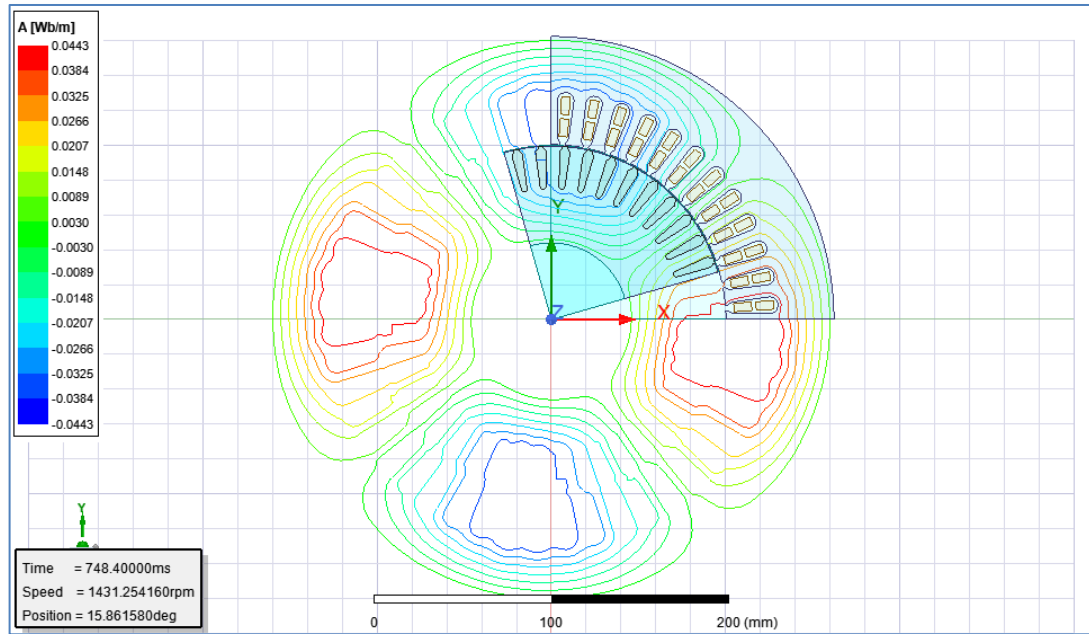
Tableau III.2 Paramètres mécaniques du moteur étudié sous Maxwell-2D pour un démarrage en charge

Nom	Valeur	Unité
Vitesse initiale	0	tr/min
Moment d'inertie	0.233721	kg. m ²
Coefficient des frottements	0.0409407	N.m.s/rd
Couple de charge	194	N.m

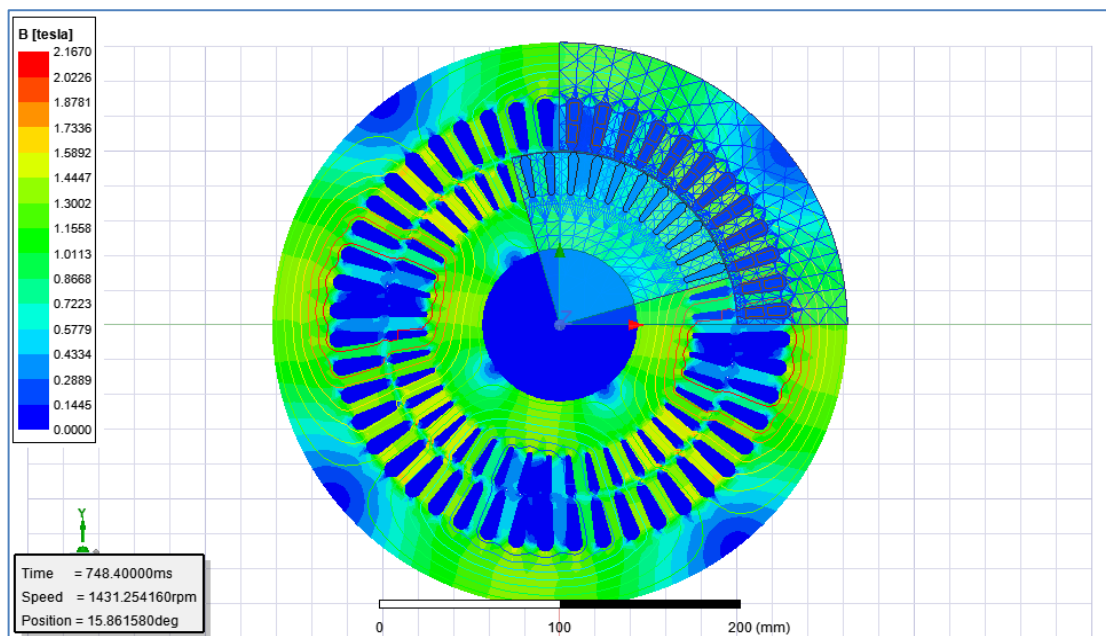
Après insertion de ces paramètres concernant le démarrage de la machine en charge, nous avons lancé la simulation du modèle 2D et nous avons obtenu les résultats que nous allons présenter et discuter dans ce qui suit.

La figure (III.5) représente les lignes de flux et induction magnétique en charge. On constate d'après la figure III.5 (a) que les lignes de flux cernent essentiellement les pôles de la machine et elles passent par l'entrefer pour arriver jusqu'au stator. La majorité de ces lignes passent par le fer et non pas par les encoches car le fer présente une perméabilité très élevée contrairement à celle des encoches. On remarque aussi qu'il n'y a pas de lignes de flux au niveau des encoches statoriques et des barres rotoriques et que la densité de flux est légèrement inférieure à celle du fonctionnement à vide.

De plus, on constate d'après la figure III.5 (b) que les lignes de l'induction magnétique sont plus concentrées au niveau de la culasse et des dents statoriques et rotoriques. Ceci est dû à la perméabilité qui est grande dans les régions citées. Cette induction magnétique est moins grande voire nulle dans les encoches statoriques, dans les barres rotoriques et dans l'arbre à cause de leur faible perméabilité, et que l'induction magnétique est plus grande en charge que celle à vide. En outre, l'induction magnétique est plus élevée au niveau des sections réduites telles que les dents statoriques et rotoriques et elle est moins élevée dans les grandes surfaces telles que les culasses.



a) Lignes de flux



b) Induction magnétique

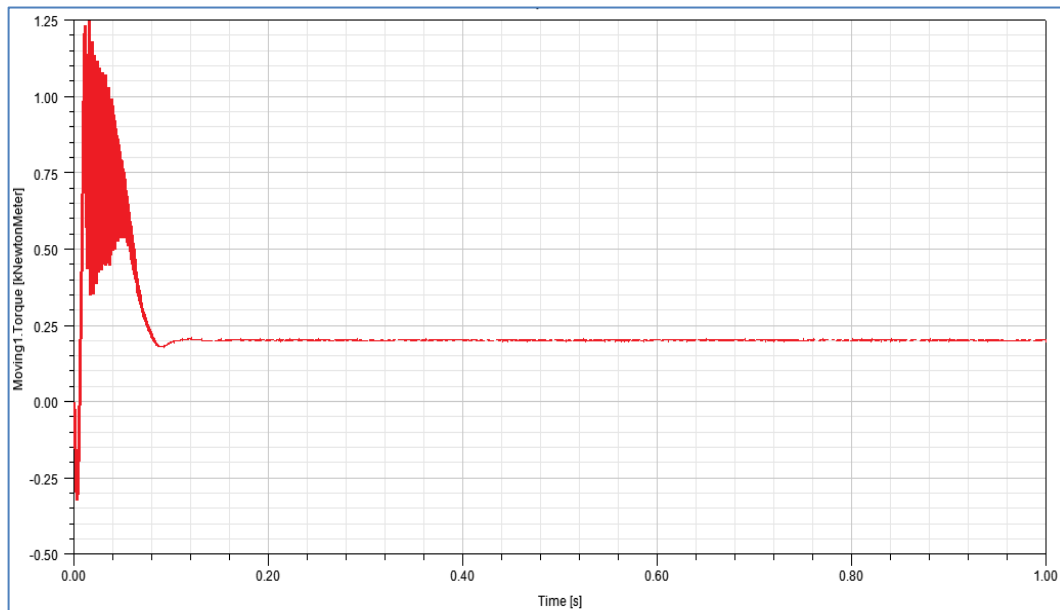
Figure III.5 Répartition des champs dans une section 2D du moteur étudié en charge sous maxwell 2D

Par ailleurs, la figure (III.6) représente quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage en charge.

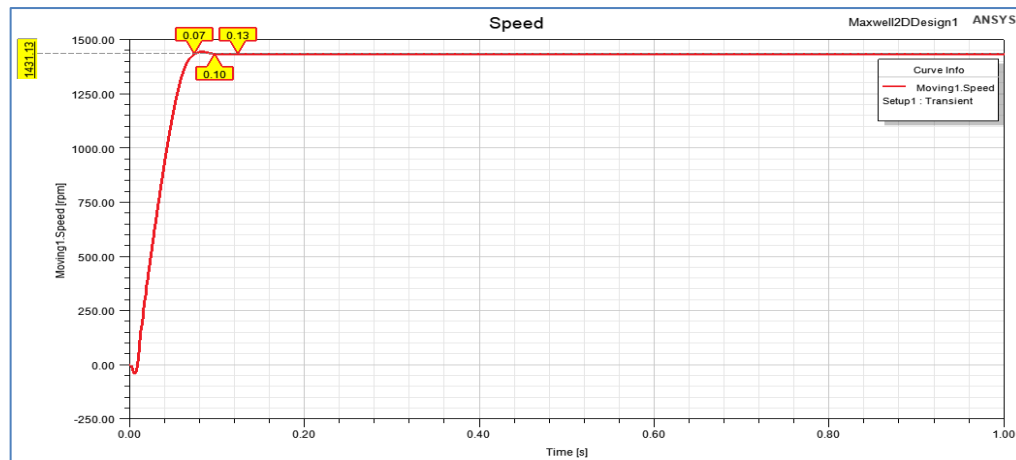
On constate de la figure (III.6.a) que l'évolution du couple électromagnétique en fonction du temps au démarrage en charge, marque un régime transitoire oscillatoire de $t=100$ ms environ et un pic très grand de 1.25 kN. Ceci est dû au couple de démarrage du moteur où ce dernier doit vaincre le couple résistant dû aux frottements et à la charge et celui dû à l'inertie. Au-delà de ce régime, le moteur atteint son régime permanent où le couple se stabilise et se rapproche du couple de charge aux pertes ce qui marque l'équilibre entre le couple de charge et le couple moteur.

On constate aussi d'après la figure (III.6.b) que la vitesse passe par un régime transitoire de 110 ms environ. Ensuite, elle atteint pratiquement sa valeur nominale enregistrée en simulant avec *RMxpert* en régime permanent. Par exemple, pour $t=130$ ms on a une vitesse $N=1431.13$ tr/min.

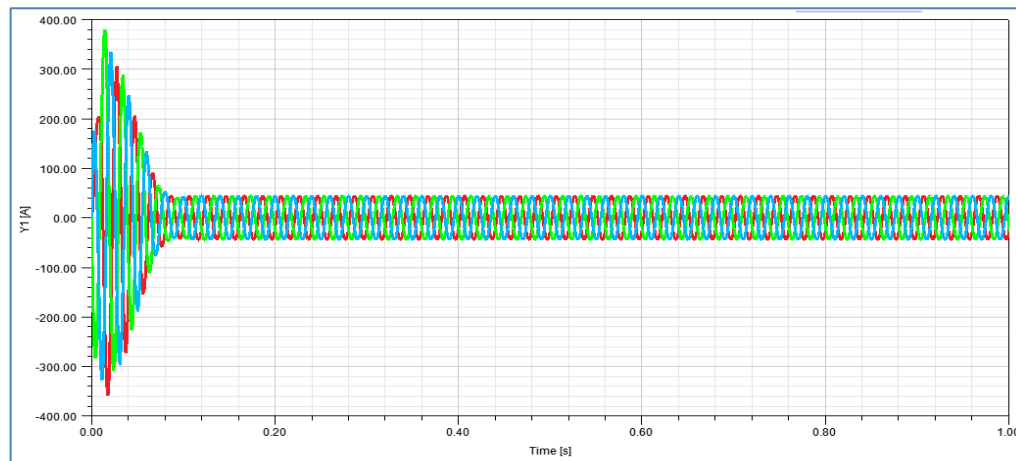
D'après cette figure (III.6.c), qui représente l'évolution des courants statoriques en fonction du temps au démarrage en charge, on note qu'aux premiers instants de démarrage, on enregistre des forts courants pour les trois phases. Ceci est dû au couple de démarrage de la machine où cette dernière fait appel à des courants supplémentaires (courants d'appel) pendant le régime transitoire. Après, les courants diminuent jusqu'à ce qu'ils se stabilisent à des valeurs efficaces proches du courant nominal du moteur ($I_n = 31.26$ A) et c'est ce qui confirme les résultats trouvés par *RMxpert* en régime permanent.



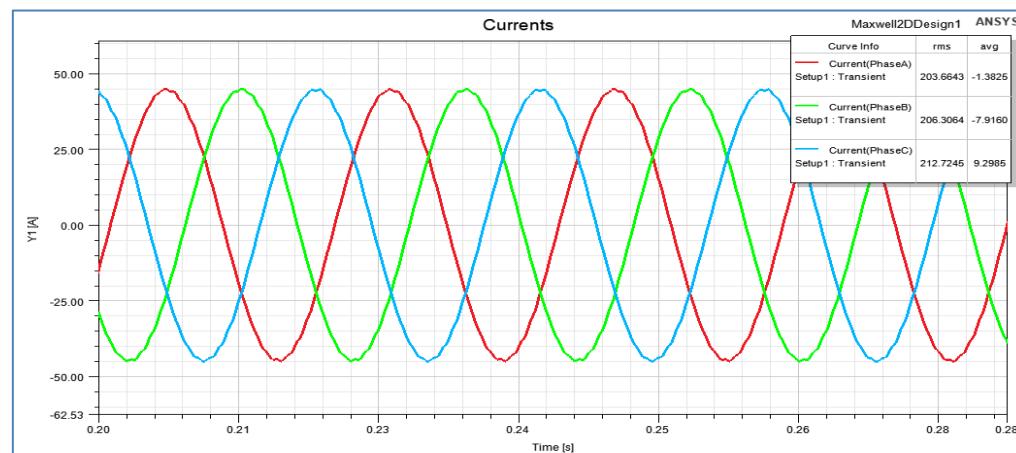
a) Couple électromagnétique



b) Vitesse de rotation



c) Courants statoriques



d) Zoom des courants statoriques en régime permanent

Figure III.6 Quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage en charge

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté brièvement le logiciel *Maxwell- 2D* et montré comment l'utiliser pour simuler quelques régimes transitoires du moteur étudié (une machine asynchrone à cage d'écureuil de 30 kW) fonctionnant au mode sain.

Dans le but d'étudier certaines performances de la machine en régime dynamique (transitoire), nous avons créé un modèle 2D à partir de *RMxpert*. Ensuite, nous avons simulé le moteur au démarrage à vide puis en charge sous *Maxwell-2D*. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de ce logiciel pour déterminer les performances de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis.

Chapitre IV

Simulation de la Machine Etudiée en Mode Défaillant par Maxwell-2D

IV.1 Introduction

La première cause des défauts d'excentricité est l'augmentation ou la diminution soudaine de la charge lorsque cela se produit de manière répétitive, les défauts de fabrication, l'ovalisation du noyau du stator et la résonance mécanique. Le défaut d'excentricité dans la machine électrique conduira à une longueur d'entrefer non uniforme. Si le défaut d'excentricité n'est pas diagnostiqué à un stade précoce, il aura un impact sur les performances du moteur et endommagera finalement le noyau du stator, l'enroulement et le corps du rotor, ce qui entraînera d'énormes pertes financières.

Les défauts mécaniques se produisent en raison de la défaillance des pièces mécaniques du moteur, ils couvrent près de 50 à 60 % des défauts globaux du moteur à induction. Le plus critique et le plus grave d'entre eux est le défaut de roulement et d'excentricité. L'analyse et la détection de l'excentricité de l'entrefer peuvent être effectuées à l'aide du spectre de courant de ligne du stator. Les effets magnétiques de l'excentricité sur les tôles du noyau du stator et du rotor se reflètent dans les enroulements sous forme de fluctuations harmoniques. L'une des méthodes populaires pour détecter le défaut d'excentricité est l'analyse spectrale de la signature du courant moteur [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter des résultats de simulation du moteur étudié sous Maxwell-2D en mode défaillant dans les cas suivant :

- Cas d'une excentricité statique
- Cas d'une excentricité dynamique
- Cas d'une excentricité mixte.

A chaque fois nous allons montrer l'effet de ces défauts sur quelque caractéristique dynamique du moteur étudié puis nous allons identifier ces défauts à tracer leur signature dans le spectre de courant statorique.

IV.2. Simulation du moteur étudié *Maxwell-2D* en mode défaillant

Pour simuler le défaut d'excentricité sous *Maxwell-2D*, nous sommes obligés de simuler toute la section bidimensionnelle de la machine vue les asymétries causées par cette anomalie.

La figure (IV.1) montre comment désactiver le partitionnement de la section transversale au niveau de RMxpert. Ceci oblige le logiciel à traiter la machine sans considération les symétries et antisymétries.

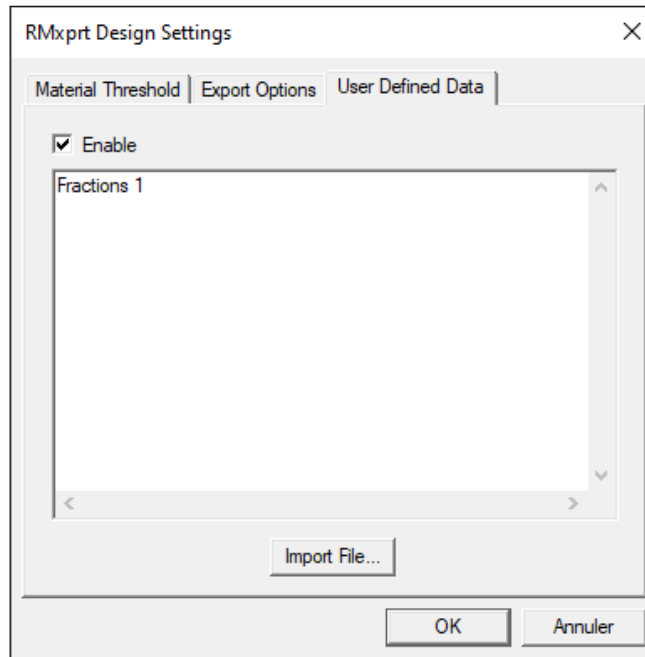


Figure IV.1 Désactivation du partitionnement de la géométrie d'une machine sous RMxpert

Ainsi on peut créer un modèle complet pour le moteur étudié sous Maxwell-2D.

Dans notre travail, nous avons créé trois types d'excentricité :

- Excentricité statique
- Excentricité dynamique
- Excentricité mixte

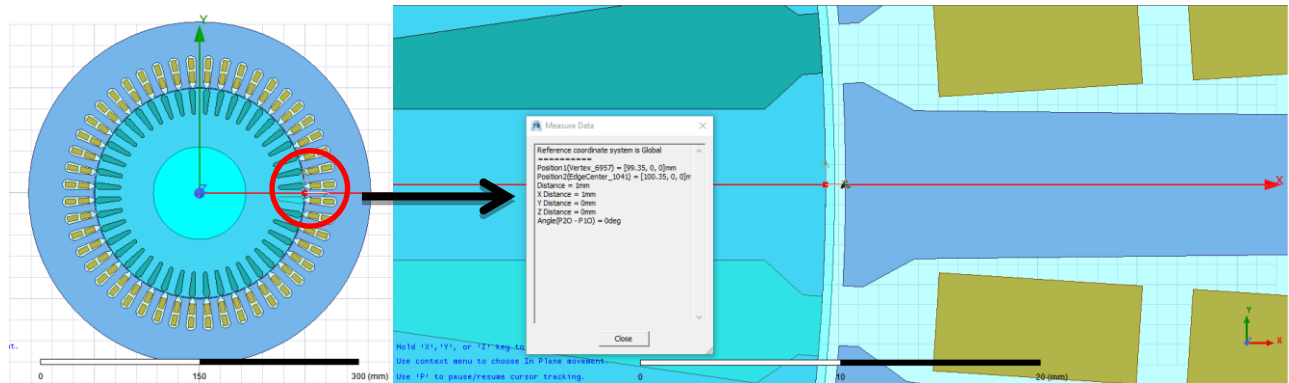
Pour créer une excentricité statique, il suffit de décaler le stator avec une certaine distance par rapport au centre du rotor dans notre cas nous avons simulé deux cas d'excentricité statique : décalage à droite du stator de 0.1mm soit une excentricité de 11% (voir figure IV.2) puis décalage du stator de 0.18mm soit 20% d'excentricité.

Nous avons procédé aussi à la création du défaut d'excentricité dynamique sachant que le logiciel garde le centre de rotation lié à l'axe 'Z', tout en décalant à droite le rotor par rapport au centre du stator de 0.1mm soit 11% d'excentricité.

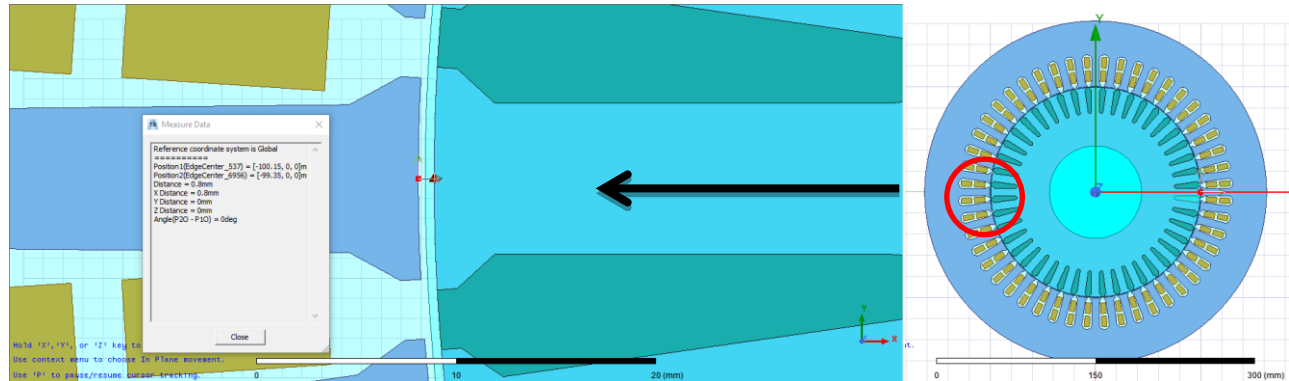
Et enfin, nous avons simulé une excentricité mixte qui correspond à un décalage à droite du stator de 0.2 mm et du rotor à droite 0.1mm.

A chaque ces simulation a été effectuée avec un pas de calcul de 0.0002s pendant d'acquisition de 4s. Ceci a exigé un temps de calcul de 96 heures environ pour chaque simulation, sur un PC possédant un i5 comme processeur d'une vitesse de 2.6GHz et de 4G de RAM.

Dans ce qui suit, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation obtenue pour tous les trois cas.



a) Zoom sur l'entrefer à droite



b) Zoom sur l'entrefer à gauche

Figure IV.2 Excentricité statique créée par décalage à droite du stator de 0.1mm

La technique de maillage adaptatif et automatique de *Maxwell-2D* a été utilisée pour le maillage des sections transversales de la machine étudié (voir figure IV.3)

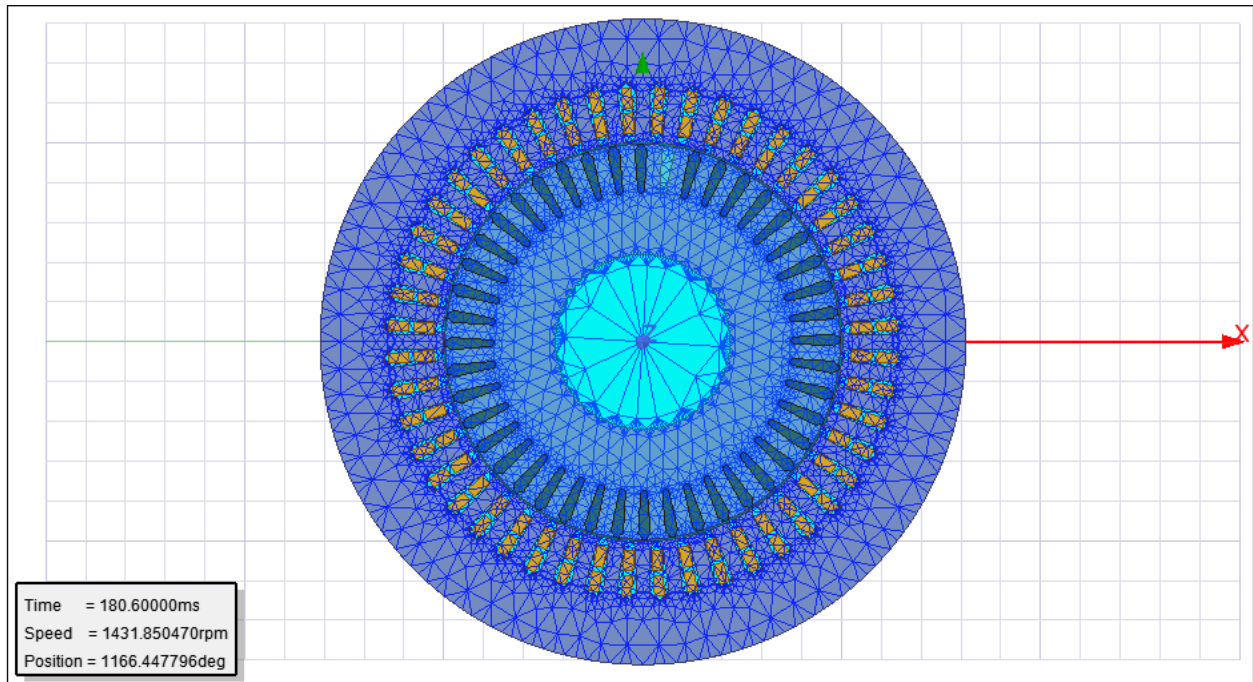


Figure IV.3 Maillage de la section 2D du moteur étudié

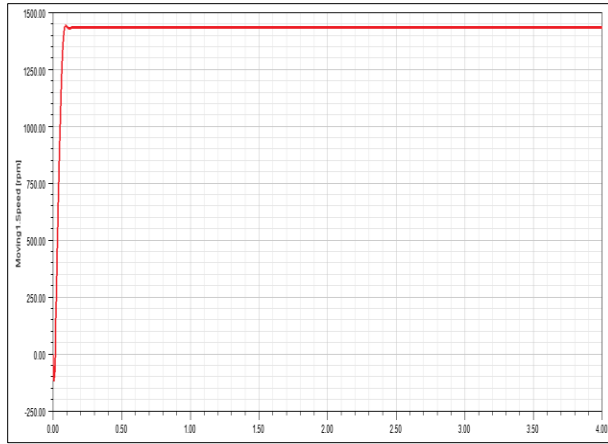
IV.3. Impact du défaut d'excentricité sur les performances de la machine

L'excentricité rend l'entrefer non uniforme ce qui provoque une déformation de l'induction magnétique au niveau de l'entrefer des force électromotrices induit et des fluctuations au niveau des courants statorique, des couples et de la vitesse.

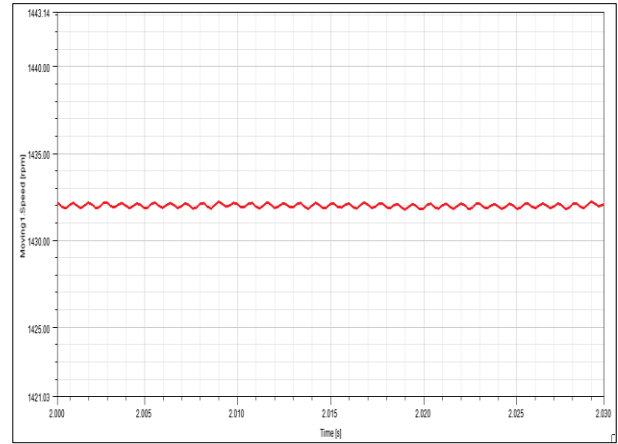
Pour montrer l'effet d'excentricité sur les caractéristiques de la machine étudiée, nous avons simulé un démarrage en pleine charge pour les trois cas différents d'excentricité (statique, dynamique et mixte) et pour deux différents degrés de décalage ou de sévérité.

La figure (IV.4) illustre les résultats de simulation obtenus (allure de la vitesse, du couple et courant de phases statoriques), dans le cas d'une excentricité statique de 11%.

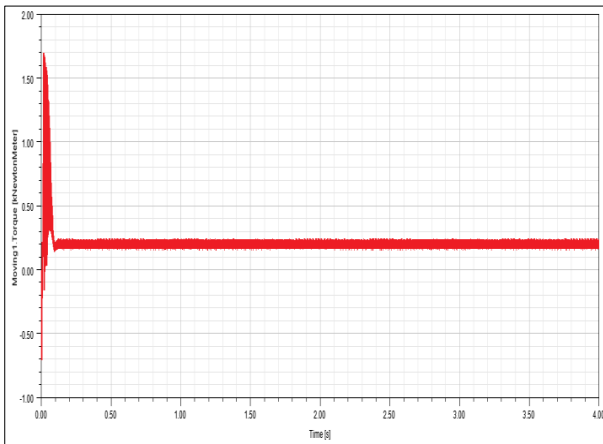
De même, la figure (IV.5) montre l'allure de la vitesse, du couple électromagnétique et du courant de phase statorique au démarrage en charge dans le cas d'une excentricité dynamique de 11%.



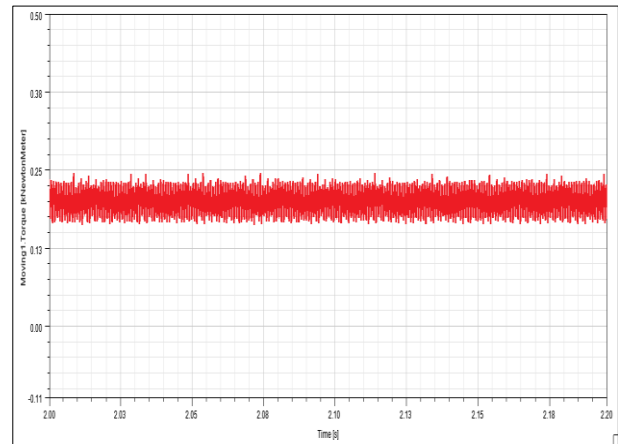
a) Vitesse de rotation



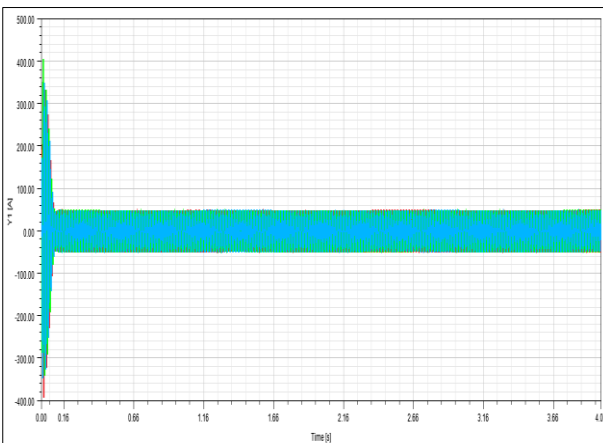
b) Zoom de la vitesse



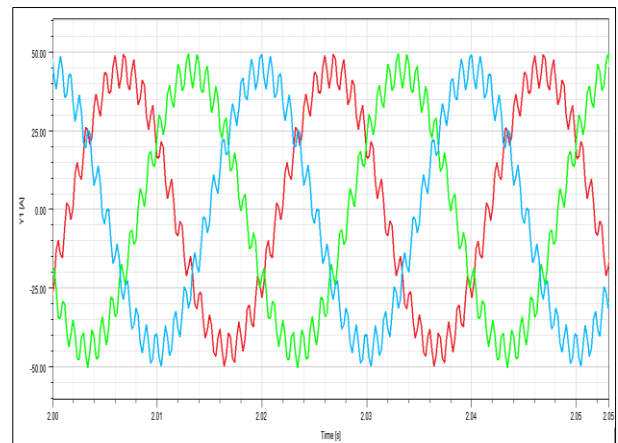
c) Couple électromagnétique



d) Zoom du couple

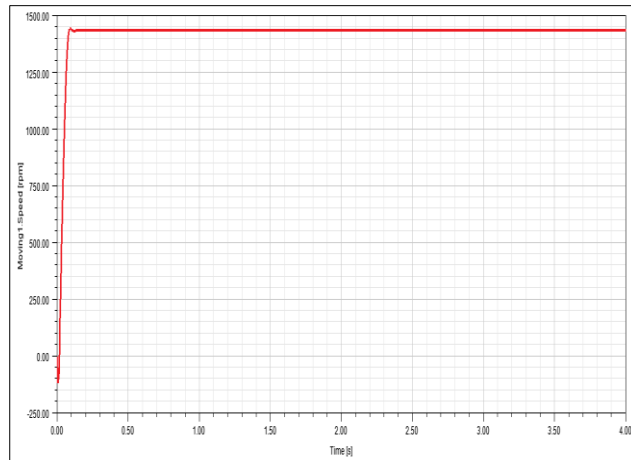


e) Courant de phase statorique

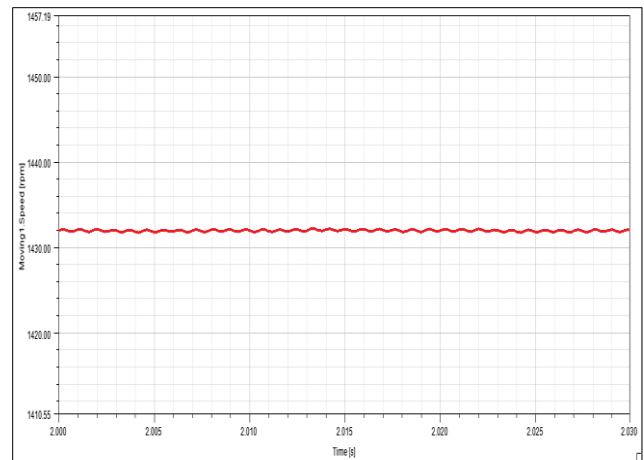


f) Zoom du courant

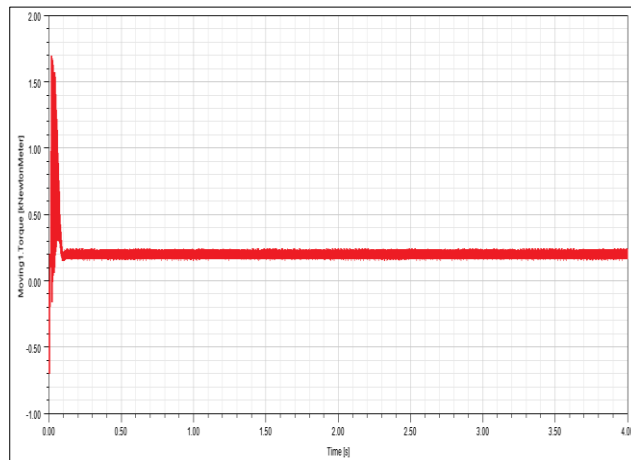
Figure IV.4 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge dans le cas d'une excentricité statique



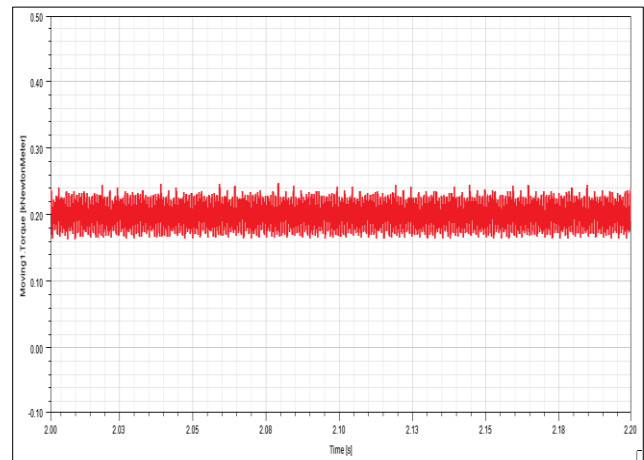
a) Vitesse de rotation



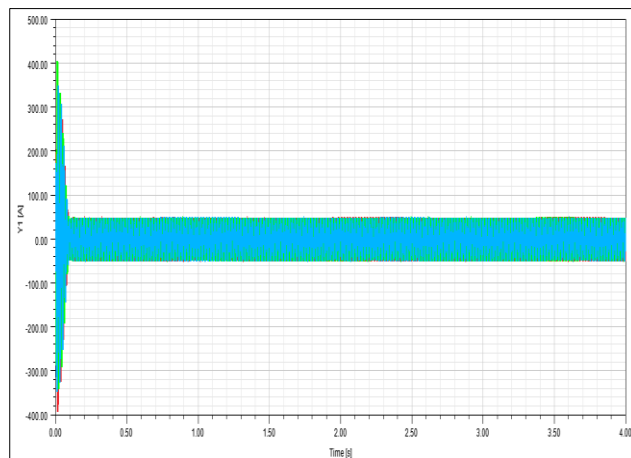
b) Zoom de la vitesse



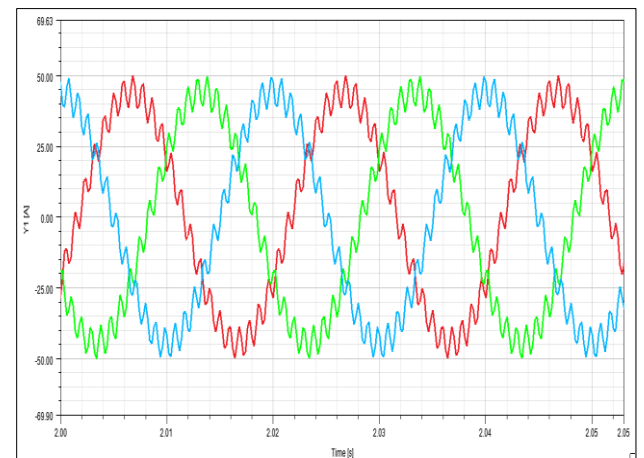
c) Couple électromagnétique



d) Zoom du couple



e) Courant de phases statorique



f) Zoom du courant

Figure IV.5 Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge dans le cas d'une excentricité dynamique

Ces figures (IV.4) et (IV.5) montrent l'influence de l'excentricité sur les caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage en charge. En effet on remarque des fluctuations au niveau de ces trois grandeurs.

Le tableau suivant résume les effets de défaut d'excentricité sur les grandeurs (vitesse, couple et courant du stator) au démarrage en charge.

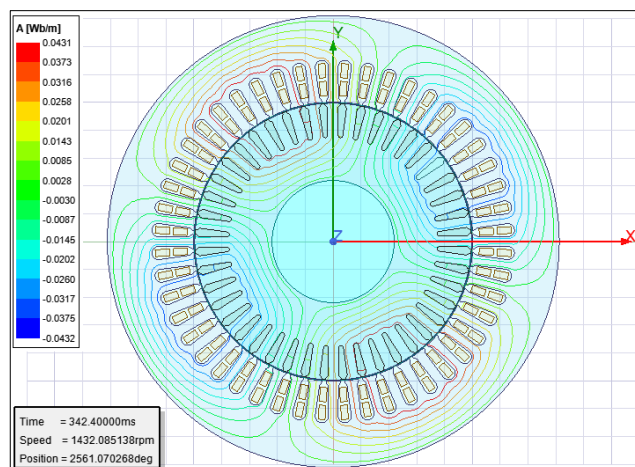
Tableau IV.1 Effet d'une excentricité de 11% sur les caractéristiques de la machine étudiée

Paramètre	Machine saine	Excentricité statique	Excentricité dynamique	Excentricité mixte
Temps de démarrage (s)	0.11	0.12	0.14	0.13
Vitesse (tr/min)	1431.59	1432.06	1432.02	1431.99
Ondulation de vitesse (tr/min)	0.39	0.6	0.55	0.53
Couple (N.m)	200.7	205	205	200
Ondulation du couple (N.m)	0.0054	0.08	0.09	0.07
Courant statorique (A)	31.98	35.39	34.98	35.32
Ondulation de son amplitude (A)	0	10.76	11.32	11.16

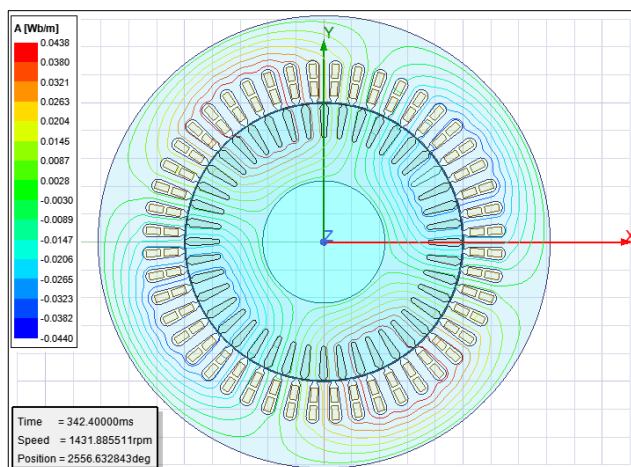
Notons que la vitesse, le couple et le courant ne varient pas considérablement en moyenne lors de l'apparition d'un défaut d'excentricité. En effet, reste pratiquement constante, le couple augmenté de 2.5% environ dans les deux premier cas d'excentricité, tandis que le courant marque un accroissement de 10% environ.

Par ailleurs, les figures (IV.6) et (IV.7) montrent l'effet d'un défaut d'excentricité sur la répartition des lignes du champ et sur l'induction magnétique au niveau de la section transversale de la machine étudiée.

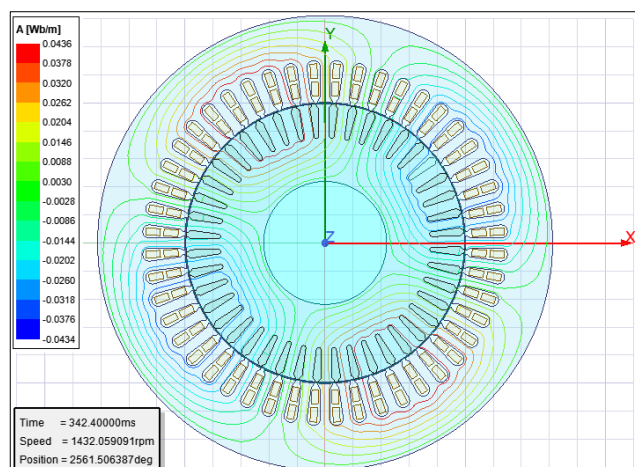
On remarque dans l'ensemble qu'une augmentation de l'entrefer provoque quelques lignes du champ traversant les encoches et une diminution de celui-ci est accompagnée d'une augmentation de l'induction notamment dans la zone dentaire.



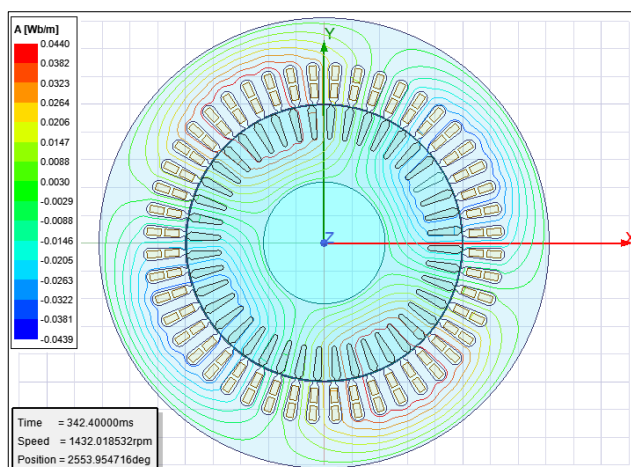
a) Cas d'une excentricité statique de 11%



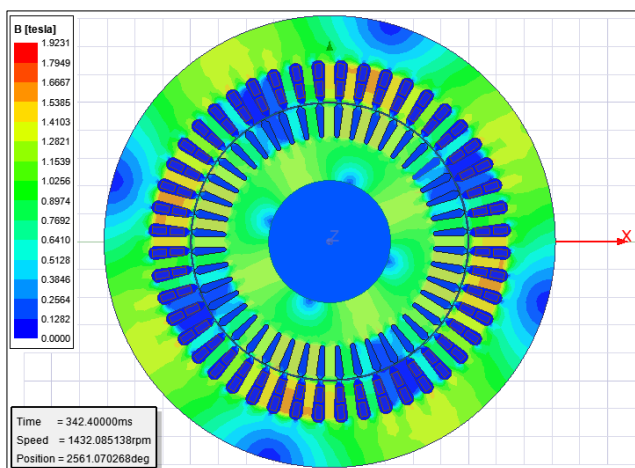
b) Cas d'une excentricité statique de 20%



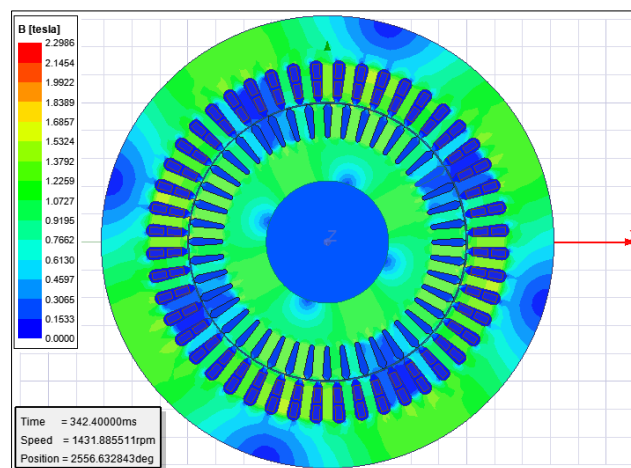
c) Cas d'une excentricité dynamique de 11%



d) Cas d'une excentricité dynamique de 20%

Figure IV.6 Distribution des lignes du flux dans la machine étudiée fonctionnant en charge et en mode défaillant

a) Cas d'une excentricité statique de 11%



b) Cas d'une excentricité statique de 20%

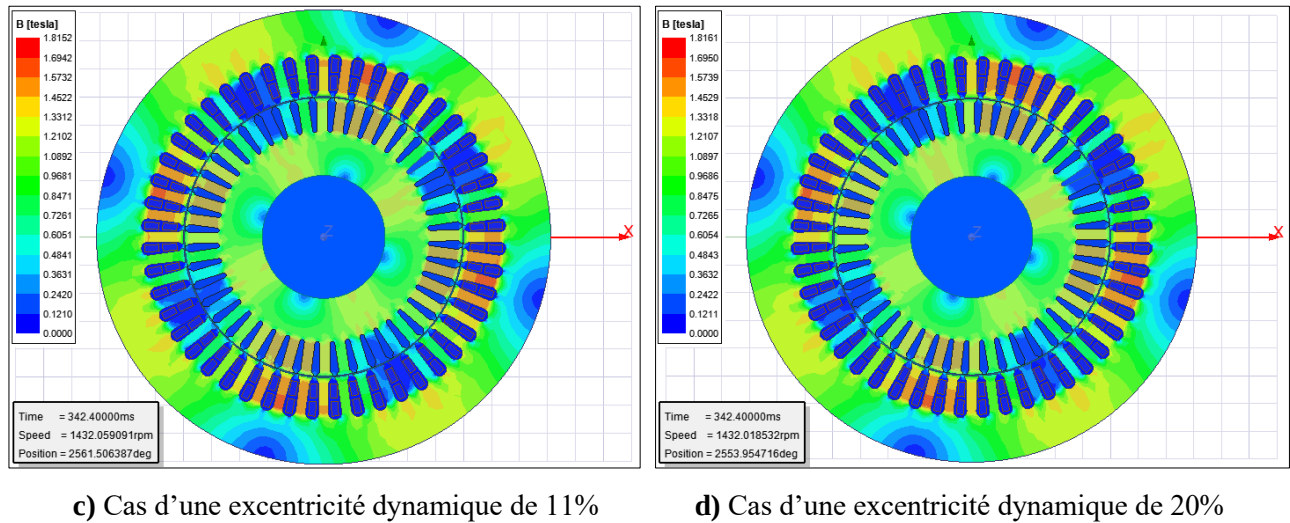


Figure IV.7 Répartition de l'induction magnétique dans la machine étudiée fonctionnant en charge et en mode défaillant

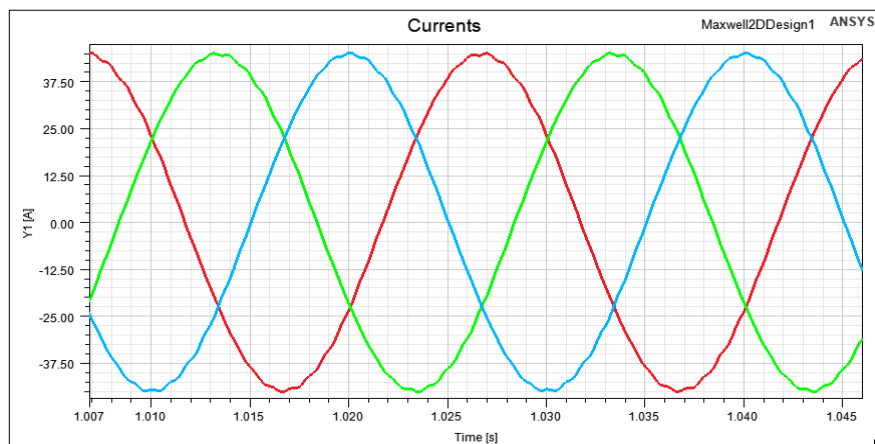
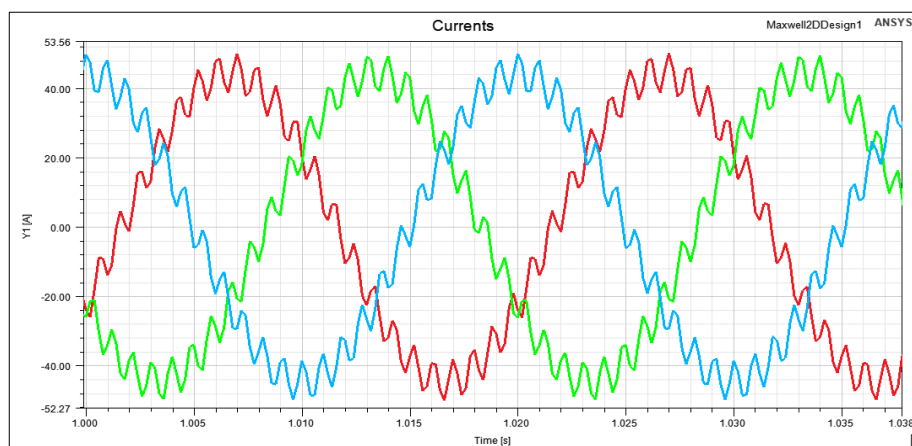
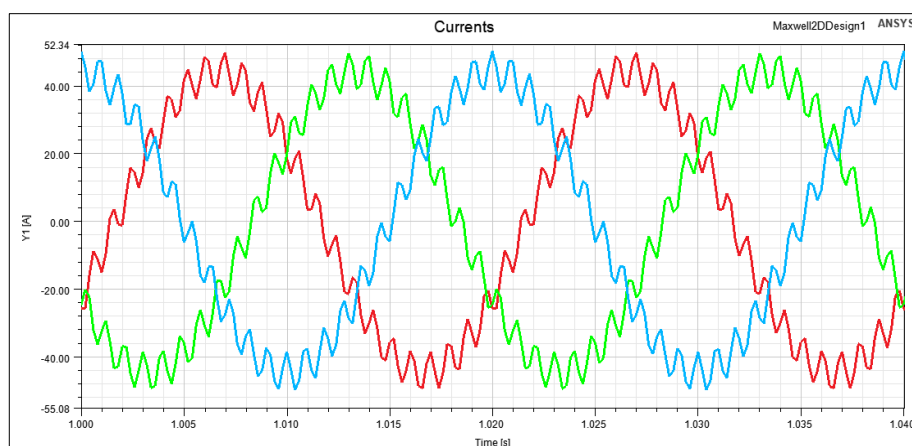
IV.4. Détection des défauts d'excentricité par analyse spectrale

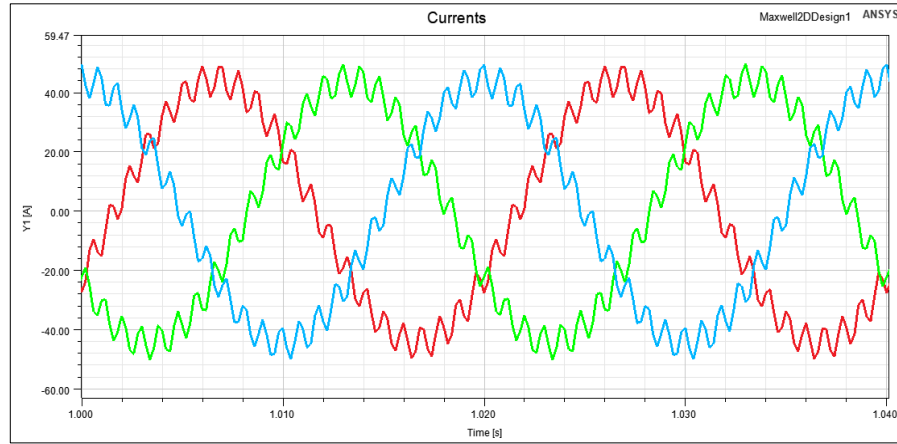
Pendant le fonctionnement de la machine asynchrone à cage, des phénomènes diverses entrent en jeu affectant particulièrement les courants d'alimentation en modifiant leur contenu spectral. Le recours à la Transformée de Fourier Rapide (*FFT*) dans cette étude nous permet d'analyser le courant statorique. C'est un outil mathématique très utilisé, il permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence.

Dans ce travail, le spectre du courant statorique est visualisé sur une échelle logarithmique normalisée par rapport au fondamental.

Les courants des phases statoriques sont beaucoup plus intéressants à étudier car ils sont l'une des grandeurs aisément accessibles à la mesure dans une machine asynchrone. La figure (IV.8) représente l'allure du courant statorique en régime permanent en mode sain et dans le cas des trois modes défaillants.

A première vue, on remarque que le courant comprend des fluctuations qui correspondent des harmoniques d'excentricité mais on ne peut pas distinguer les fréquences de ces harmoniques c'est pourquoi on doit ceci nous a poussé à effectuer une analyse spectrale pour mieux caractériser ces harmoniques.

**a) Mode sain****b) Cas d'une excentricité statique de 11%****c) Cas d'une excentricité dynamique de 11%**



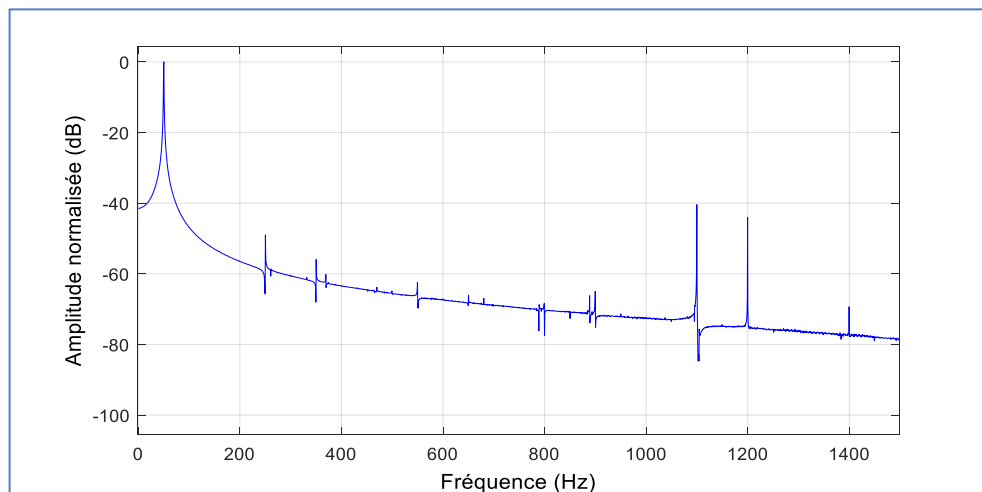
d) Cas d'une excentricité mixte

Figure IV.8 Zoom du courant statorique en régime établi pour différents modes de fonctionnement

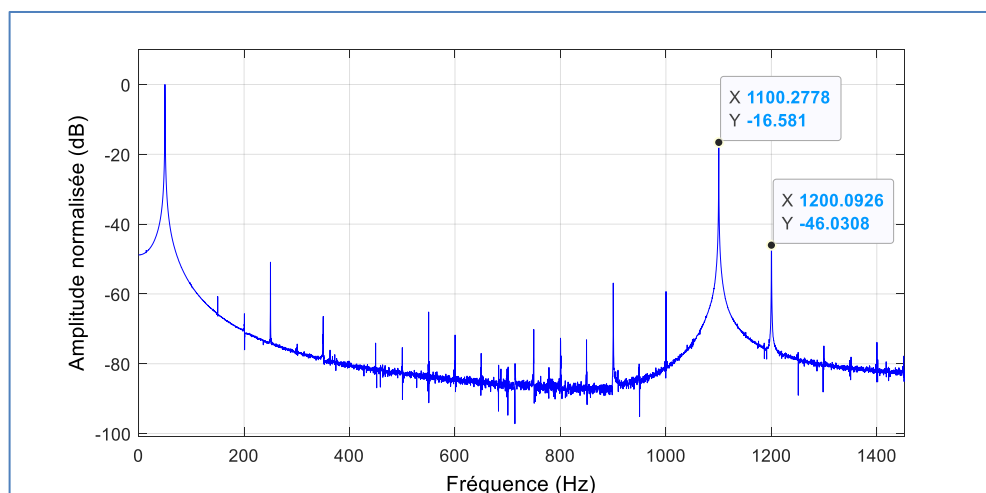
La figure (IV.9) représente les spectres du courant statorique en mode sain et en modes défaillants correspondant aux différents types d'excentricité. Selon l'étude théorique qu'on a faite au premier chapitre, nous avons noté l'apparition des fréquences harmoniques bien déterminées au niveau du courant statorique qui sont dues à l'excentricité voir tableau (I.1).

Nous allons nous intéresser particulièrement aux deux harmoniques principaux d'encoches qui semblent être les plus influencées par ce type de défaillance rappelons que celles-ci apparaissent sur le spectre aux fréquences suivants (pour $k=1$) :

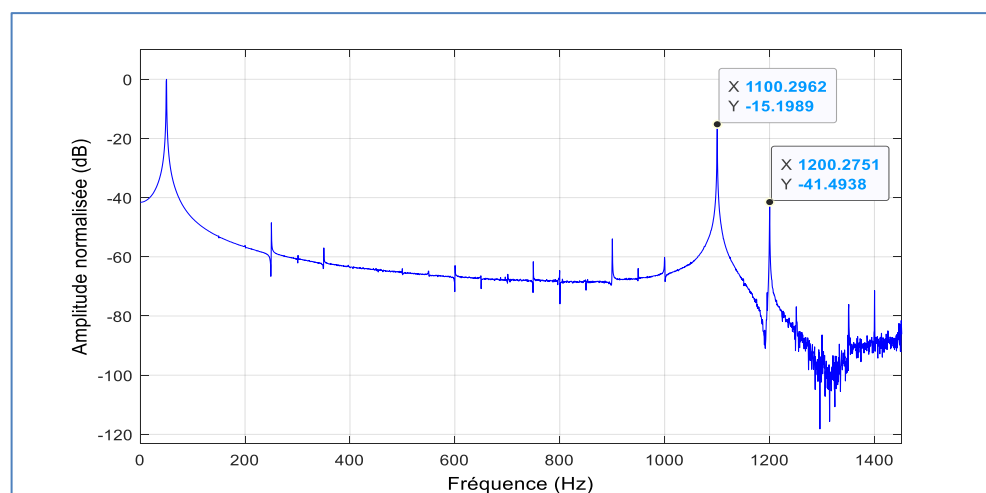
$$f_{ecc} = \left[\left(\frac{kN_b \pm n_d}{p} \right) (1 - g) \pm n \right] f_s$$



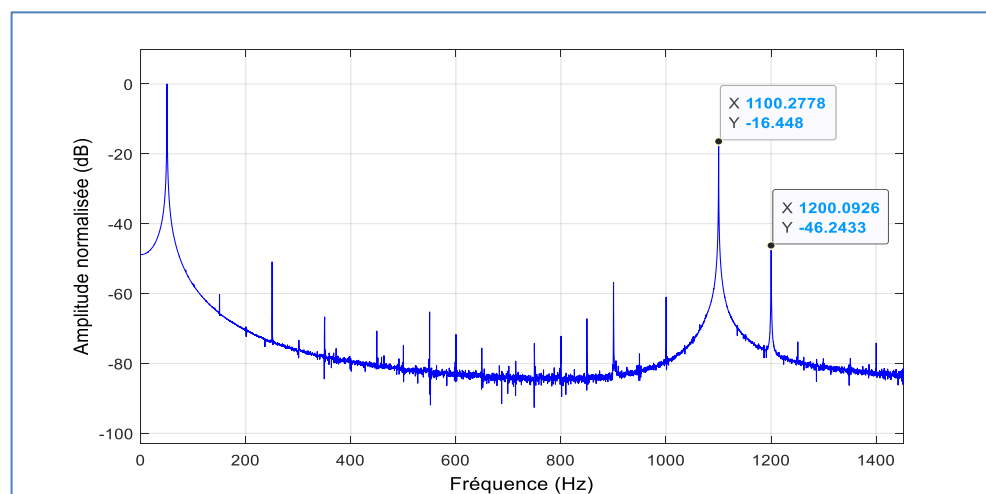
a) Mode sain



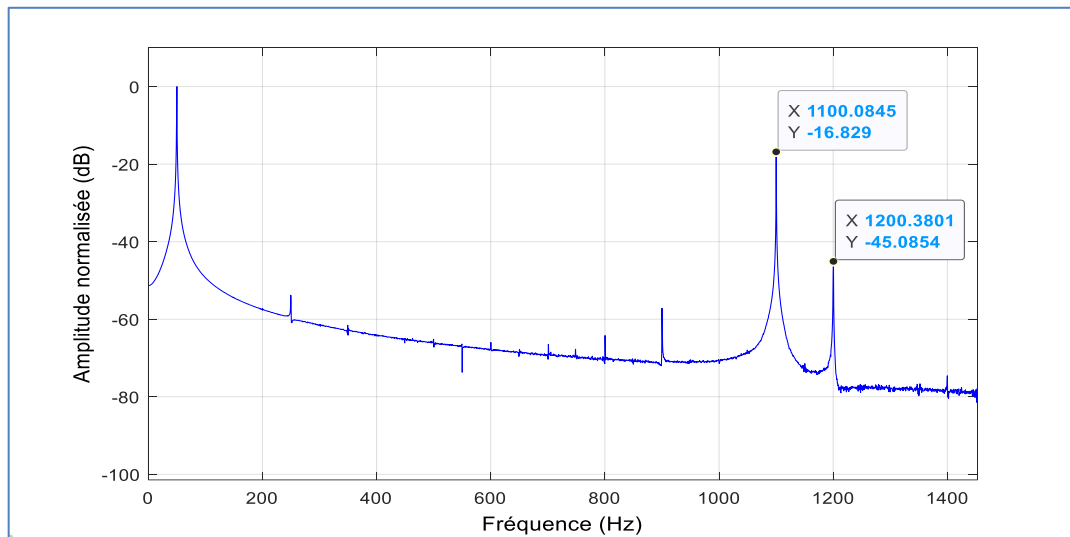
b) Cas d'une excentricité statique de 11%



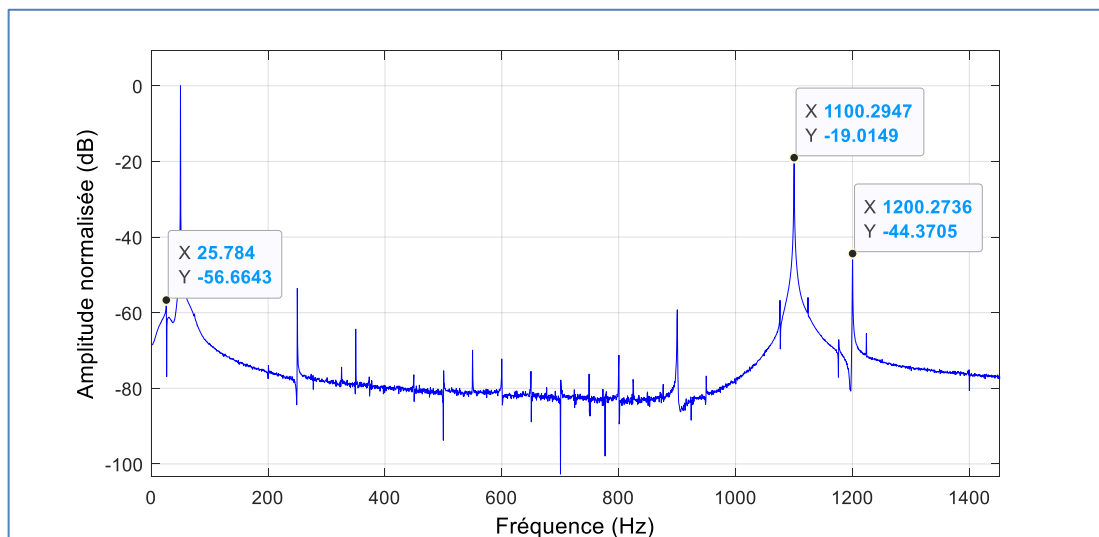
c) Cas d'une excentricité statique de 20%



d) Cas d'une excentricité dynamique de 11%



e) Cas d'une excentricité dynamique de 20%



f) Cas d'une excentricité mixte (22% statique & 11% dynamique)

Figure IV.9 Spectres du courant statorique pour différents modes de fonctionnement du moteur étudié

Par ailleurs, le tableau (IV.2) suivant résume les rais de ces deux harmoniques d'encoches :

Tableau IV.2 Harmoniques principales dues aux encoches pour différents mode de fonctionnement

Type d'excentricité	Vitesse Nr (tr/min)	Glissement g (%)	Pour $k = 1$ et $v = 1$	Amplitude (dB) pour $k=1$	Pour $k = 1$ et $v = 3$	Amplitude (dB) pour $k=1$
Statique (11%)	1432.08	4.52	1100.17Hz	-16.58	1200.17Hz	-46.03
Statique (20%)	1431.88	4.54	1100.29Hz	-15.19	1200.27Hz	-41.49
Dynamique (11%)	1432.05	4.53	1100.03Hz	-16.44	1224.03Hz	-65.52
Dynamique (20%)	1432.01	4.53	1100.08	-16.82	1200.38Hz	-45.08
Mixte	1431.99	4.53	1100.29Hz	-19.01	1200.2Hz	-44.37

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre et dans l'obligation de créer un défaut d'excentricité, nous avons tout d'abord simulé une section transversale complète du moteur étudié. Ensuite, nous avons créé un défaut d'excentricité (statique, dynamique puis mixte), en utilisant le logiciel *Ansys-Maxwell 2D*.

Les résultats de simulation obtenus, concernant un démarrage en charge nominale, ont été présentés et discutés. Ce qui a montré l'effet de ce type de défaillance qui se manifeste, à première vue, sous forme de fluctuations aux niveaux des grandeurs visualisées (vitesse, couple et courant statorique).

Une analyse spectrale par *FFT* du courant statorique a été effectuée pour mieux identifier la signature du défaut d'excentricité sur le plan fréquentiel. En effet, les deux premières harmoniques d'encoche nous ont permis de détecter et de quantifier ce type de défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, la surveillance, le diagnostic industriel et la détection rapide et prématurée des dégradations des machines asynchrones sont devenues indispensable et incontournable pour la sûreté de fonctionnement

Ce mémoire avait pour objectif d'étudier les défauts d'excentricité dans la machine asynchrone à cage et d'appliquer une méthode fiable et précise pouvant permettre la détection de ce défaut dès sa naissance ou du moins à tout son début.

La détection des défauts est plus aisée par la *FFT* du courant statorique. Cette constatation s'explique en partie par le fait que le courant statorique est plus accessible et mesurable extérieurement.

Tout d'abord, nous avons procédé à un rappel sur les éléments constituant les machines électriques et les différents défauts qui peuvent survenir lors du fonctionnement de celui-ci, ainsi que leurs causes, et on a mis l'accent sur les défauts d'excentricité et les fréquences des harmoniques qui apparaissent à cause de ce type de défaillance. Nous avons ensuite décrit brièvement les diverses méthodes de diagnostic pour pouvoir choisir celle qui nous convient.

Ensuite, nous avons caractérisé une machine asynchrone à cage de 30 kW, que nous avons simulée sous l'outil *RMxpert*, ceci nous a permis de mettre en évidence les performances statiques de cette machine et établir un modèle géométrique et électromagnétique *2D*.

Puis en se basant sur ce modèle, le logiciel *ANSYS-Maxwell 2D* a été utilisé pour la simulation du régime dynamique de la machine étudiée en mode sain.

Et enfin, nous avons simulé la machine à l'état défectueux d'excentricité statique et/ou dynamique. Rappelons que ce dernier a été simulé par l'introduction d'un décalage de l'axe du rotor et/ou du stator par rapport à l'axe de rotation. Les résultats obtenus sont très satisfaisants, semblables à ceux de la littérature et nous ont permis d'identifier ce genre de défauts de la MAS.

Nous avons remarqué que les lignes de flux ne restent plus uniformes lors de défaut d'excentricité comme ils l'étaient à l'état sain. De plus, nous avons noté que les harmoniques caractéristiques du défaut d'excentricité sont bien visibles dans le spectre du courant statorique et dépendent de la fréquence du fondamental et de la fréquence d'encoche. Ces raies sont observées même pour un faible défaut d'excentricité (5%), ce qui permet d'établir un critère de détection précoce dans ce type de défaut.

Aussi on a constaté que l'amplitude de ces harmoniques d'excentricité augmente lorsque la sévérité du défaut augmente ce qui permet d'avoir une idée sur la nature et le degré du défaut. Par contre, le spectre du courant de défaut d'excentricité dynamique ne contient pas des raies identificateurs du défaut même en zoomant de façon poussée. Mais, il est possible l'identifier s'il est accompagné d'un tant soit peu d'excentricité statique ce qui est le cas en pratique (impossibilité d'un alignement parfait des axes du rotor et du stator).

Enfin, nous jugeons que ce travail est loin d'être achevé et il peut être poursuivi dans plusieurs directions. Ainsi, il nous semble important d'envisager d'autre cas de déficiences tels que :

- Construire une base de données pouvant être utilisée pour l'identification de la nature du défaut et son degré de sévérité ;
- Utiliser d'autres grandeurs (vitesse, couple, ... etc.) pour l'analyse spectrale et la détection de ce genre de défauts d'excentricité ;
- Passer au modèle 3D et refaire le travail, pour se rapprocher davantage de la réalité des phénomènes au sein de la machine et pour pouvoir étudier des défauts de nature tridimensionnelle telle que l'excentricité dynamique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] B. Souad et G. Said, '*Analyse de l'Effet de Défauts sur les Performances et les Paramètres d'un Moteur Asynchrone Triphasé en Utilisant Maxwell 2D*', Master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou - Algérie, 2018.
- [2] M. Harie, '*Etude des Défauts dans la Machine Asynchrone à Cage d'Ecureuil par l'Emploi de la Fonction d'Enroulement Modifiée*', Mémoire de Magister, Université Mohamed Boudiaf – Oran, Algerie, 2009.
- [3] M. A. Mossa, '*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone en Temps Réel*', Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri, Constantine 1, Algérie, 2018.
- [4] H. Cherif, '*Détection des Défauts Statorique et Rotorique dans la Machine Asynchrone en Utilisant l'Analyse par FFT et Ondelettes*', Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider - Biskra, Algerie, 2014.
- [5] S. Merahi, '*Diagnostic de Défauts des Machines Electriques*', Mémoire de Master, Université Larbi Ben Mehidi, Oumel Bouaghi, Algérie, 2020.
- [6] A. Bouguerne, '*Diagnostic Automatique des Défauts des Moteurs Asynchrones*', Thèse de Magister en Electrotechnique, Université Mentouri - Constantine, Algérie, 2009.
- [7] O. Sid, '*Diagnostic de Défauts de la Machine Asynchrone à Cage par les Réseaux de Neurones*', Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Houari Boumediene, Algérie, 2011.
- [8] I. Ghozlane et A. Djabri, '*Diagnostic des Défauts de Cage Rotorique d'un MAS en Utilisant RMxpert & ANSYS-Maxwell*', Mémoire de Master, Université Amar Thelidji, Laghouat, Algérie, 2022.
- [9] A. Ceban, '*Méthode Globale de Diagnostic des Machines Electriques*', Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2012.
- [10] M. Hellal et S. Ramdane, '*Etude des Performances de la Machine Asynchrone Sous Défauts*', Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.

- [11] S. Bachir, '*Contribution au Diagnostic de la Machine Asynchrone par Estimation Paramétrique*', thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2002.
- [12] G. Didier, '*Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défaillances*', Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy- I, France, 2004.
- [13] S. Badja et S. Gaoui, '*Analyse de l'Effet de Défauts sur les Performances et les Paramètres d'un Moteur Asynchrone Triphasé en Utilisant Maxwell 2D*', Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.
- [14] R. Soury et M. A. Bounaceur, '*Simulation Numérique des Phénomènes Magnétodynamique de la Machine Synchrone à Aimants Permanents*', Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2022.
- [15] B. Chermat, '*Diagnostic des Défauts de MAS par les Méthodes Paramétriques de Traitement du Signal*', Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2012.
- [16] K. Abdelali and I. Chekkem, '*CAO d'une Machine Electrique en Utilisant ANSYS-Maxwell Application à un Moteur à Induction Triphasé*', Mémoire de Master, Université Amar Telidji - Laghouat, Aalgérie, 2019.
- [17] W. Elghoul et M. C. Tassourit, '*Détection et Diagnostic des Défauts d'Excentricité du Moteur Asynchrone*', Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2012.
- [18] A. Ghoggal, '*Contribution à la Modélisation de la Machine Asynchrone Triphasée Dédiée au Diagnostic*', Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2010.
- [19] --, '*RMxpert Manual.pdf | Electric Motor | Magnetic Devices*', File available at: <https://www.scribd.com/doc/129666336/RMxpert-Manual-pdf>
- [20] --, '*Site officiel de ANSYS Maxwell technologies : Electricité – Electronique*', disponible à : [www. directindustry.fr](http://www.directindustry.fr)