

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 عمّار 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 :

**GHOZLANE Ismail  
DJABRI Achoura**

**THEME**

---

***Diagnostic des Défauts de Cage Rotorique d'un MAS  
en Utilisant RMaxpert & ANSYS-Maxwell***

---

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. SAROUTE	Mohamed	Président
Mr. ALLAL	Nouar	Examineur
Mme BENLARBI	Keltoum	Encadreur
Mr. MOKRANI	Lakhdar	Co-encadreur

**Année Universitaire 2021/2022**

**ملخص:** الهدف من هذه المذكرة هو تشخيص أعطال كسر القضبان 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 الآلات غير المتزامنة. ثم استخدمنا برنامج ANSYS-RMxpert لتحديد خصائص المحرك المدروس ذي إستطاعة قدرها 30 كيلو واط. وأخيرًا، باستخدام برنامج ANSYS-Maxwell 2D، قمنا بمحاكاة إشتغال المحرك العادي وفي حالة حدوث عطب. كما تم بنجاح إستخدام تقنية التحليل الطيفي لتيار الثابت والسرعة (FFT) لتشخيص أعطال كسر القضبان في الآلة غير المتزامنة المدروسة.

**كلمات مفتاحية:** محرك لاتزامني بقدرة 30 كيلواط برنامج ANSYS-RMxpert، حساب الخصائص، طريقة العناصر المنتهية، برنامج ANSYS-Maxwell 2D، نموذج ثنائي الأبعاد لمحرك سليم، نموذج ثنائي الأبعاد لمحرك ذي عطل، التحليل الطيفي بواسطة FFT، تشخيص كسر القضبان.

**Résumé :** L'objectif de ce mémoire est le diagnostic des défauts de cassures de barres 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. Et enfin, en utilisant le logiciel ANSYS-Maxwell 2D, nous avons simulé la machine étudiée en mode sain et en mode défaillant. La technique d'analyse spectrale par FFT du courant statorique et de la vitesse a été utilisée avec succès pour diagnostiquer des défauts de cassures de barres 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, Analyse spectrale par FFT, Diagnostic de cassure de barres.

**Abstract :** The aim of this memoir is the diagnosis of bar break faults in three-phase squirrel-cage induction motor (IM) by a simulation model based on a 2D finite element method. We started by establishing a state of the art on the diagnosis of IM faults. Then, we used ANSYS-RMxpert software to characterize the studied motor with a power of 30 kW. And finally, the ANSYS-Maxwell 2D software, has been used to simulate the machine in normal and in faulty modes. The FFT spectral analysis technique of stator current and speed has been successfully used to diagnose bar break faults in the studied asynchronous machine.

**Keywords:** IM of 30 kW, ANSYS-RMxpert, MAS Characterization, Finite element method, ANSYS-Maxwell 2D, IM 2D model in healthy mode, IM 2D Model in faulty mode, Spectral analysis by FFT, Bar break 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<sup>ème</sup> Master Machines Electriques».*

**DJABRI Achoura**

## 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,*

*à mes frères et ma sœur,*

*à mes chers amis et mes collègues de la promotion*

*«2<sup>ème</sup> Master Machines Electriques».*

***GHOZLANE Ismail***

## ***Remerciements***

Nous tenons à remercier tout premièrement **Dieu** le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous remercions tout d'abord notre encadreur **Mme BENLARBI Keltoum**, pour l'aide et le temps, qu'elle a bien voulu nous consacrer.

Nous exprimons notre gratitude à notre co-encadreur **Mr MOKRANI Lakhdar** qui nous a aidés à faire ce travail.

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 **SAROUTE Mohamed** en qualité de président du jury et monsieur **NOUAR Allal** 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 leurs conseils précieux.

Nous tenons à remercier toutes les personnes, qui nous ont apporté leur aide et qui ont ainsi contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous remercions également, tous ceux que nous avons rencontrés lors de la réalisation de ce travail et qui ont accepté de répondre à nos interrogations avec gentillesse.

# ***Liste des Symboles***

## *Liste des Symboles*

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	Unité
<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>Fmm</i>	Force magnétomotrice	A.tr
<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	-

# ***Liste des Figures***

## *Liste des Figures*

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
<b><i>Figures du Chapitre I</i></b>	
<b>Figure (I.1)</b> Différents défauts statoriques	6
<b>Figure (I.2)</b> Exemple des défauts de court-circuit statoriques	7
<b>Figure (I.3)</b> Rupture d'une barre de la cage rotorique	8
<b>Figure (I.4)</b> Ruptures d'anneaux	9
<b>Figure (I.5)</b> Défauts de l'excentricité	10
<b>Figure (I.6)</b> Constitution d'un roulement à billes	11
<b>Figure (I.7)</b> Différentes grandeurs de diagnostic dans une machine	12
<b>Figure (I.8)</b> Bobine exploratrice pour la mesure du flux axial de fuites	15
<b>Figure (I.9)</b> Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique	16
<b><i>Figures du Chapitre II</i></b>	
<b>Figure (II.1)</b> Interface de sélection du type de machines dans <i>RMxpert</i>	20
<b>Figure (II.2)</b> Fenêtre de projet de <i>RMxpert</i>	20
<b>Figure (II.3)</b> Fenêtre des grandeurs nominales de la machine dans <i>RMxpert</i>	22
<b>Figure (II.4)</b> Fenêtres de quelques paramètres du moteur étudié par <i>RMxpert</i>	23
<b>Figure (II.5)</b> Fenêtre des paramètres du stator dans <i>RMxpert</i>	24
<b>Figure (II.6)</b> Modèle choisi pour l'encoche de stator	25
<b>Figure (II.7)</b> Fenêtres des propriétés de l'enroulement du stator	26
<b>Figure (II.8)</b> Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche	27

<b>Figure (II.9)</b> Géométrie du stator du moteur étudié	27
<b>Figure (II.10)</b> Type d'encoches choisi au rotor	29
<b>Figure (II.11)</b> Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor	30
<b>Figure (II.12)</b> Géométrie du rotor du moteur étudié	30
<b>Figure (II.13)</b> Quelques caractéristiques du moteur étudié	32
<b>Figures du Chapitre III</b>	
<b>Figure (III.1)</b> Géométrie 2D réduite de la machine asynchrone étudiée	36
<b>Figure (III.2)</b> Maillage de la géométrie 2D réduite du moteur étudiée	36
<b>Figure (III.3)</b> Répartition des champs magnétiques sur une géométrie 2D du moteur étudié au démarrage à vide	38
<b>Figure (III.4)</b> Quelques caractéristiques dynamique par un moteur étudié au démarrage à vide	40
<b>Figure (III.5)</b> Répartition du champ dans une section 2D du moteur étudié sous maxwell 2D au démarrage en charge	42
<b>Figure (III.6)</b> Quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage à vide et en charge	44
<b>Figure (III.7)</b> Courant statorique en fonction du temps en charge et en régime permanent	45
<b>Figures du Chapitre IV</b>	
<b>Figure (IV.1)</b> Géométrie 2D du moteur étudié en cas de défaut de cassure de barres	48
<b>Figure (IV.2)</b> Maillage de la section 2D du moteur étudié	49
<b>Figure (IV.3)</b> Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge en cas de cassure de deux barres adjacentes	50
<b>Figure (IV.4)</b> Résultats de simulation du moteur étudiée au démarrage en charge en cas de cassure de quatre barres adjacentes	51
<b>Figure (IV.5)</b> Distribution des lignes du flux dans la machine	53
<b>Figure (IV.6)</b> Répartition de l'induction magnétique dans la machine fonctionnant en mode	54

défaillant	
<b>Figure (IV.7)</b> Zoom du courant statorique pour un fonctionnement en mode sain	56
<b>Figure (IV.8)</b> Spectres du courant statorique pour différents modes de fonctionnement	57
<b>Figure (IV.9)</b> Spectre de la vitesse pour différents modes de fonctionnement	59

# ***Liste des Tableaux***

## *Liste des Tableaux*

<i>Tableau</i>	<i>Page</i>
<b><i>Tableaux du Chapitre II</i></b>	
<b>Tableau II.1</b> Paramètres nominaux de la machine étudiée	21
<b>Tableau II.2</b> Paramètres du moteur sous <i>RMxpert</i>	22
<b>Tableau II.3</b> Paramètres généraux du stator du moteur étudié	23
<b>Tableau II.4</b> Paramètres généraux des encoches du stator	24
<b>Tableau II.5</b> Paramètres généraux de l'enroulement du stator	25
<b>Tableau II.6</b> Paramètres généraux du rotor du moteur étudié	28
<b>Tableau II.7</b> Paramètres des encoches du rotor	28
<b>Tableau II.8</b> Paramètres généraux des barres du rotor	29
<b>Tableau II.9</b> Quelques caractéristiques du moteur étudié calculée par <i>RMxpert</i>	31
<b><i>Tableaux du Chapitre III</i></b>	
<b>Tableau III.1</b> Paramètres mécaniques du moteur sous Maxwell2D à vide	37
<b>Tableau III.2</b> Paramètres mécaniques du moteur étudié sous <i>Maxwell-2D</i> pour un démarrage en charge	41
<b><i>Tableaux du Chapitre IV</i></b>	
<b>Tableau IV.1</b> Effet de cassure de barre sur les caractéristiques de la machine étudié	52
<b>Tableau IV.2</b> Récapitulation des raies dans le spectre du courant statorique	58

# ***Sommaire***

# Sommaire

<i>Résumé</i> .....	<i>I</i>
<i>Dédicaces</i> .....	<i>II</i>
<i>Remerciements</i> .....	<i>IV</i>
<i>Liste des symboles</i> .....	<i>V</i>
<i>Liste des figures</i> .....	<i>VIII</i>
<i>Liste des tableaux</i> .....	<i>X</i>
<i>Sommaire</i> .....	<i>XII</i>
<i>Introduction Générale</i> .....	<i>1</i>
<b>Chapitre I Etat de l'Art sur le Diagnostic des Machines Asynchrones</b>	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Défaillances de la machine asynchrone .....	5
I.2.1. Défaillances au stator .....	5
I.2.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement.....	6
I.2.1.2. Court-circuit entre spires.....	6
I.2.1.3. Court-circuit entre phases .....	6
I.2.1. Défaillance au rotor.....	7
I.2.1.1. Ruptures des barres .....	7
I.2.1.2. Ruptures d'anneaux .....	9
I.2.3. Défaillances mécaniques.....	9
I.2.3.1. Défaut d'excentricité .....	9
I.2.3.2. Défauts de roulements.....	10
I.2.3.3. Défaillance de l'arbre .....	11
I.2.3.4. Défauts du flasque.....	11
I.3. Conséquences des défauts.....	12
I.4. Différentes méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone .....	12
I.4.1. Diagnostic à partir des méthodes internes .....	13
I.4.1.1. Diagnostic par mesure de la température.....	13
I.4.1.2. Diagnostic par mesure des vibrations .....	13

I.4.2. Diagnostic chimique .....	14
I.4.3. Techniques de diagnostic magnétique et électrique.....	14
I.4.3.1. Diagnostic par la mesure du flux magnétique axial de fuites .....	14
I.4.3.2. Diagnostic par l'analyse des courants statoriques .....	15
I.5. Conclusion.....	16
<b>Chapitre II Présentation et Caractérisation de la Machine Asynchrone Étudiée</b>	
II.1. Introduction .....	18
II.2. Présentation de <i>RMxpert</i> et du moteur étudié .....	18
II.2.1. Applications de <i>RMxpert</i> .....	18
II.2.2. Avantages de <i>RMxpert</i> .....	19
II.2.3. Création d'une nouvelle conception <i>RMxpert</i> .....	19
II.2.4. Paramètres nominaux de la machine .....	21
II.2.5. Différents paramètres du moteur étudié sous <i>RMxpert</i> .....	22
II.2.6. Fenêtre du stator .....	23
II.2.7. Choix du type d'encoches du stator.....	24
II.2.8. Fenêtre des propriétés de l'enroulement du stator .....	25
II.2.9. Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche.....	26
II.2.10. Fenêtre du rotor .....	27
II.2.11. Fenêtre de paramétrage des encoches du rotor.....	28
II.2.12. Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor.....	29
II.3. Caractérisation du moteur étudié par <i>RMxpert</i> .....	30
II.4. Quelques caractéristiques statiques du moteur étudié .....	31
II.5. Conclusion.....	33
<b>Chapitre III Simulation de la Machine Étudiée en Mode sain par Maxwell-2D</b>	
III.1. Introduction .....	35
III.2. Présentation du logiciel .....	35
III.3. Présentation des résultats de simulation du moteur étudié avec <i>Maxwell 2D</i> .....	36
III.3.1. Démarrage à vide du moteur étudié avec <i>Maxwell-2D</i> .....	37
III.3.2. Démarrage en charge du moteur étudié avec <i>Maxwell 2D</i> .....	41
III.4. Conclusion.....	45

---

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

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Modélisation et simulation de la machine sous <i>Maxwell-2D</i> en mode défaillant.....	47
IV.3. Effet de cassure des barres sur les performances de la machine.....	49
IV.4. Effet de cassure de barres sur la répartition du champ magnétique de la machine.....	52
IV.5 Détection des défauts de cassure de barres par analyse spectrale.....	55
IV.5.1. Analyse spectrale du courant statorique.....	55
IV.5.2. Analyse spectrale de la vitesse.....	58
IV.6.Conclusion .....	60
<i>Conclusion générale</i> .....	61
<i>Bibliographie</i> .....	64

# ***Introduction***

# ***générale***

## ***Introduction générale***

La machine asynchrone est la machine la plus robuste et la moins chère du marché. Dans tous les systèmes énergétiques, cette machine est la version la plus connue des machines électriques classiques. De nos jours, elle est encore plus utilisée grâce aux nombreux progrès techniques enregistrés dans les domaines de l'électronique de puissance et des systèmes de commande et des matériaux. Sa bonne construction lui a permis d'être la machine la plus utilisée dans l'industrie surtout quand il s'agit de l'entraînement électrique dans plusieurs domaines industriels, notamment dans les applications à vitesse variable [1].

Malgré ses bonnes qualités, cette machine dite asynchrone a maintes défauts qui peuvent être d'origine mécanique (excentricités du rotor, défaut sur les accouplements, corrosion des roulements,...), électrique (court-circuit du bobinage statorique, rupture de barres rotoriques ou d'anneaux de court-circuit, ...) ou magnétique (défaut d'isolement entre les tôles statoriques). Les grandeurs mesurables tels que le courant statorique, la vitesse ou encore la température et la densité de flux magnétique peuvent être utilisées pour diagnostiquer ces différents défauts [2].

Les machines asynchrones sont multiples. Dans ce travail nous allons focaliser essentiellement sur le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil en vue de diagnostiquer les défauts de cassures de barres. Nous allons nous intéresser plus particulièrement au module *Maxwell-2D* du logiciel *ANSYS* basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel sera utilisé pour modéliser et simuler une machine asynchrone à cage d'écureuil de 30 kW afin d'analyser ses performances en modes sain et défaillant.

En ce sens, la répartition de notre travail sera divisée en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des notions de bases liées à l'action de diagnostic, suivi par une brève présentation de la constitution du dispositif à étudier. Nous présenterons également les différents défauts de la machine asynchrone, en se mettant le point sur les ruptures de barres.

Au niveau du deuxième chapitre, nous allons présenter brièvement *ANSYS-RMxpert* qui est un outil de conception des machines électriques, que nous allons utiliser pour caractériser le moteur étudié.

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

Dans le dernier chapitre, nous allons de nouveau élaborer une modélisation sous *Maxwell-2D* et analyser les performances de la machine étudiée fonctionnant en mode de défaut concernant une cassure de barres rotoriques. Afin de diagnostiquer ce genre de défauts, une analyse spectrale par *FFT* sera effectuée sur le courant statorique et la vitesse de rotation.

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

# *Chapitre I*

*Etat de l'Art sur le Diagnostic des*

*Machines Asynchrones*

## I.1. Introduction

Les moteurs à induction sont utilisés dans l'industrie comme une grande source d'énergie mécanique en raison de la simplicité de leur construction et leur fiabilité. En effet Le moteur asynchrone à cage est un composant clé de la plupart des équipements industriels, du fait de sa grande robustesse et son faible coût. Il est en effet, omniprésent dans les secteurs de pointe comme l'aéronautique, le nucléaire, la chimie ... etc.

Malgré le fait que la machine asynchrone à cage soit réputée pour être la plus robuste des machines électriques et malgré ses qualités, elle souffre de quelques défauts. Dans ce travail nous nous intéressons aux cassures du barres rotorique, nous allons un état de l'art concernant, la rupture totale ou partielle de barre rotorique et portion d'anneau. Dans ce chapitre on va présenter les différents défauts au niveau de la machine asynchrone notamment le rupture des barres rotoriques.

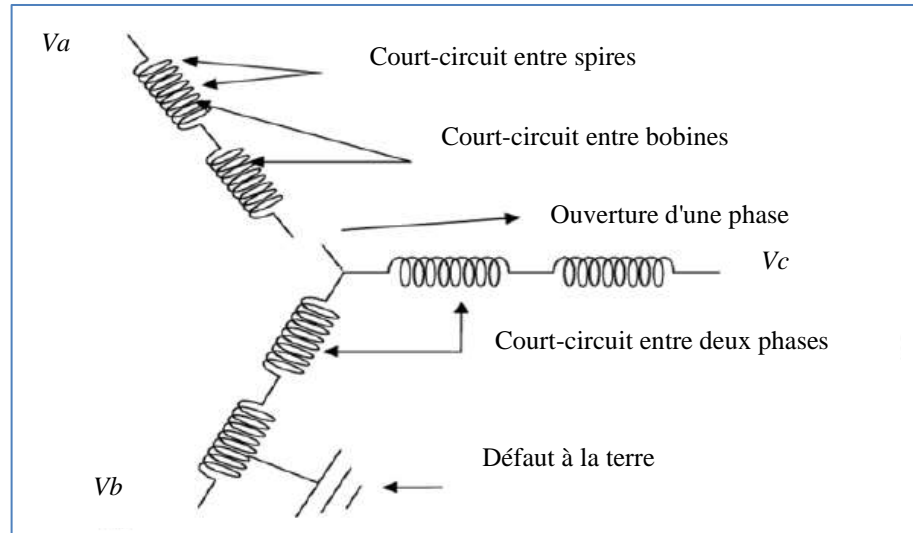
## I.2. Défaillances de la machine asynchrone

Dans cette sections nous allons présentes les différentes défauts des machines asynchrones, à savoir les défauts statoriques, rotoriques et mécaniques.

### I.2.1. Défaillances au stator

les défaillances principales au stator d'une machine asynchrone sont (voir la figure I.1) [3].

- Thermique dues à une surcharge, une variation de tension ou de déséquilibre, une mauvaise ventilation, une haute température ambiante;
- Electrique dues à une tension supérieure à la valeur nominale diélectrique à l'ouverture ou la fermeture des interrupteurs du convertisseur statique;
- Mécanique dues aux les démarrages répétitifs de machine, aux efforts mécaniques sur les tôles et les conducteurs;
- Environnementaux dues à la présence d'humidité ou de produits chimiques dans l'air ambiant.



**Figure (I.1)** Différents défauts statoriques

### I.2.1.1. Défauts d'isolant dans un enroulement

La dégradation des isolants dans les enroulements peut provoquer des courts circuits. En effet, les différentes pertes (Joule, fer, mécanique,...) engendrent des phénomènes thermiques se traduisant par une augmentation de la température des différents constituants du moteur. Or les matériaux d'isolation ont une limite de température, de tension, et de mécanique [4].

### I.2.1.2. Court-circuit entre spires

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

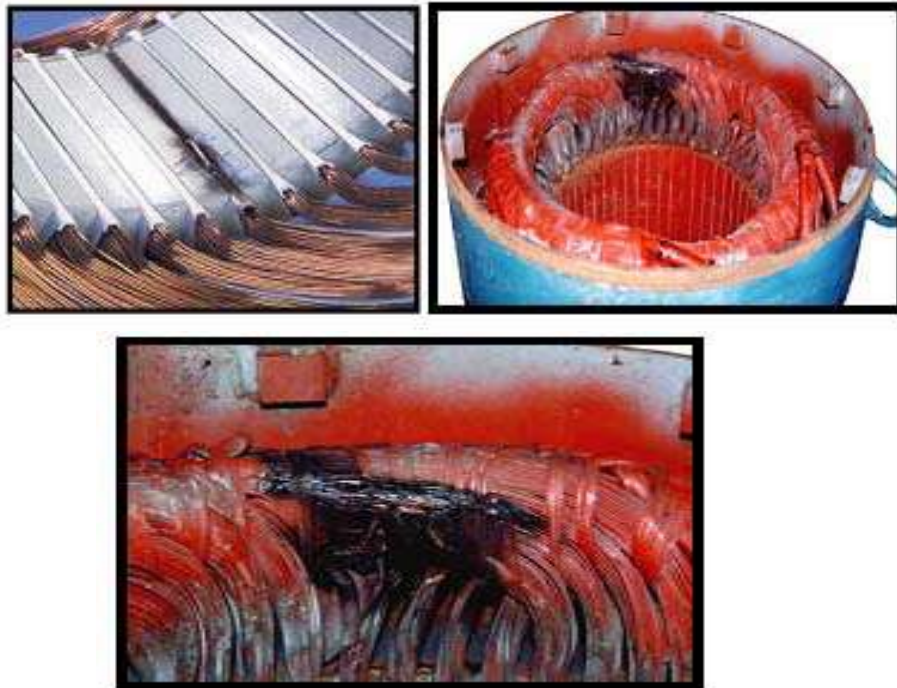
### I.2.1.3. Court-circuit entre phases

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

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

Dans ce cas 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 des phases [5].

La figure suivante représente quelques exemples des défauts de court-circuit statorique



**Figure (I.2)** Exemple des défauts de court-circuit statoriques

### **I.2.1. Défaillance au rotor**

Les défauts qui sont les plus récurrents et que sont localisés au niveau du rotor à cage sont:  
La rupture de barres et la rupture d'une portion des anneaux de court-circuit.

#### **I.2.1.1. Ruptures des barres**

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 soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau rotorique. ce défauts entraine des modifications dans les courants et conduit ainsi à l'apparition d'harmoniques caractéristiques dans le spectre de ce signal.

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 apparaissent aux fréquences [6]:

$$f_{bt} = (1 \pm 2kg) f_s \quad (I.1)$$

Où :

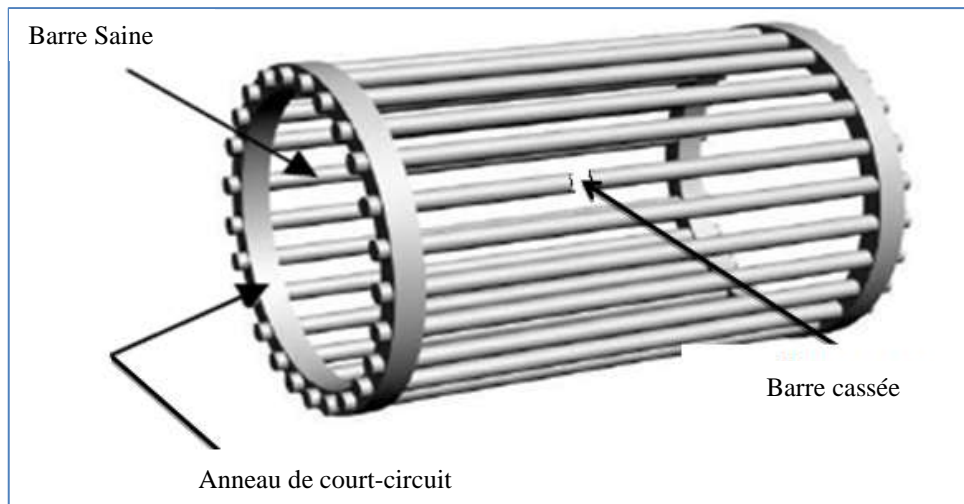
$f_{bt}$  est la fréquence des harmoniques du courant d'une phase statorique à cause d'une cassure de barre ;

$f_s$  est la fréquence du courant fondamental ;

$g$  est le glissement ;

$k = 1, 2, \dots$

De plus, les amplitudes des raies apparaissant dans les bandes latérales du fondamental augmentent avec le nombre de barres défectueuses [6].



**Figure (I.3)** Rupture d'une barre de la cage rotorique

### I.2.1.2. Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit est un défaut qui apparaît aussi fréquemment que la cassure de barres. Ces ruptures sont dues soit à des bulles de coulées ou aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. Comme il est difficile de le détecter, 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 [7].

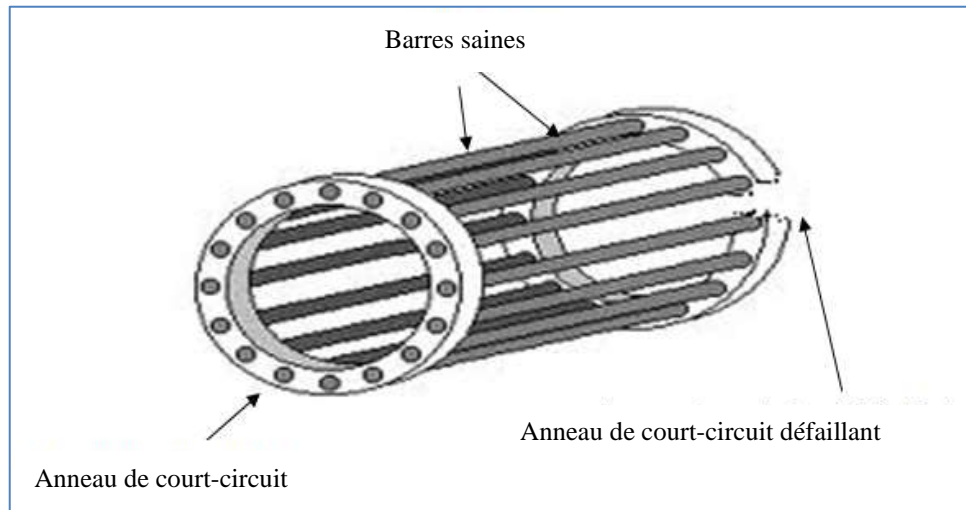


Figure (I.4) Ruptures d'anneaux

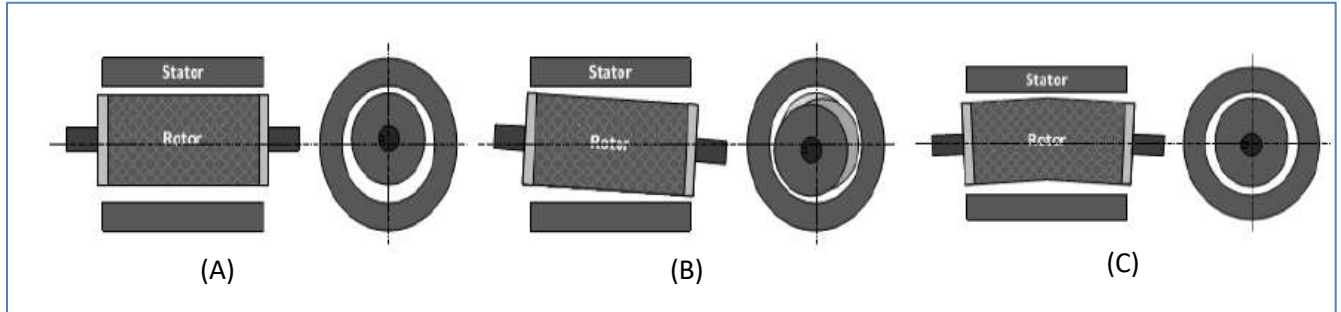
### I.2.3. Défaillances mécaniques

Les défaillances d'ordre mécanique sont, en général, les plus souvent rencontrées parmi tous les défauts de la machine asynchrone (de forte puissance). Dans ce qui suit, nous allons décrire des différents types de ces défauts.

#### I.2.3.1. Défaut d'excentricité

La géométrie du rotor peut présenter des dissymétries qui sont naturelles celles-ci relèvent de trois catégories qui sont pour l'essentiel :

- a) **L'excentricité statique** : Dans ce cas le centre de rotation du rotor n'est pas celui du centre géométrique du stator.
- b) **L'excentricité dynamique** : Elle est caractérisée par un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator mais, de plus le centre de rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator.
- c) **L'excentricité mixte** : C'est une combinaison des deux cas présentés ci-avant.



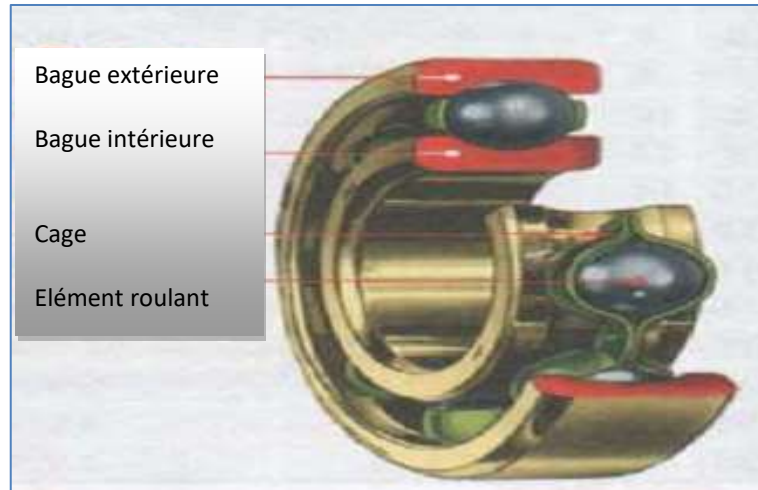
**Figure (I.5)** Défaits de l'excentricité

### I.2.3.2. Défaits de roulements

Un roulement mécanique permet le positionnement, la transmission des efforts et la rotation entre deux pièces par le remplacement du glissement par un roulement. Ce composant mécanique optimise le frottement et la précision de la liaison cinématique.

Les roulements jouent le rôle d'interface mécanique entre le stator et le rotor. En outre, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine permettant d'assurer une bonne rotation du rotor. Un roulement se présente sous la forme de deux bagues coaxiales entre lesquelles sont placés des éléments roulants, légèrement lubrifiés, et maintenus espacés par une cage (voir la figure (I.6)).

Nous pouvons distinguer les types de défauts suivants au niveau de roulements [8] [9] : Défaut de bague extérieure, défaut de bague intérieure et défaut de billes.



**Figure (I.6)** Constitution d'un roulement à billes

### I.2.3.3. Défaillance de l'arbre

L'arbre de la machine peut laisser paraître une fissure due à l'utilisation d'un mauvais matériau lors de sa construction. A court ou 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 micros fissures et conduire à une destruction complète de la machine. Une excentricité statique, dynamique ou mixte peut induire des efforts considérables sur l'arbre moteur, amenant ainsi une fatigue supplémentaire. Une analyse vibratoire, ou fréquentielle des courants absorbés ou encore simplement une analyse visuelle de l'arbre de la machine tout simplement permet de détecter ce type de défaillance.

### I.2.3.4. Défauts du flasque

Les défauts créés par les flasques de la machine asynchrone sont généralement causés à l'étape de fabrication. En effet, un mauvais positionnement des flasques provoque un désalignement. Il est possible de détecter ce type de défaillance par une analyse vibratoire où analyse harmonique des courants absorbés par la machine.

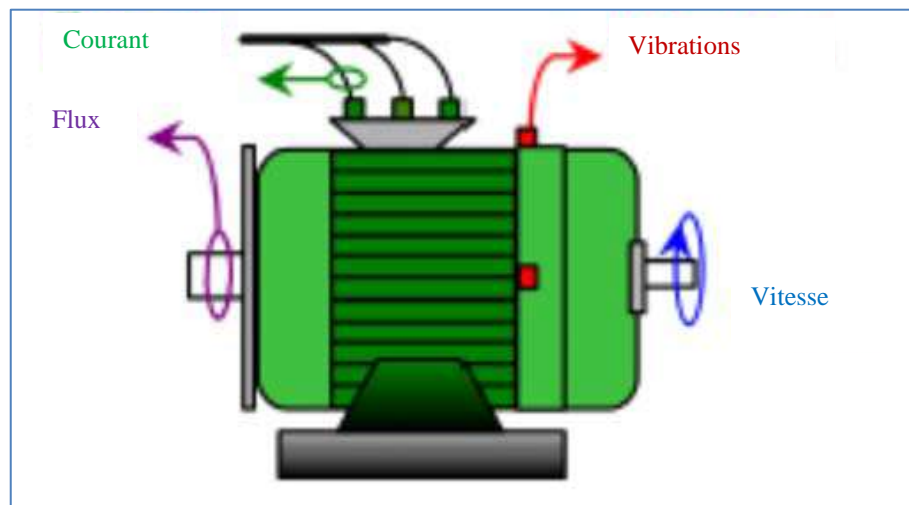
### I.3. Conséquences des défauts

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

- Effet oscillatoire au niveau du couple et de la vitesse ;
- Appel supplémentaire de courant ;
- Déséquilibre au niveau de la tension et de courant de ligne ;
- Augmentation des arrêts non programmés, des pertes de production et par conséquent diminution du rendement global.

### I.4. Différente méthodes de diagnostic des défauts dans la machine asynchrone

Les moteurs asynchrones sont soumis pendant leur fonctionnement à plusieurs contraintes de différentes natures. Par conséquent, l'accumulation de ces contraintes provoque des défauts dans les différentes parties du moteur. Et pour remédier au problème de détection des défauts, il existe une variété de techniques de diagnostic et de détection des défauts. Certaines d'entre elles sont basées sur l'observation et la mesure (mesure de champ magnétique, mesure de bruit), et d'autres sont basées sur la surveillance et la comparaison des caractéristiques électromécaniques du moteur en défaut (courant statorique, couple et vitesse) [10].



**Figure (I.7)** Différentes grandeurs de diagnostic dans une machine

Dans ce qui suit, nous allons présenter ces différentes méthodes de diagnostic.

### **I.4.1. Diagnostic à partir des méthodes internes**

On distingue deux types du diagnostic basée sur des mesures internes: le diagnostic par mesure de la température et le diagnostic par la mesure de vibrations.

#### **I.4.1.1. Diagnostic par mesure de la température**

Les températures des supports sont surveillées sur des bases de routine, et fournissent des informations utiles. Un volume de liquide refroidissant, débouché sur des températures, est aussi précieux pour l'indication des problèmes de refroidissement et pour le contrôle lorsqu'il est proposé de faire opérer la machine au-delà de sa puissance. Les températures des bobines sont aussi impératives pour la détermination de la limite pour laquelle le moteur peut être chargé et pour l'estimation de la durée de vie rémanente de l'isolation des enroulements.

Ces températures sont rarement mesurées à cause des problèmes de l'isolation électrique entre les capteurs et les conducteurs de haute tension, bien que les détecteurs de température soient parfois intercalés dans l'isolant renfermé sur le point surchauffé du conducteur, mais cela affaiblit l'intégrité de l'isolant. Il demeure donc une nécessité pour le capteur de fortes températures qui peut être monté sur les enroulements ou inséré dans l'isolant électriquement de rester isolé par rapport à son instrument de mesure [10].

#### **I.4.1.2. Diagnostic par mesure des vibrations**

Le diagnostic vibratoire est une méthode très ancienne et très utilisée pour la détection des défauts dans les machines électriques. Toutes les machines électriques produisent du bruit et des vibrations. Leur analyse peut être employée pour fournir des informations sur l'état de la machine. Plus souvent, les mesures sont faites comme une procédure non fréquente ou lorsqu'un problème est suspecté. Ces mesures sont faites en utilisant des accéléromètres ou des capteurs de vitesse à boulons. Des sondes de déphasage sont aussi employées pour le contrôle du mouvement de l'arbre. Le désalignement entre les centres des supports donnant naissance à un entrefer non uniforme produit la vibration à une fréquence double, tandis que le déséquilibre mécanique engendre la vibration à la vitesse angulaire, du moment que les deux dépendent de la réponse mécanique à cette fréquence. Les signaux de vibrations détectés contiennent des informations essentielles sur l'état de la machine. L'analyse spectrale de ces signaux nous renseigne sur les différents défauts qui sont à l'origine de ces vibrations [10].

### **I.4.2. Diagnostic chimique**

Plusieurs moteurs sont refroidis par l'air ou à l'aide d'un circuit fermé avec un échangeur de chaleur hydro réfrigéré. La dégradation de l'isolation électrique dans le moteur produit le gaz d'oxyde de carbone qui apparaît dans le circuit de l'air refroidissant et qui peut être détecté par une technique d'absorption infrarouge. L'air est tiré du moteur à travers le tube vers le détecteur infrarouge par une pompe auxiliaire. Seuls les moteurs en service sont échantillonnés et la forme de l'air de chaque moteur est analysée pendant deux minutes.

L'huile de roulement est aussi analysée régulièrement, et l'intervention est requise si les produits indiquant la dégradation sont présents [11]. A ce stade, on peut conclure que la plupart des techniques précitées exigent l'emploi des capteurs, qui doivent être placés au niveau de la machine. C'est pour cette raison, elles ne peuvent être utilisées que pour les machines de grande puissance. Ces techniques sont basées généralement sur l'utilisation des grandeurs mécaniques, afin que les ingénieurs mécaniciens puissent faire leur interprétation malgré que les machines soient des moteurs électriques.

La présence des ingénieurs électriciens est nécessaire pour intervenir dans la partie électrique et pour cette raison, les techniques de diagnostic sont de plus en plus orientées vers l'emploi des grandeurs électriques vu leur accessibilité et la simplicité du capteur utilisé [10].

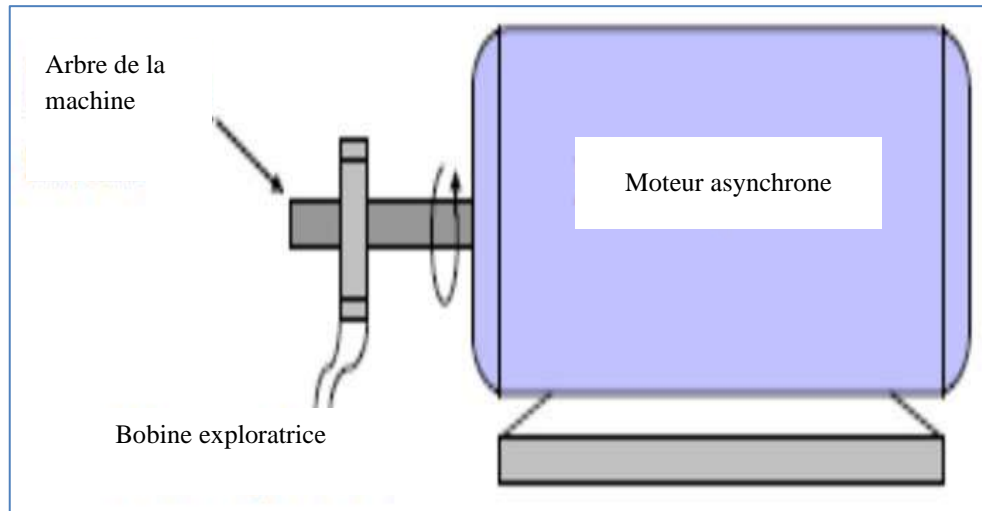
### **I.4.3. Techniques de diagnostic magnétique et électrique**

Dans cette section nous allons nous intéresser aux techniques de diagnostic magnétique et électrique. Ces méthodes basées sur la mesure du flux magnétique axial de fuites et des courants statorique sont décrites ci-après.

#### **I.4.3.1. Diagnostic par la mesure du flux magnétique axial de fuites**

Le flux de fuites axial peut être détecté par une bobine (bobine exploratrice) enroulée autour de l'arbre de la machine, et aussi par n'importe quel arrangement symétrique simple des bobines placées à l'extrémité de l'arbre de la machine ou par d'autres dispositifs sensibles tels que les sondes à effet hall. Lorsque la bobine est enroulée autour de l'arbre d'une machine électrique, elle est le siège d'une force électromotrice induite qui est liée aux flux de fuites axiaux. Les flux de fuites sont présents dans toutes les machines électriques en raison des asymétries dans les circuits électriques et magnétiques qui sont dues aux fluctuations du réseau électrique et les tolérances pendant le processus de fabrication.

L'analyse spectrale de la tension induite peut être utilisée pour identifier les différentes asymétries et défauts. Le contenu harmonique des flux de fuites axiaux du stator et du rotor est en relation directe avec les harmoniques contenus respectivement dans les courants du stator et du rotor. La conséquence directe d'un défaut est l'augmentation du flux de fuite axial. Cette augmentation du flux est la condition nécessaire pour l'utilisation du flux de fuite axial comme une technique de diagnostic, c'est-à-dire ce dernier doit avoir une valeur importante [10].

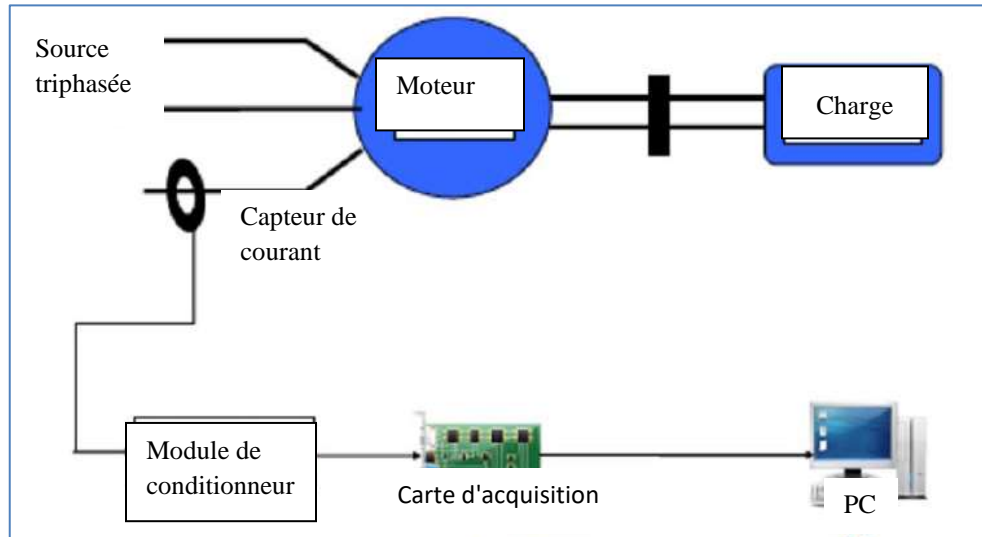


**Figure (I.8)** Bobine exploratrice pour la mesure du flux axial de fuites

#### I.4.3.2. Diagnostic par l'analyse des courants statoriques

Cette méthode est un outil puissant pour détecter la présence des défauts mécaniques et électriques. Elle présente plusieurs avantages par rapport aux autres méthodes, parce qu'elle ne demande ni l'introduction d'un capteur au niveau de la machine ni l'utilisation d'un équipement coûteux et encombrant mais seulement un capteur de courant (sonde à effet de hall ou transformateur de courant) qui donne une image du courant de phase statorique. Celle-ci est une méthode de surveillance, qui consiste à utiliser le spectre du courant statorique. Sachant que dans un spectre de courant d'un moteur sans défaut apparaît uniquement la composante du fondamental, pour une répartition sinusoïdale de la force électromotrice ( $f_{em}$ ). Dans le cas d'une répartition non sinusoïdale de la  $f_{em}$  en plus du fondamental apparaît des harmoniques d'encoche rotorique. Pour montrer le principe de cette méthode, on considère le cas d'une asymétrie rotorique d'un moteur asynchrone. L'existence de ce défaut engendre un courant dans le rotor qui produit une  $f_{em}$  pulsatoire dont la fréquence d'ondulation est ( $g f_s$ ). Cette  $f_{em}$  produit dans l'enroulement statorique une harmonique à

deux composantes, la première ayant la fréquence  $(1-2g)f_s$  et la deuxième ayant la fréquence  $(1+2g)f_s$  [10].



**Figure (I.9)** Schéma synoptique du principe de la méthode du spectre du courant statorique

## I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée. Après la présentation des différents défauts qui peuvent apparaître dans la machine asynchrone, nous avons ensuite essayé de présenter un aperçu sur les méthodes et les techniques utilisées pour le diagnostic des machines asynchrones à cage.

# *Chapitre II*

## *Présentation et Caractérisation de la Machine Asynchrone Etudiée*

## II.1. Introduction

La machine asynchrone, malgré ses bonnes qualités, peut présenter des défauts structurels, parmi lesquels les défauts rotoriques qui peuvent être une rupture totale ou partielle de barres rotoriques ou une rupture d'une portion d'anneau de court-circuit. Tout d'abord, nous allons porter notre attention dans ce chapitre sur le comportement de la machine en absence de défaut.

Dans ce chapitre, pour ce faire nous allons utiliser le logiciel *RMxpert ANSYS- Maxwell*, pour étudier les performances d'une machine asynchrone à cage d'écureuil 30kW. Nous allons nous intéresser à la présentation et caractérisation de cette machine étudiée.

## II.2. Présentation de *RMxpert* et du moteur étudié

*RMxpert (Rotating Machine Expert)* est un outil de conception des différentes machines électriques de la suite *ANSYS –Maxwell*, qu'on peut utiliser pour le design de machines personnalisé afin de répondre à un cahier de charge bien déterminé. En utilisant la théorie analytique classique des machines électriques basée sur des circuits électromagnétiques équivalents, il peut calculer les performances de la machine, prendre des décisions de dimensionnement et effectuer de nombreuses analyses. De plus, cet outil est en mesure de configurer automatiquement un projet *Maxwell* complet (2D /3D) comprenant la géométrie, les matériaux et les conditions limites. Ceci peut comprendre les symétries, les excitations appropriées, la topologie du circuit de couplage pour une éventuelle analyse électromagnétique transitoire [12].

### II.2.1. Applications de *RMxpert*

L' *RMxpert* permet l'analyse et la simulation de divers types de machines électriques :

- Moteur à induction triphasé
- Moteur à induction monophasé
- Machine synchrone triphasée
- 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 à démarrage en ligne
- Moteur universel

- Machine à courant continu
- Machine synchrone à griffes
- Machine synchrone triphasée à pôles lisses
- Machines rotatives génériques, ...etc.

### II.2.2. Avantages de RMxpert

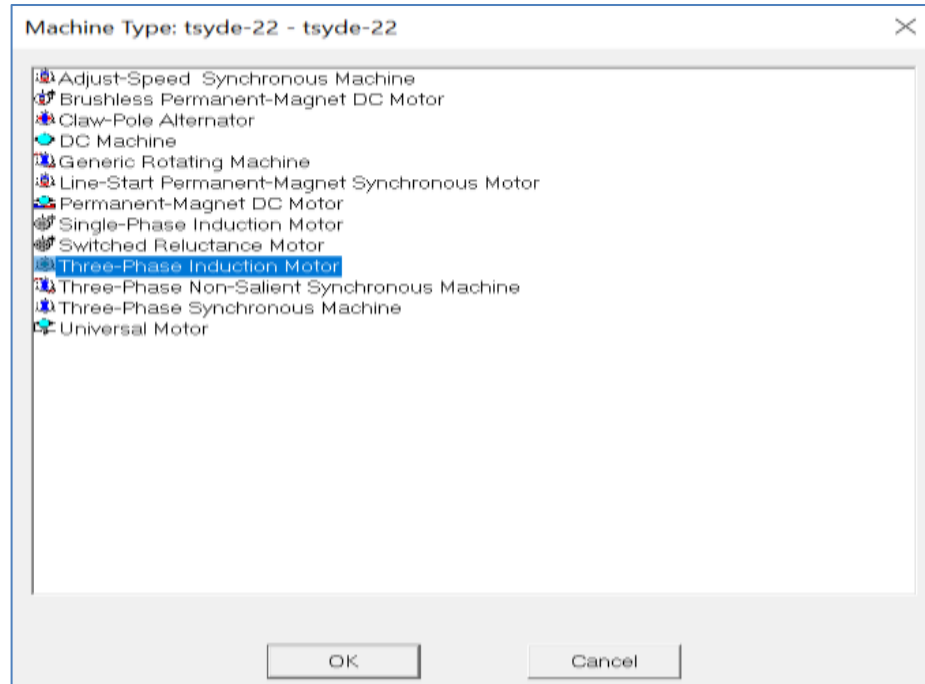
Cet outil de conception et de caractérisation des machines électriques est caractérisé par :

- Calcul analytique rapide des performances de la machine ;
- 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.

### II.2.3. Création d'une nouvelle conception RMxpert

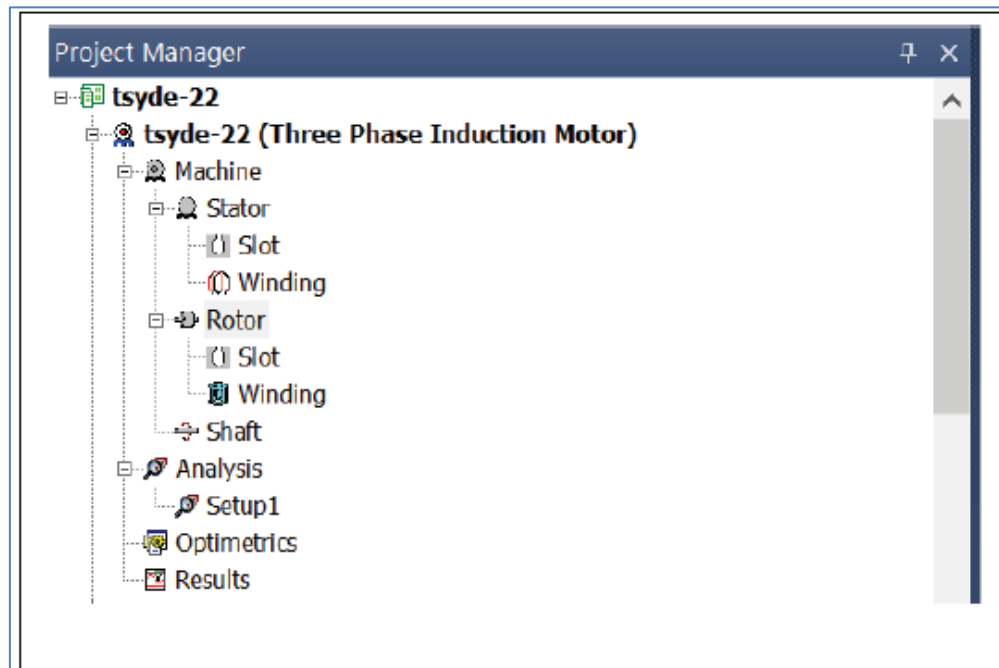
Voici les étapes à suivre pour créer une nouvelle conception de machine électrique sous RMxpert :

1. Cliquer sur '*Fichier > Nouveau*', un nouveau, projet est répertorié dans l'arborescence du projet. Il est nommé par défaut '*Project*'.
2. Ou bien cliquer sur '*Projet > Insérer une conception RMxpert*' ou cliquer sur l'icône '*RMxpert*' dans la barre d'outils. Ainsi, la fenêtre '*Sélectionner un type de machine*' apparaît. On choisit alors la machine '*Three phase Induction motor*', que nous intéressent dans ce travail.



**Figure (II.1)** Interface de sélection du type de machines dans *RMxpert*

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



**Figure (II.2)** Fenêtre d'un projet de *RMxpert*

## 1. Machine

- Stator
  - ✓ Enroulement
  - ✓ Encoche
- Rotor
  - ✓ Enroulement
  - ✓ Encoche
  - ✓ Arbre

## 2. Analyse

- Configuration

## 3. Optométrie

## 4. Résultats

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

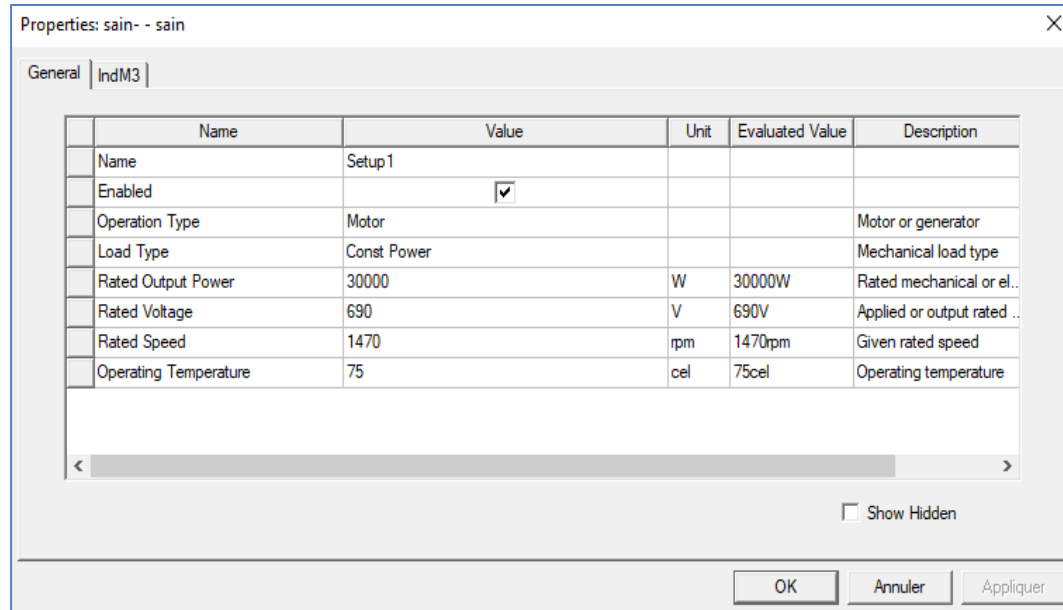
#### II.2.4. Paramètres nominaux de la machine

Dans ce travail, nous avons choisi un moteur asynchrone à cage d'écureuil 30kW [13]. Ce moteur asynchrone est caractérisé par les grandeurs nominales présentées dans le tableau suivant :

**Tableau II.1** Paramètres nominaux de la machine étudiée

Nom	Valeur	Unité
Puissance	30000	W
Tension	690	V
vitesse	1470	tr/mn
Fréquence	50	Hz
Température de fonctionnement	75	°C

Ses paramètres sont introduits dans le projet *RMxpert* comme l'illustre la figure (II.3).



**Figure (II.3)** Fenêtre des grandeurs nominales de la machine dans *RMxpert*

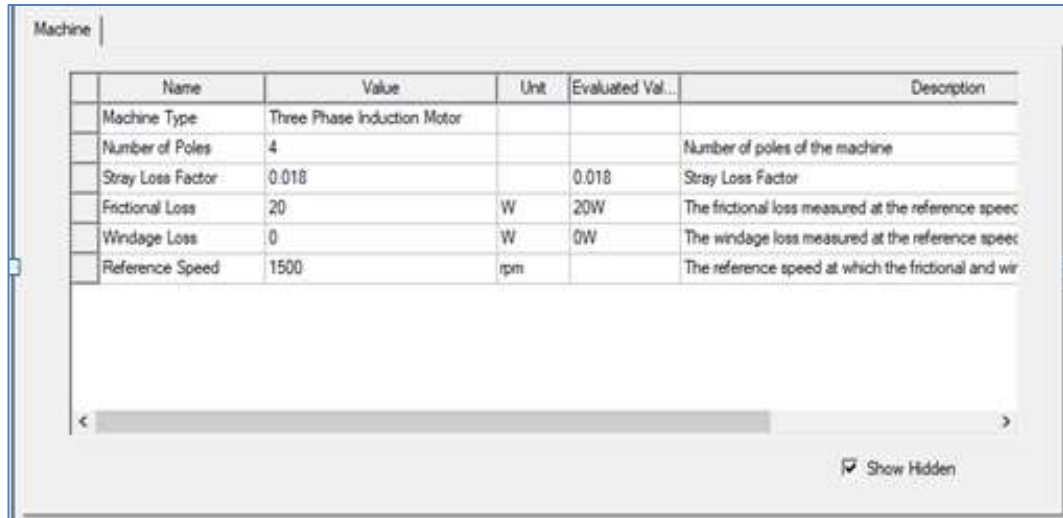
### II.2.5. Différents paramètres du moteur étudié sous *RMxpert*

Les paramètres du moteur étudié sont récapitulés dans le tableau suivant :

**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 (mécanique)	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.4)** Fenêtres de quelques paramètres du moteur étudié par *RMxpert*

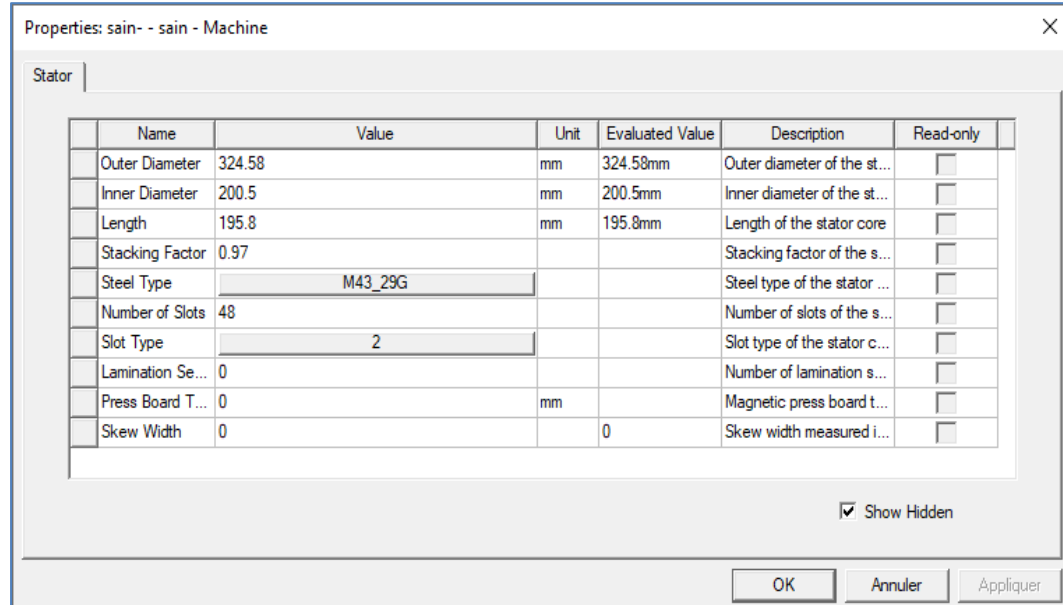
### II.2.6. Fenêtre du stator

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 généraux du stator 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 de l'encoche	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 *RMxpert* qui permet de saisir ces paramètres du stator :



**Figure (II.5)** Fenêtre des paramètres du stator dans *RMxpert*

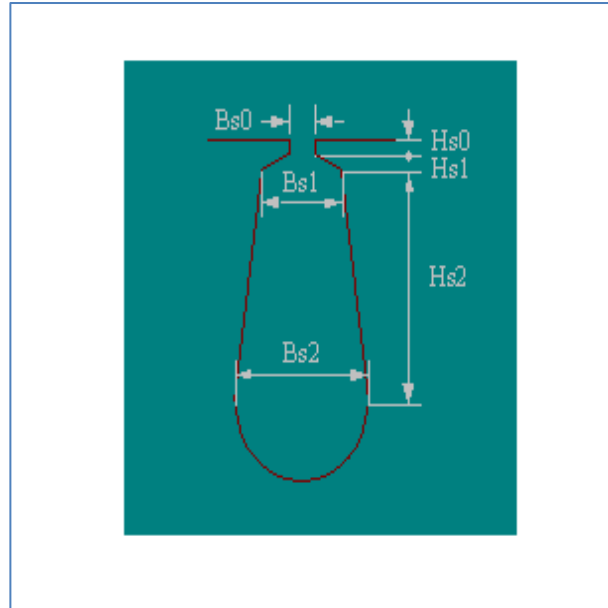
### II.2.7. Choix du type d'encoches du stator

Les paramètres des encoches statoriques sont donnés dans le tableau ci- après :

**Tableau II.4** Paramètres généraux 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 représente le type d'encoches du stator qu'on a choisi dans ce travail.



**Figure (II.6)** Modèle choisi pour l'encoche de stator

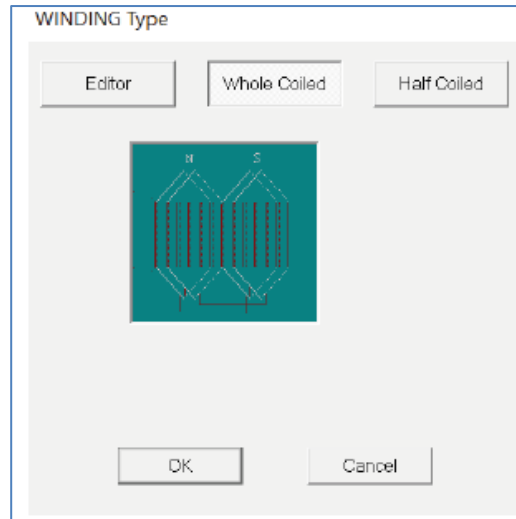
### II.2.8. Fenêtre des propriétés de l'enroulement du stator

Le tableau ci-dessus résume les paramètres généraux de l'enroulement statorique.

**Tableau II.5** Paramètres généraux 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	épaisseur 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 :



**Figure (II.7)** Fenêtres des propriétés de l'enroulement du stator

### II.2.9. 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.

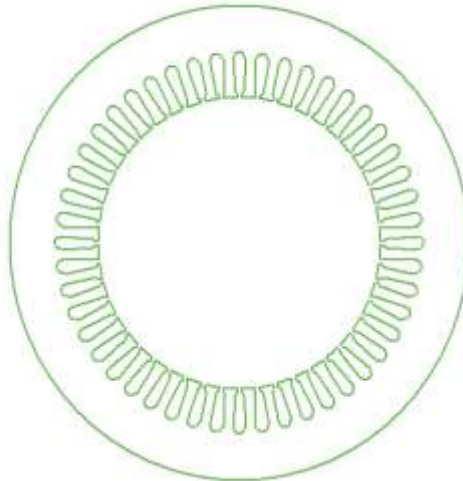
La figure suivante montre comment nous avons paramétré la partie frontale du bobinage statorique et l'isolation de l'encoche.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description	Read-only
Input Half-tum ...	<input type="checkbox"/>			Input half Tum Length	<input type="checkbox"/>
End Extension	0	mm	0mm	One-side end extended...	<input type="checkbox"/>
Base Inner Ra...	0	mm		Inner radius of the base...	<input type="checkbox"/>
Tip Inner Diam...	0	mm		Inner diameter of the c...	<input type="checkbox"/>
End Clearance	0	mm		End clearance betwee...	<input type="checkbox"/>
Slot Liner	0.3	mm		Insulation: slot liner thic...	<input type="checkbox"/>
Wedge Thickn...	0	mm		Insulation: wedge thick...	<input type="checkbox"/>
Layer Insulation	0	mm		Insulation: layer insulati...	<input type="checkbox"/>
Limited Fill Fac...	0.75			Limited slot fill factor for...	<input type="checkbox"/>

Show Hidden

**Figure (II.8)** Partie frontale du bobinage et isolation de l'encoche

A ce niveau, on aura bien défini la géométrie du stator du moteur étudié comme illustre la figure suivante :



**Figure (II.9)** Géométrie du stator du moteur étudié

### II.2.10. Fenêtre du rotor

Les propriétés générales du rotor (tels 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.6** Paramètres généraux 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	M41-29G	-
Skew Width	Inclinaison des encoches	1	-

### II.2.11. Fenêtre de paramétrage des encoches du rotor

*RMxpert* prend en charge plusieurs types de modèles d'encoches rotoriques. Nous avons choisi celle représentée dans la figure (II.10). 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

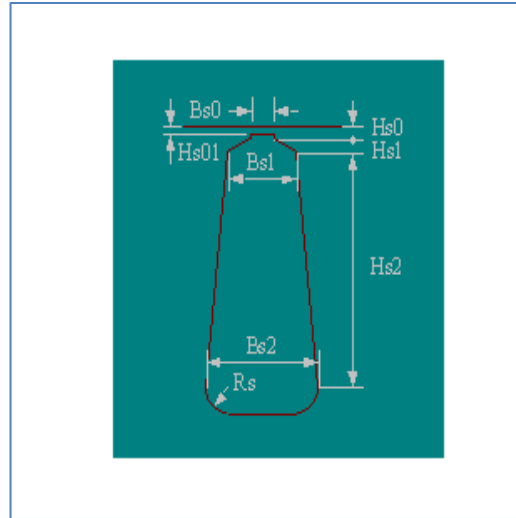


Figure (II.10) Type d'encoches choisi au rotor

### II.2.12. Fenêtre de paramétrage de l'enroulement du rotor

On double-clique sur l'icône '*Machine- Rotor-Enroulement*' du projet *RMxpert* pour définir les propriétés du bobinage du rotor et ensuite on doit définir :

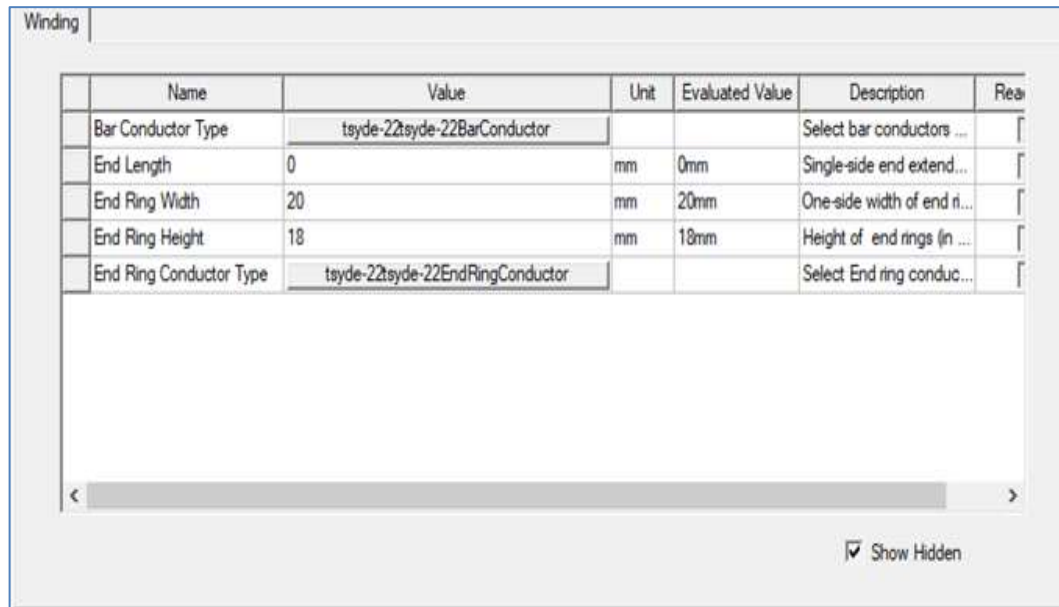
- le type de matériau des barres conductrices de la cage,
- et les paramètres des anneaux de court-circuit.

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

Tableau II.8 Paramètres généraux des barres du rotor

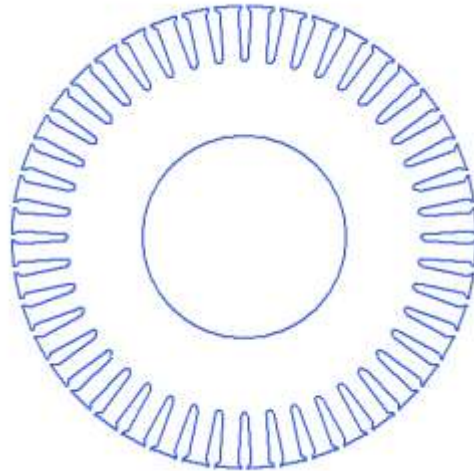
Nom		Valeur	Unité
Bar Conductor Type	Matériau des barres	Tsyde-22	-
End Length	Longueur de l'extrémité de la barre	0	mm
End Ring Width	Largeur de l'extrémité de l'anneau	20	mm
End Ring Height	Hauteur de l'extrémité de l'anneau	18	mm
End Ring Conductor Type	Matériau de l'anneau	Tsyde-22	-

Ces paramètres sont introduits en utilisant la fenêtre suivante de *RMxpert* :



**Figure (II.11)** 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.12)** Géométrie du rotor du moteur étudié

### II.3. Caractérisation du moteur étudié par *RMxpert*

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 :

**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	31.22	A
Résistance du stator	0.261	Ohm
Puissance utile	29226.5	W
$\cos \varphi$	0.85	-
Rendement	90.46	-
Couple utile	194.884	Nm
Pertes totales	3070.740	W

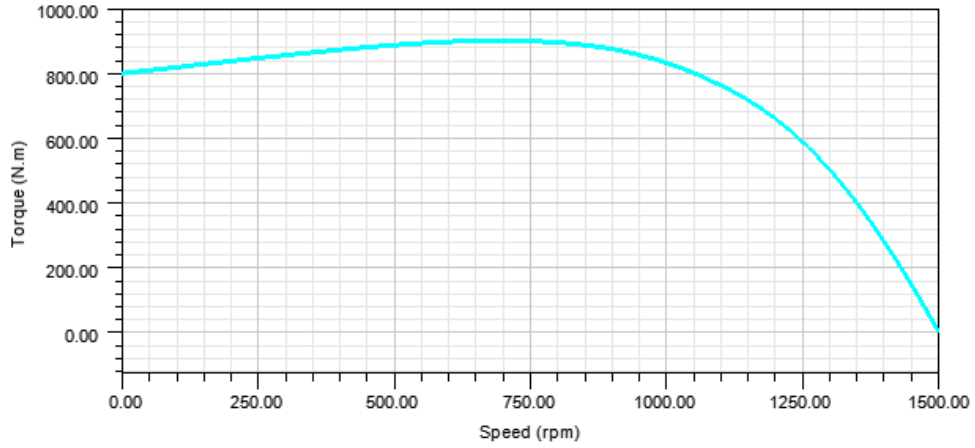
#### II.4. Quelques caractéristiques statiques du moteur étudié

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.13).

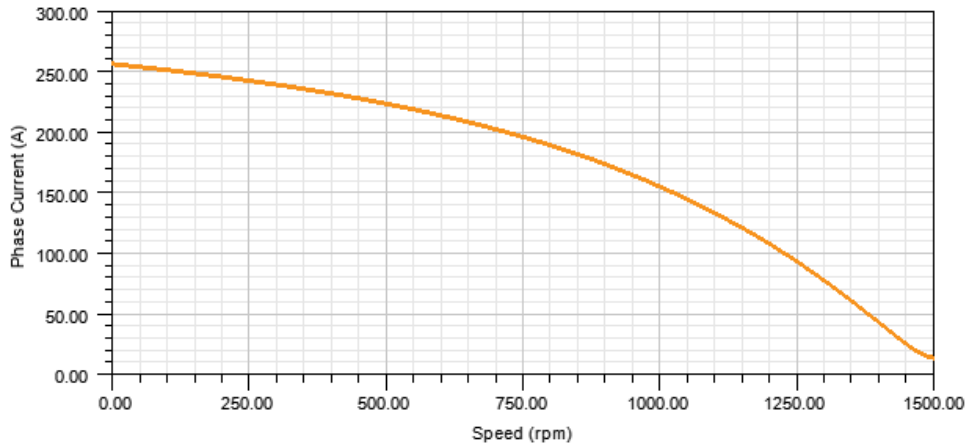
On note d’après ces figures que lorsque la vitesse augmente le couple augmente, passe par une valeur maximale qu’on appelle couple critique puis décroît en passant par le couple nominal jusqu’à une valeur nulle à la vitesse de synchronisme (fonctionnement à vide).

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.

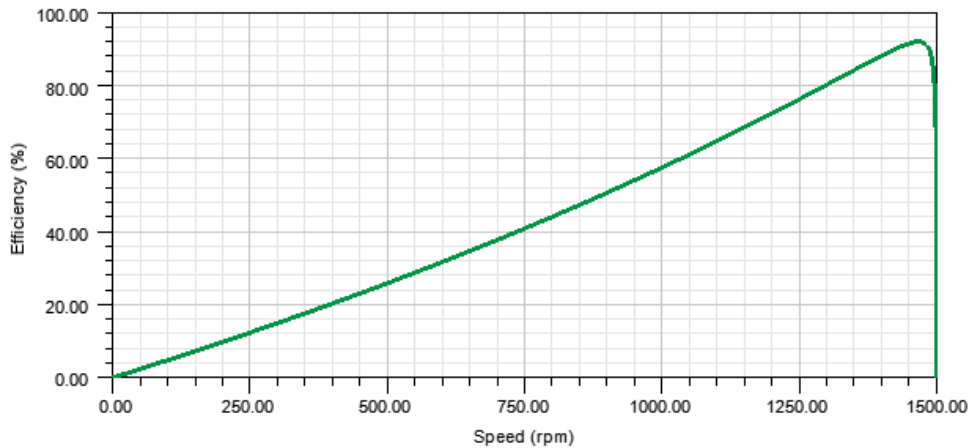
Nous constatons aussi que le rendement maximal de cette machine asynchrone à cage est de 90.64. Il correspond au rendement nominal. Ce rendement diminue progressivement en déchargeant la machine.



a) Couple électromagnétique



b) Courant de phase statorique



c) Rendement

**Figure (II.13)** Quelques caractéristiques statiques du moteur étudié

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une présentation de *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 sûre du contenu spectrale 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 2D, 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.

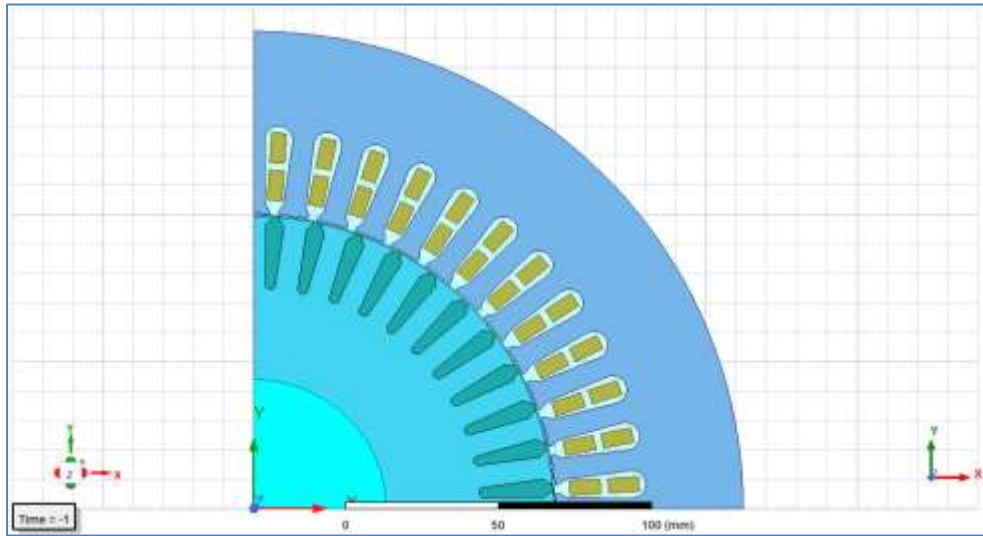
Grâce aux solveurs des champs électromagnétiques avancés de Maxwell 2D reliés aux outils de simulation de circuits intégrés et de systèmes, on peut évaluer comprendre les performances des systèmes électromécaniques bien avant de fabriquer le prototype physique.

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

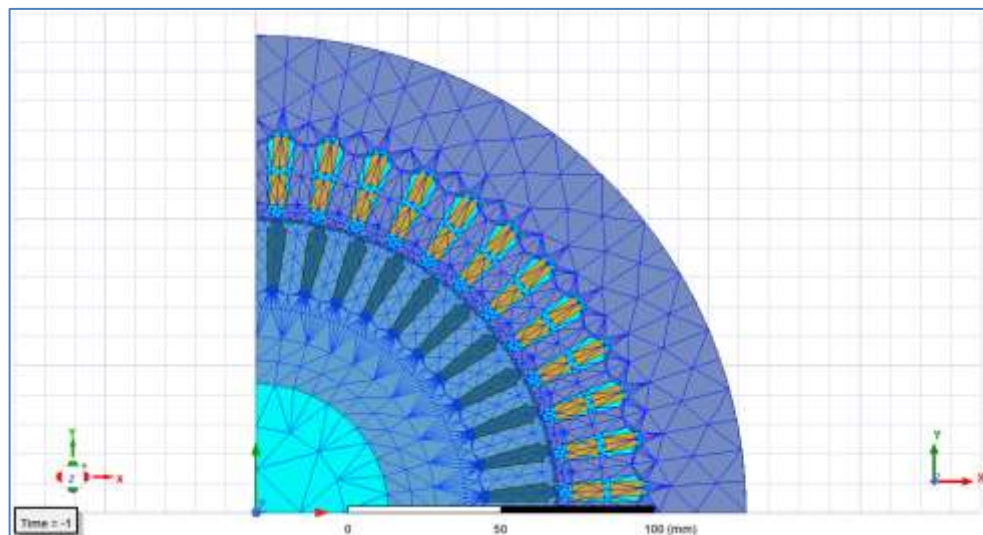
Tout d'abord, nous avons créé un modèle du moteur étudié sous *Maxwell 2D* à partir du projet *RMxpert* pour l'étude et l'évaluation des performances de ce moteur fonctionnement en mode sain. Pour ce faire, il suffit de cliquer sur : *RMxpert* \ *Analogsis setup* \ *Create Maxwell design*.

La figure 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 de maillage de la géométrie réduite du moteur étudié (voir la 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 <sup>2</sup>
Coefficient des frottements	0.0409407	N.m.s/rd
Couple de charge	0	N.m

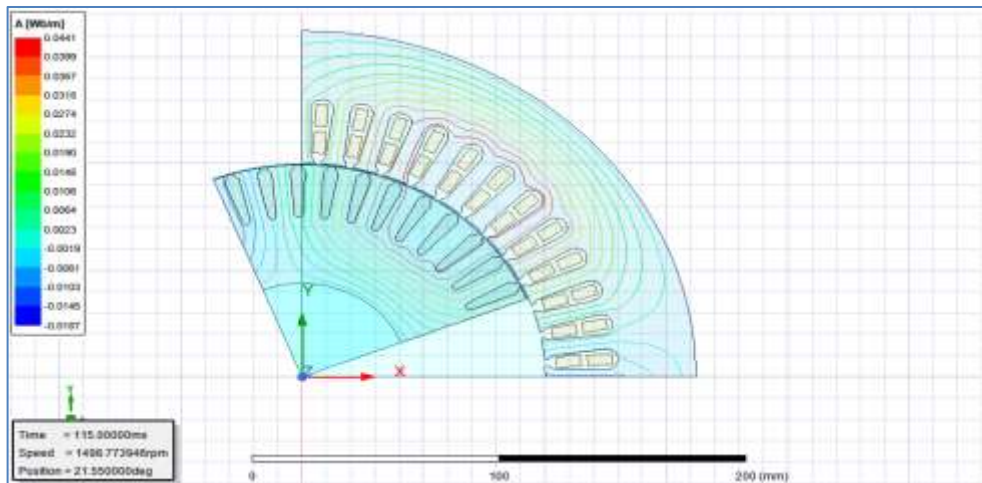
Après lancement de l'analyse, nous aurons la possibilité de visualiser la carte de distribution du champ ou de l'induction magnétique sur la géométrie analysée avec une échelle des équivalues en termes de couleurs.

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)).

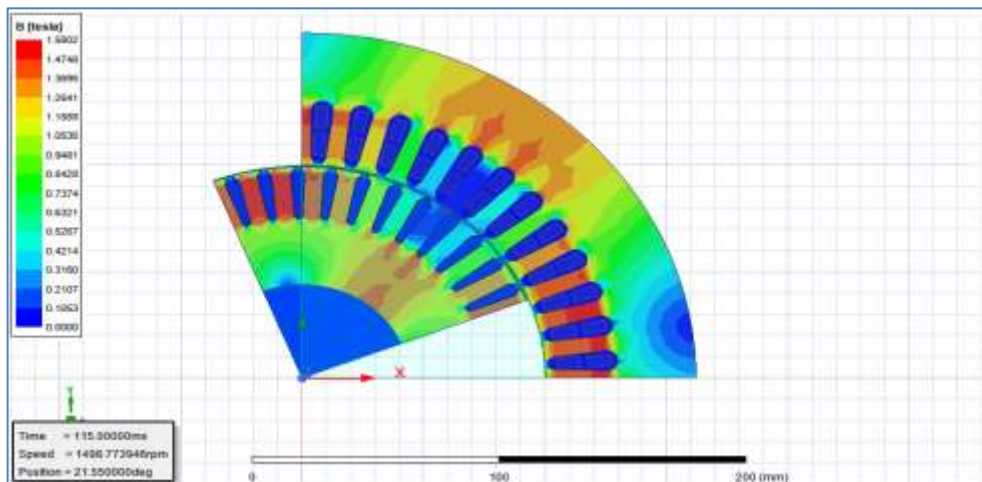
On remarque aussi qu'il n'y a pas de lignes de flux au niveau des encoches statoriques, des barres rotoriques et de l'arbre.

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

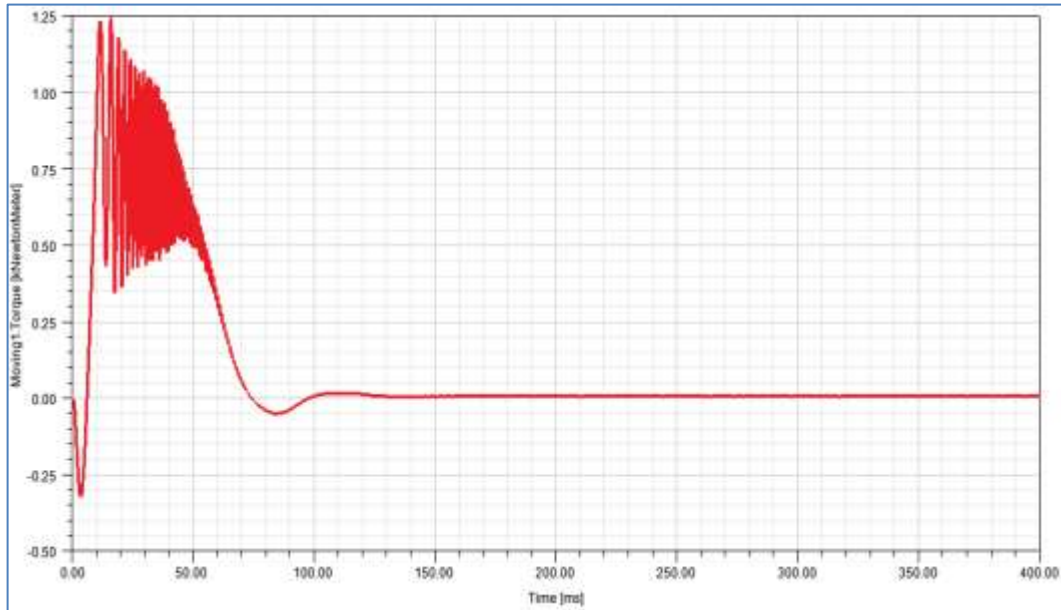


b) Induction magnétique

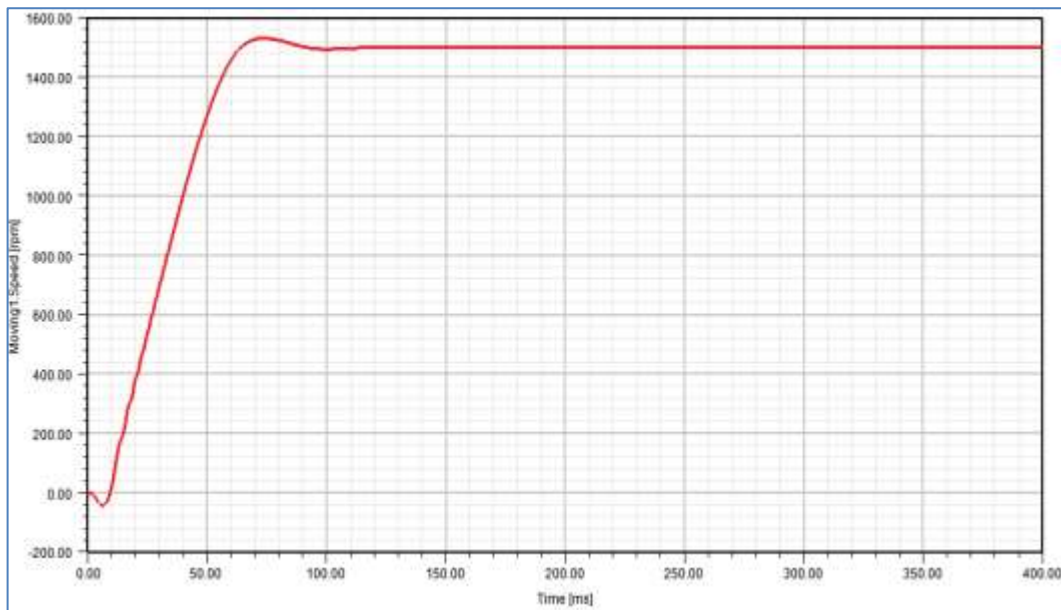
**Figure (III.3)** Répartition des champs magnétiques sur une géométrie 2D du moteur étudié à vide

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.

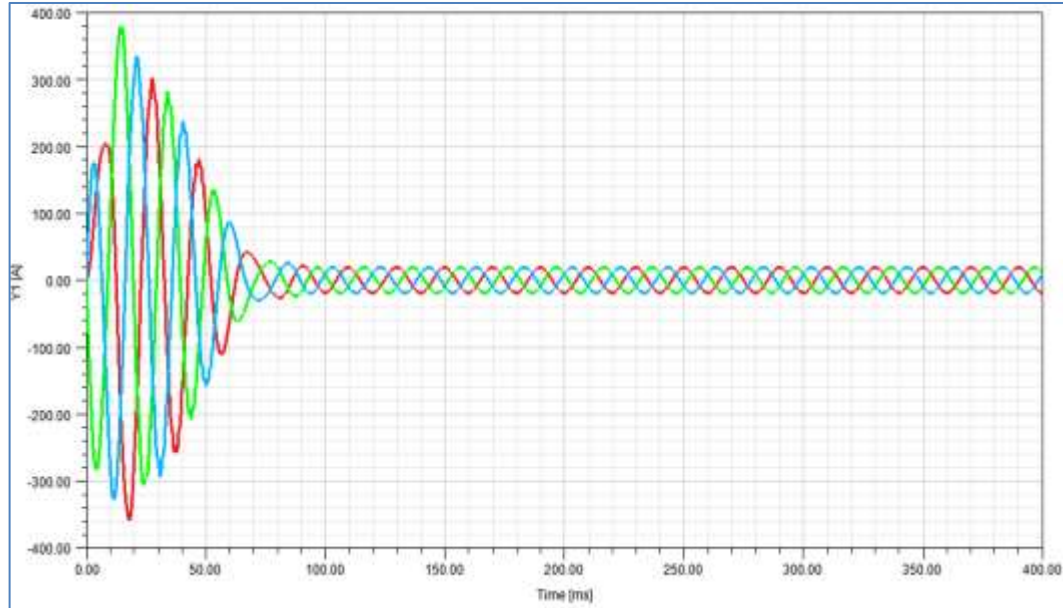
Par ailleurs, la figure (III.4) représente quelques caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage à vide.



a) Couple utile électromagnétique



b) Vitesse de rotation



c) Courant de phase

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

D'après la figure III.4 (a) de l'évolution du couple électromagnétique présente de très grands pics et des oscillations en régime transitoire. En régime établi, celui-ci doit vaincre le 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 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 proches des résultats trouvés par *RMxpert*.

### 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

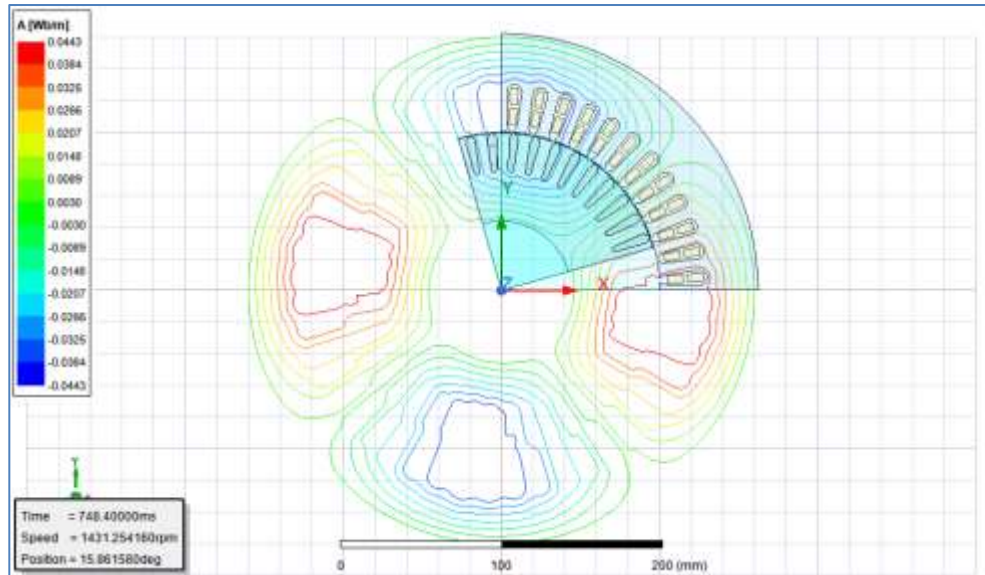
**Tableau III.2** Paramètres mécaniques du moteur étudié sous Maxwell-2D pour un démarrage en charge

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

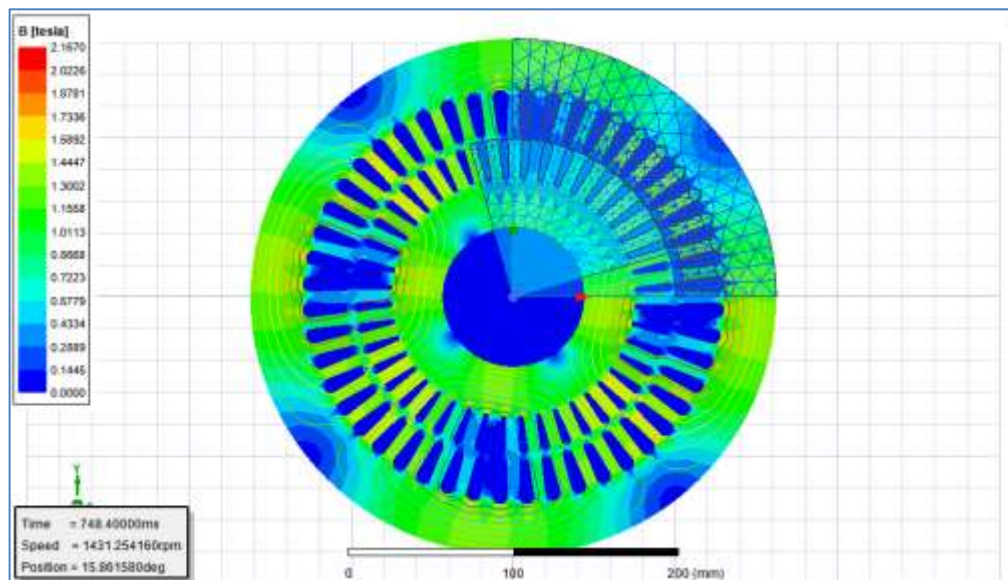
Après insertion de ces paramètres concernant le démarrage de la machine en charge, nous avons lancé la simulation du modèle 2D et nous avons obtenu les résultats que nous allons présenter et discuter dans ce qui suit.

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

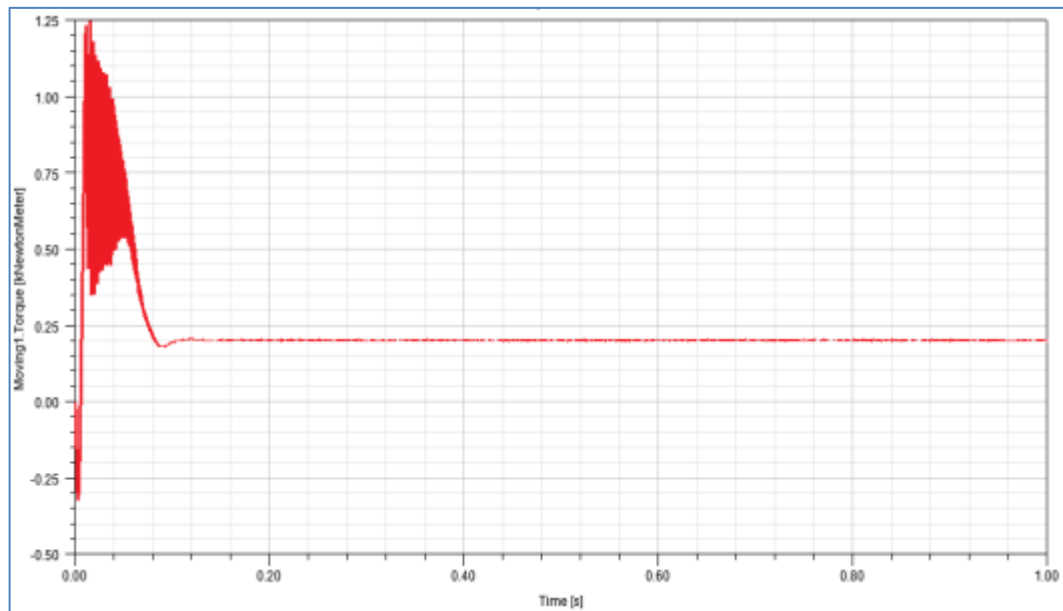
**Figure (III.5)** Répartition des champs dans une section 2D du moteur étudié en charge sous maxwell 2D

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 au 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

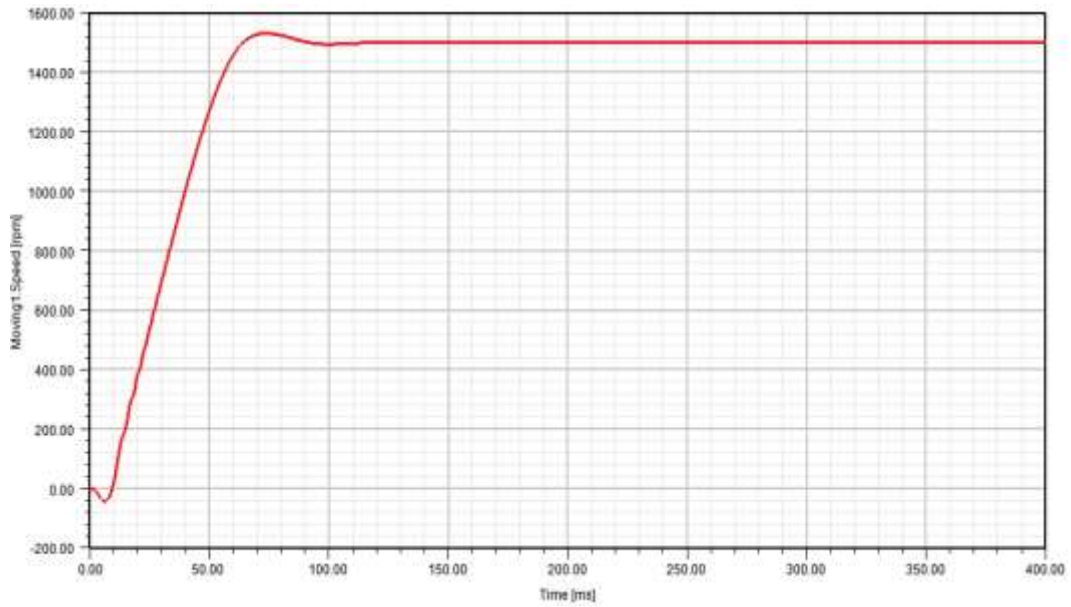
l'inertie. Au-delà de ce régime, le moteur atteint son régime permanent où le couple se stabilise et se rapproche du couple de charge aux pertes ce qui marque l'équilibre entre le couple de charge et le couple moteur.

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.

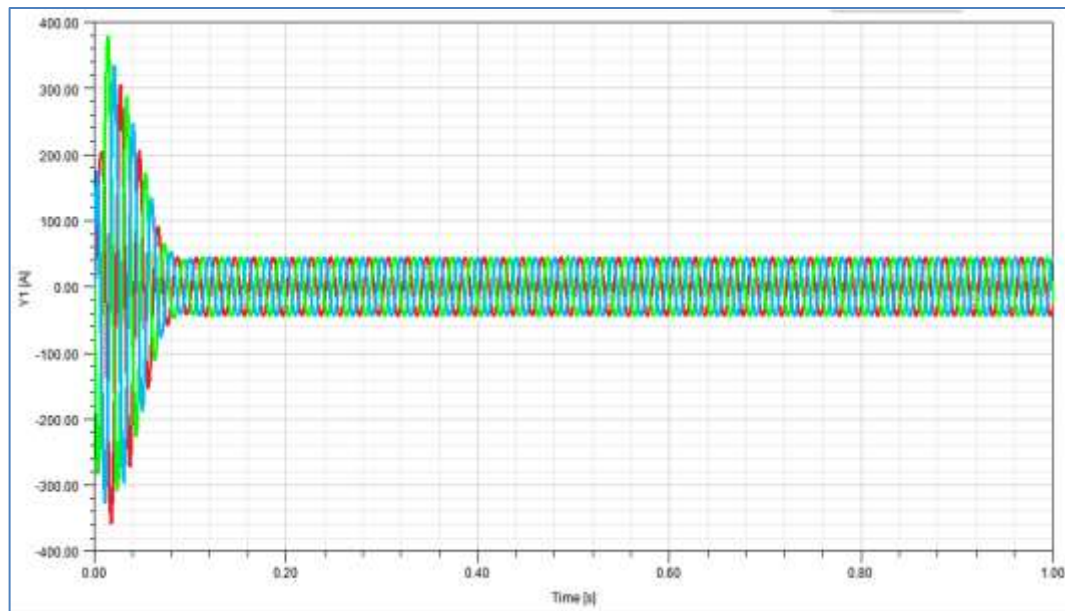
D'après cette figure III.6 (c), qui représente l'évolution des courants statoriques en fonction du temps au démarrage en charge, on note qu'aux premiers instants de démarrage, on enregistre des forts courants pour les trois phases. Ceci est dû au couple de démarrage de la machine où cette dernière fait 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 le régime permanent.



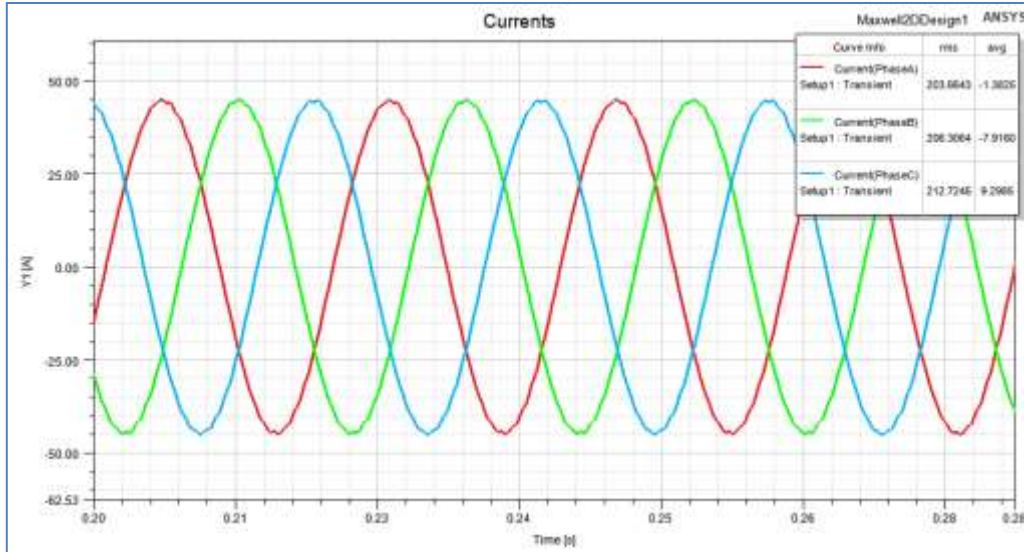
a) couple électromagnétique



b) Vitesse de rotation du temps du moteur étudié par Maxwell 2D en démarrage en charge



c) Courants statoriques en fonction du temps en charge



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

Dans ce chapitre, nous allons modéliser et simuler la machine asynchrone fonctionnant en mode de défaut rotorique sous *Maxwell-2D*. Le modèle élaboré sous *Maxwell-2D*, dans le cas d'une machine fonctionnant en mode sain n'est plus valable dans ce cas parce que celle-ci présente des déséquilibres et des asymétries en cas de défaut de cassure de barres rotoriques. Dans ce cas-là, nous sommes obligés de modéliser toute la section bidimensionnelle de la machine, et pour ce faire on doit définir les asymétries ou bien les barres cassées au niveau du rotor et redéfinir les conditions aux limites.

Les résultats de simulation obtenus seront analysés en termes de spectres du courant statorique et de vitesse rotorique. Nous allons effectuer une analyse *FFT* de ces deux grandeurs pour détecter une éventuelle cassure au niveau des barres rotoriques.

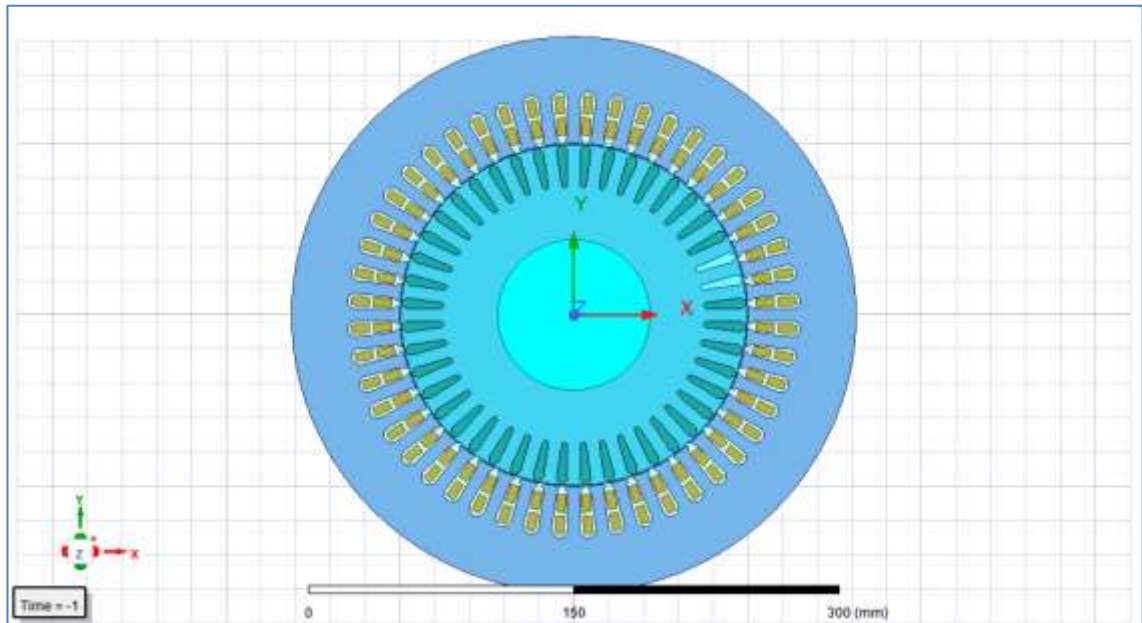
Plusieurs simulations pour différents cas de cassures de barres, ont été effectuées et les résultats obtenus sont présentés et discutés.

## IV.2. Modélisation et simulation de la machine sous *Maxwell-2D* en mode défaillant

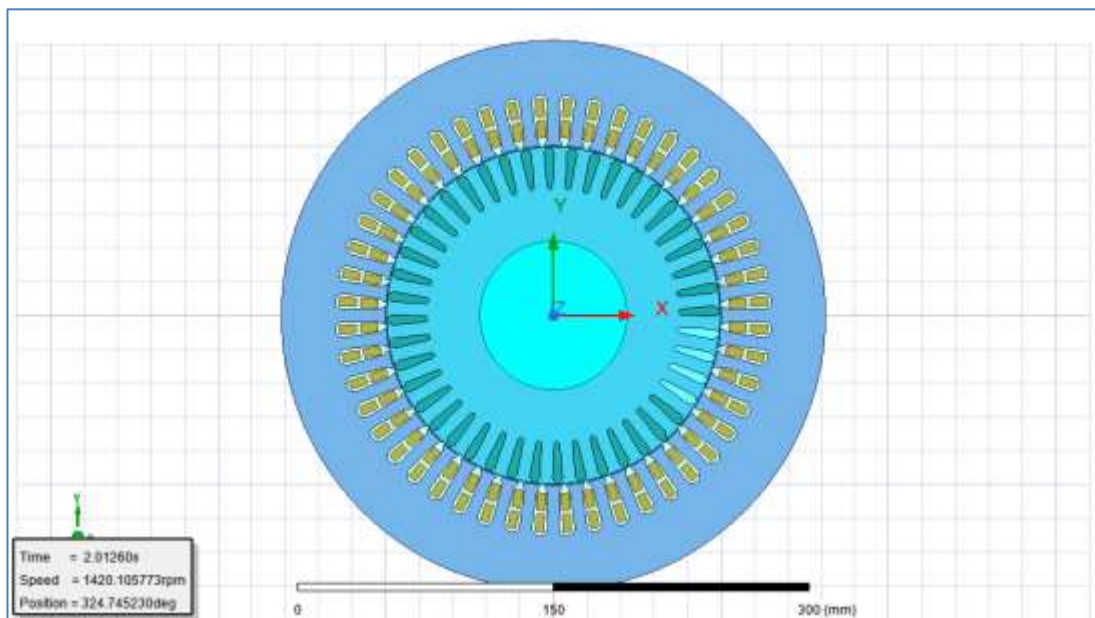
Pour modéliser des barres cassées dans *Maxwell-2D*, nous sommes obligés de modéliser toute la section bidimensionnelle de la machine, à cause des asymétries et des déséquilibres introduits par la cassure des barres du rotor. Nous devons aussi redéfinir les conditions aux limites et les excitations. Une cassure de barre peut être effectuée par deux méthodes différentes :

- La première consiste à augmenter la valeur de la résistance de la barre incriminée d'un facteur suffisant pour que le courant qui la traverse soit le plus proche possible de zéro en régime permanent.
- La seconde consiste à supprimer le conducteur associé à la barre dans le circuit électrique et la surface correspondante dans la géométrie est remplie par l'air.

Dans notre travail, nous avons utilisé cette dernière méthode qui modélise une cassure totale de la barre rotorique, voir figure IV.1.



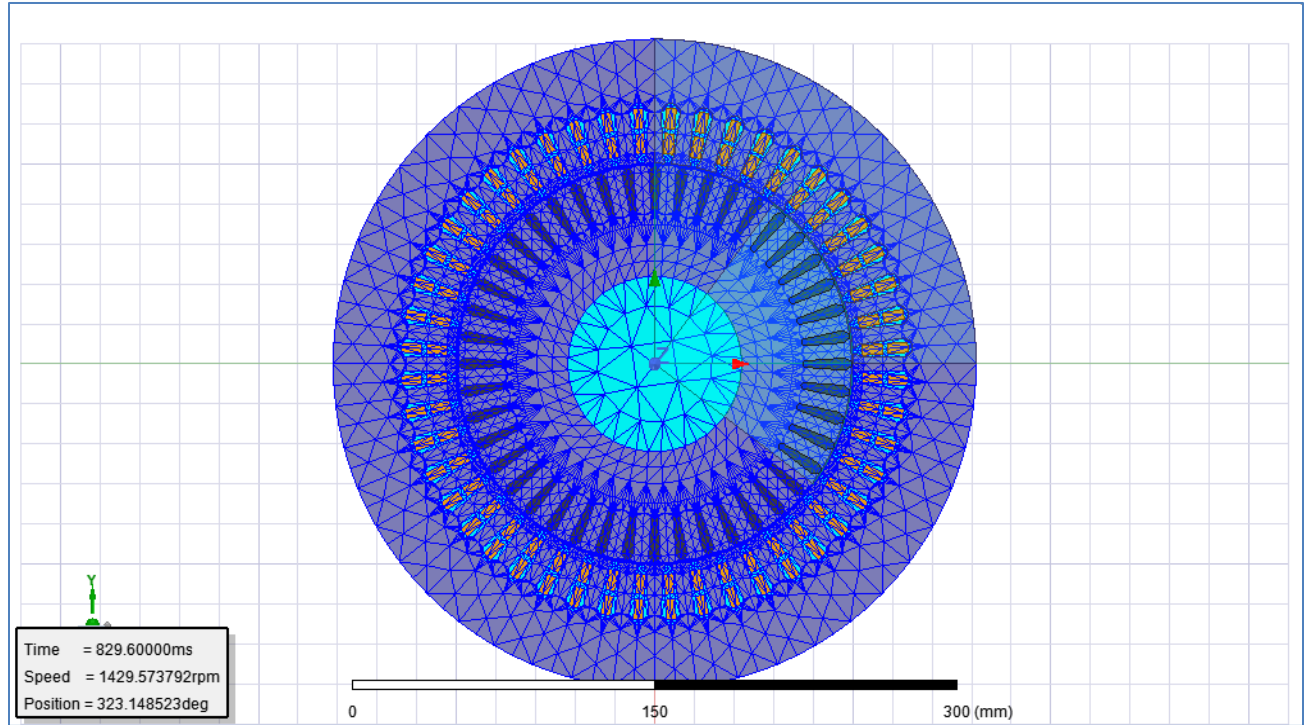
a) Cas de deux barres cassées



b) Cas de quatre barres cassées

**Figure (IV.1)** Géométrie 2D du moteur étudié en cas de défaut de cassure de barres

La technique de maillage adaptatif et automatique de *Maxwell-2D* a été utilisée pour le maillage de cette section de la machine étudiée (voir figure IV.2).



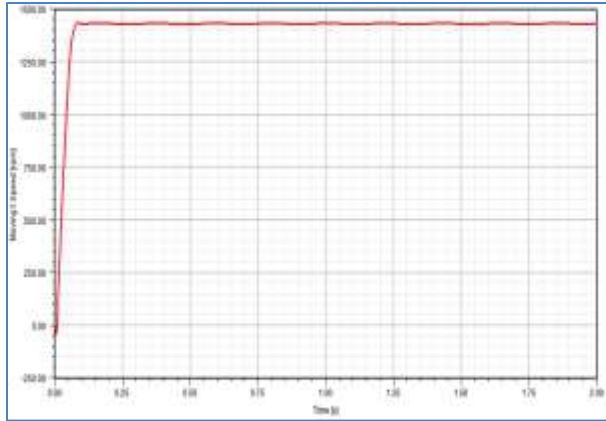
**Figure (IV.2)** Maillage de la section 2D du moteur étudié

### IV.3. Effet de cassure des barres sur les performances de la machine

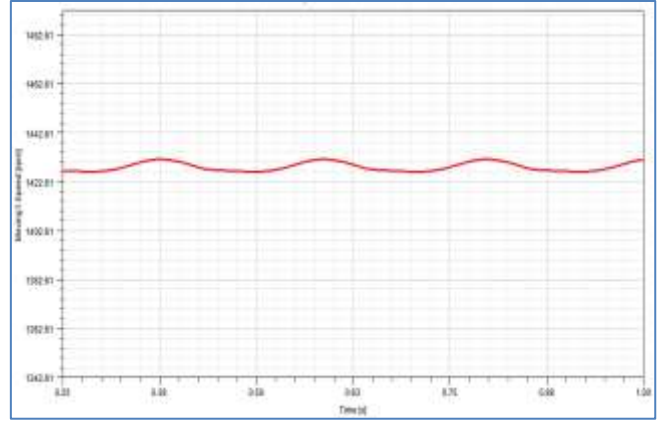
Pour montrer l'effet des barres cassées sur les caractéristiques de la machine étudiée, nous avons simulé un démarrage en pleine charge pour deux cas différents (deux barres cassées et quatre barres cassées).

La figure (IV.3) illustre les résultats de simulation obtenus, dans le cas de cassure de deux barres adjacentes.

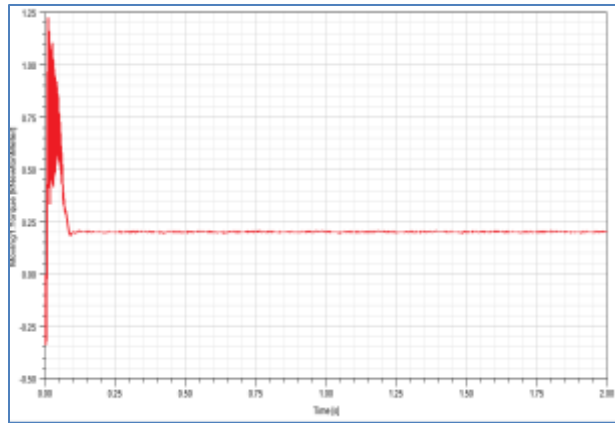
De même, la figure (IV.4) montre l'allure de la vitesse, du couple électromagnétique et du courant de phase statorique au démarrage en charge en cas de cassure de quatre barres adjacentes.



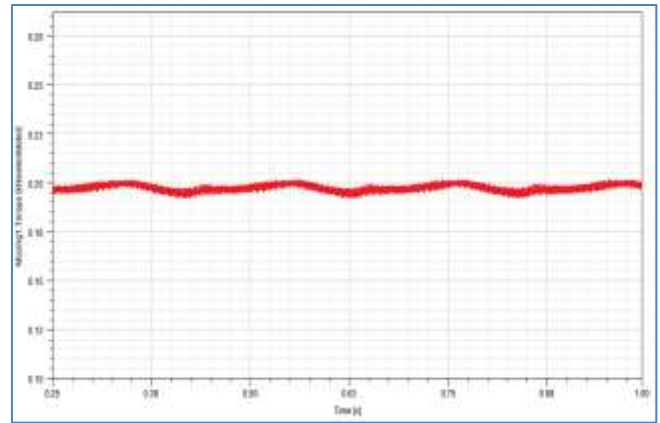
a) Vitesse de rotation



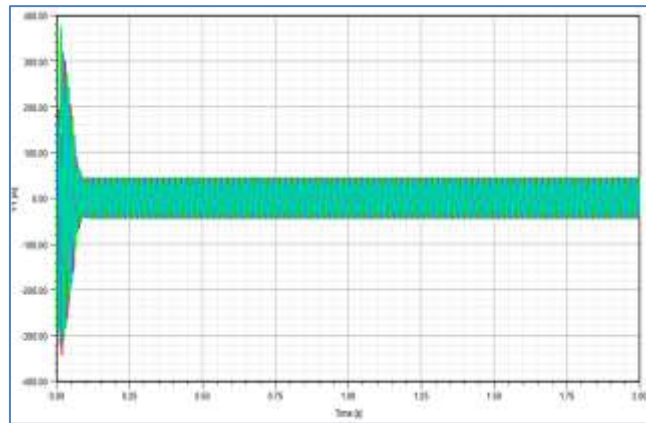
b) Zoom de la vitesse



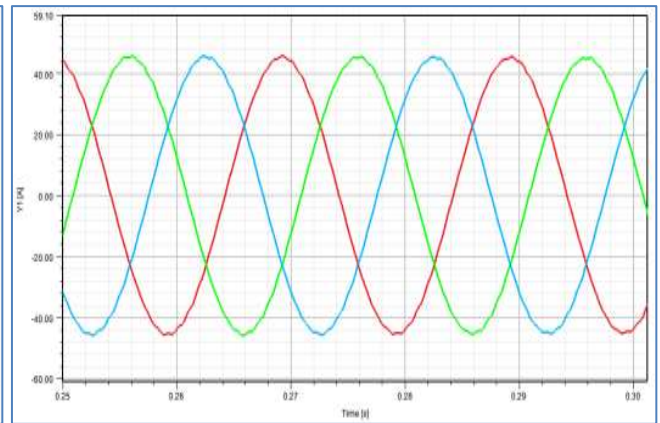
c) Couple électromagnétique



d) Zoom du couple

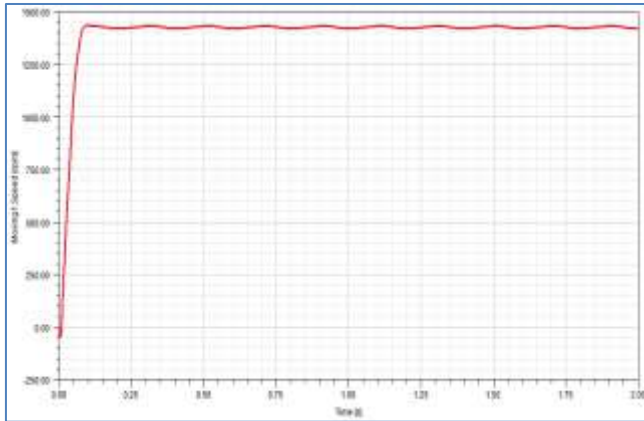


e) Courant de phase statorique

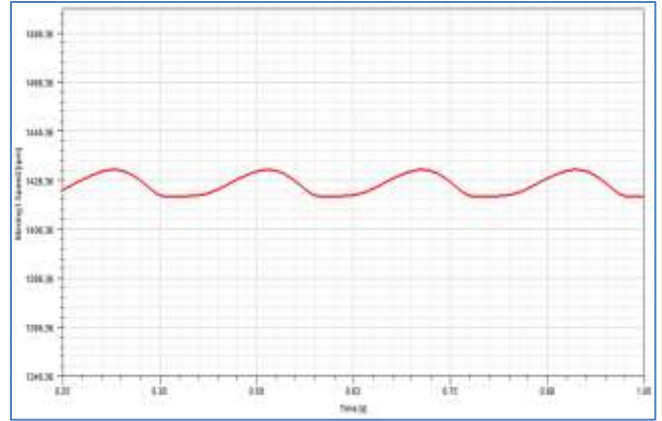


f) Zoom du courant

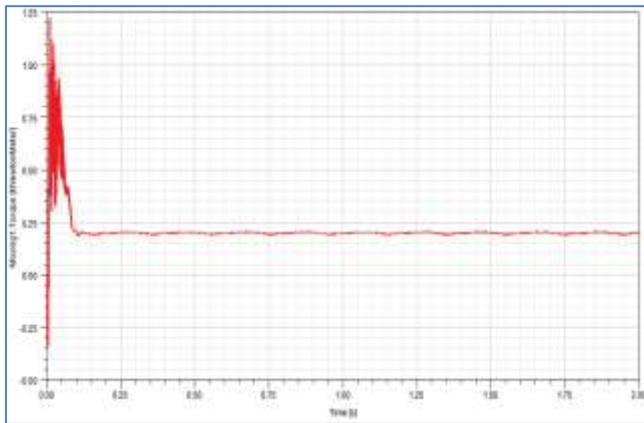
**Figure (IV.3)** Résultats de simulation du moteur étudié au démarrage en charge en cas de cassure de deux barres adjacentes



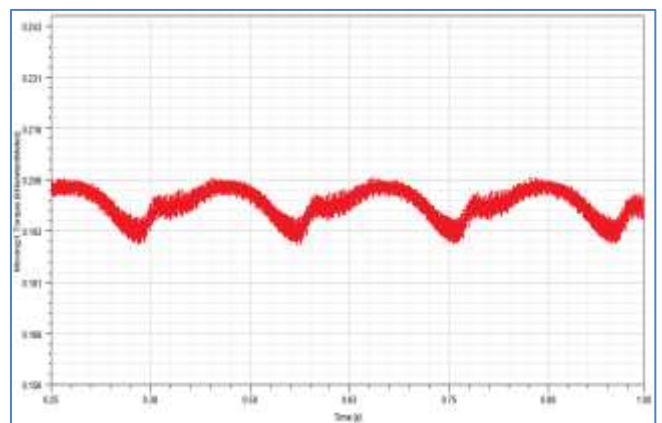
a) Vitesse de rotation



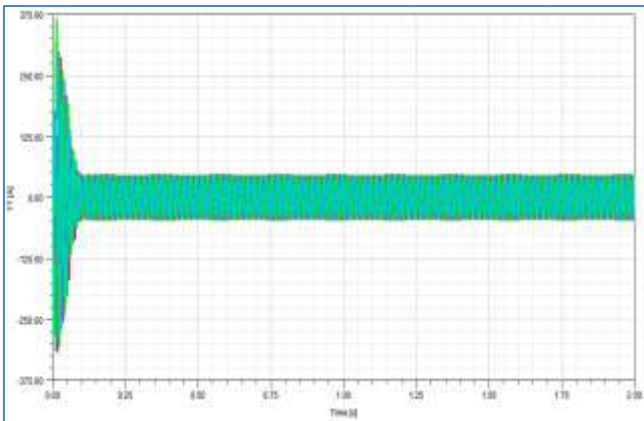
b) Zoom de la vitesse



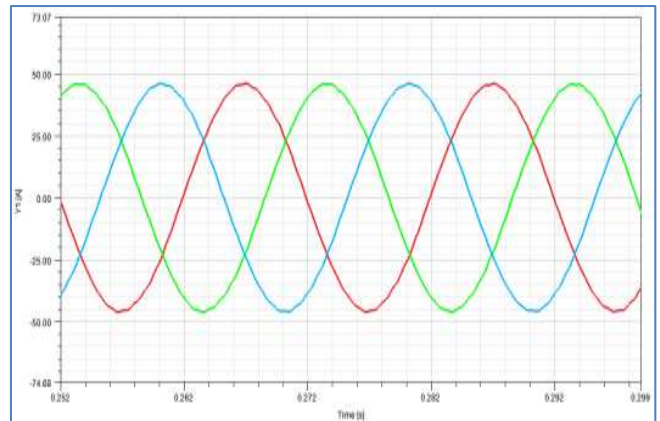
c) Couple électromagnétique



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 en cas de cassure de quatre barres adjacentes

Ces figures (IV.3) et (IV.4) montrent l'influence du nombre des barres cassées sur ces caractéristiques dynamiques du moteur étudié au démarrage en charge. Nous remarquons que le temps de démarrage augmente avec le nombre de barres rompues. Nous notons également l'augmentation de l'amplitude des ondulations dans les allures de la vitesse, du courant statorique et du couple électromagnétique avec l'augmentation du nombre des barres cassées. De plus, la cassure des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique en régime établi et provoque une chute de vitesse en régime permanent.

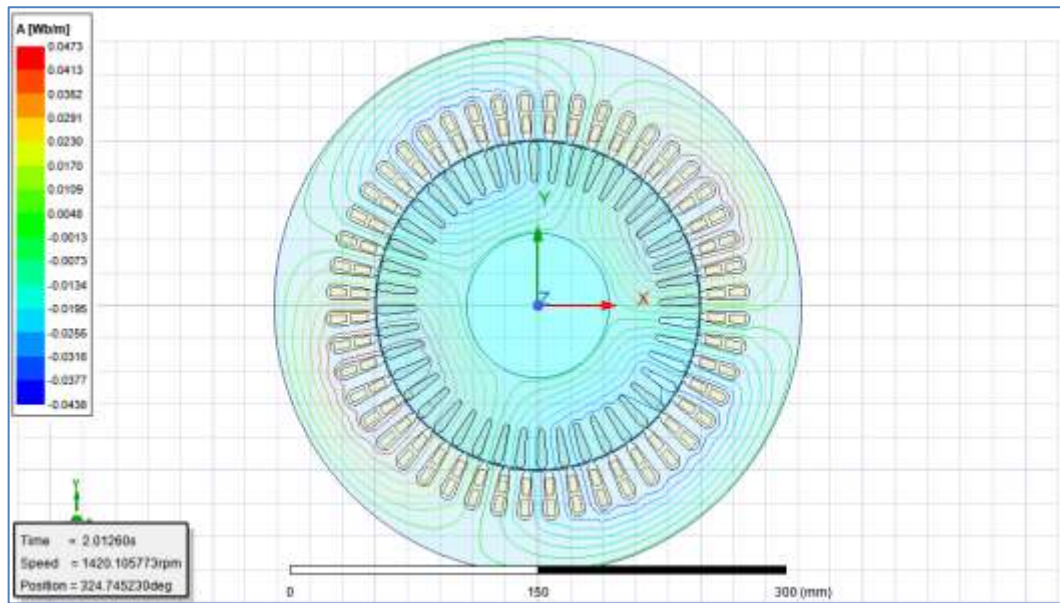
Le tableau suivant résume les effets de cassure de barres sur les grandeurs (vitesse, couple, courant du stator) au démarrage en charge.

**Tableau IV.1** Effet de cassure de barres sur les caractéristiques de la machine étudiée

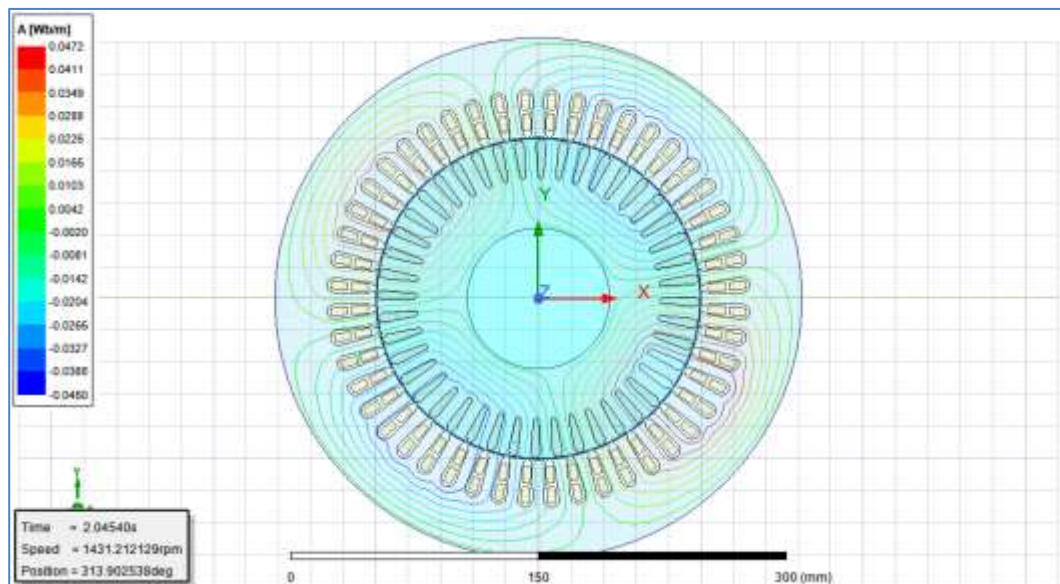
Paramètre	Machine saine	Cassure de 2 barres	Cassure de 4 barres
Temps de démarrage (s)	0.11	0.13	0.16
Vitesse (tr/min)	1431.13	1428.65	1424.14
Ondulation de vitesse (tr/min)	0	5.23	11.58
Couple (N.m)	200.65	200.2	200
Ondulation du couple (N.m)	0	9.2	20
Courant statorique (A)	31.77	32.48	33.55
Ondulation de son amplitude (A)	0	0.75	1.93

#### IV.4. Effet de cassure de barres sur la répartition du champ magnétique de la machine

La figure (IV.5) illustre la distribution des lignes de flux dans la machine qui fait apparaître le déséquilibre provoqué par la rupture de barres. L'absence des courants dans les barres cassées annule leurs participations à la création du flux. On remarque aussi que le déséquilibre de répartition des lignes de flux augmente en fonction du nombre des barres cassées.

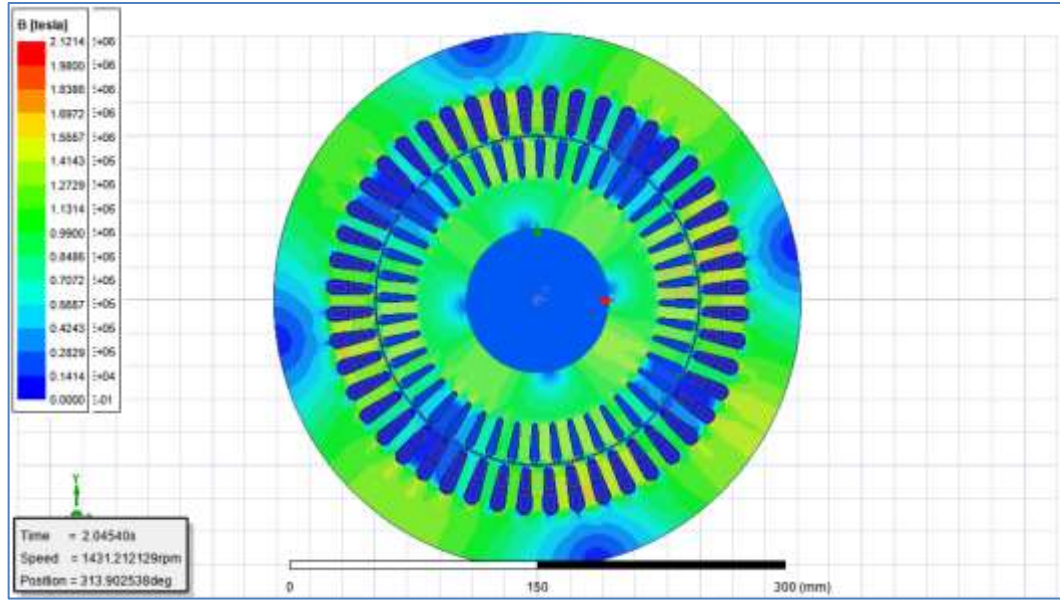


a) Cas de deux barres cassées

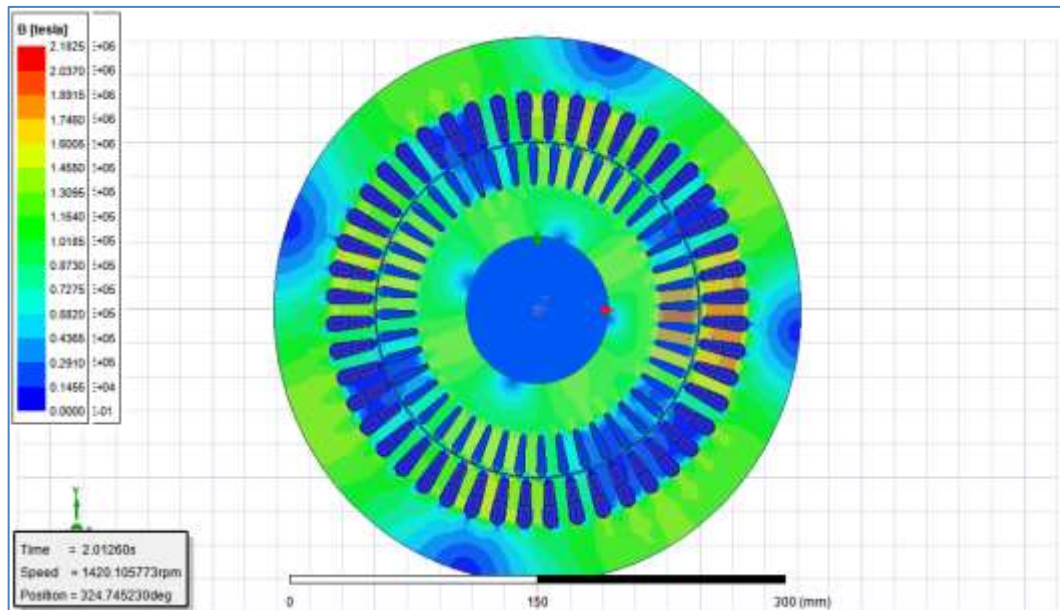


b) Cas de quatre barres cassées

**Figure IV.5** Distribution des lignes du flux dans la machine étudiée fonctionnant en charge et en mode défaillant



a) Cas deux barres cassées



b) Cas quatre barres cassées

**Figure (IV.6)** Répartition de l'induction magnétique dans la machine fonctionnant en charge et en mode défaillant

Ces distributions de l'induction montrent aussi l'accentuation du déséquilibre lors de l'apparition des défauts. Nous remarquons qu'autour du défaut, l'induction est relativement élevée,

ainsi que la saturation des dents autour des barres cassées. Ceci est dû à l'absence de la réaction magnétique aux alentours des barres cassées, en absence du courant induit dans ces barres.

Ce phénomène provoque des pertes fer supplémentaires (dans le stator et dans le rotor de la machine) localisées au voisinage des barres cassées. Nous notons aussi qu'au stator, la distribution de l'induction est déséquilibrée entre les pôles de la machine, notamment avec l'augmentation du nombre de barres cassées.

#### **IV.5 Détection des défauts de cassure de barres par analyse spectrale**

Pendant le fonctionnement de la machine asynchrone à cage, des phénomènes divers 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 et la vitesse de la machine. C'est un outil mathématique très utilisé, il permet de décrire n'importe quel signal par son spectre de fréquence.

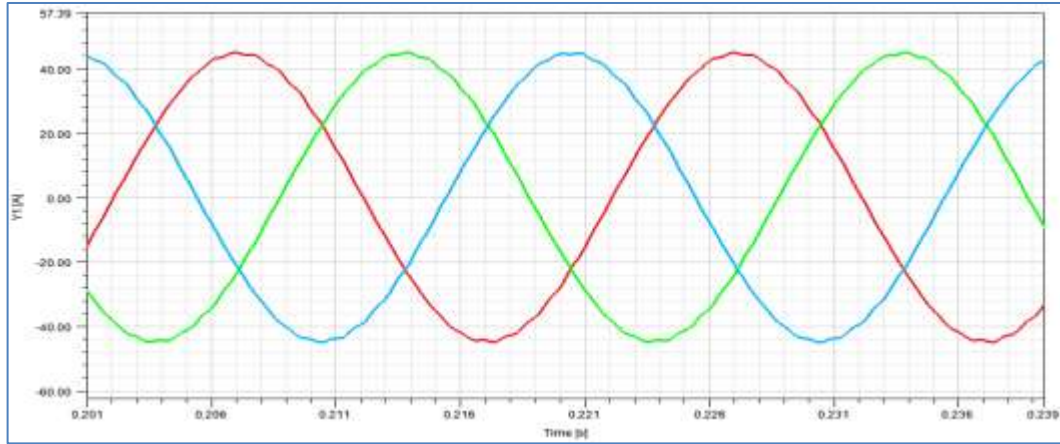
Dans notre travail, les spectres de courant et de vitesse sont visualisés dans une échelle logarithmique normalisée par rapport au fondamental.

##### **IV.5.1. Analyse spectrale du courant statorique**

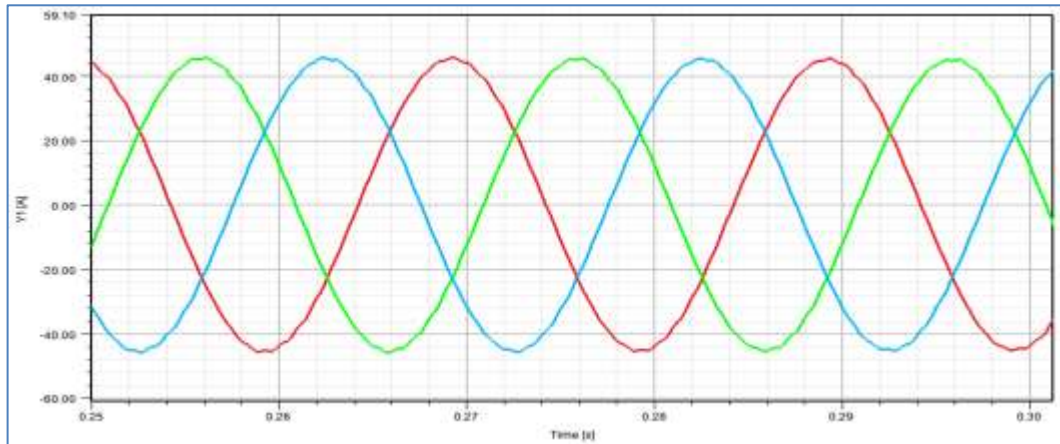
Les courants des phases statoriques sont beaucoup plus intéressants à étudier car ils sont l'une des grandeurs aisément accessibles à la mesure dans la machine asynchrone. Dans ce qui suit, la charge est fixée à 100% de la charge nominale.

D'après la figure (IV.7), on constate qu'il est difficile d'analyser directement le courant statorique. Car, il est clair que l'ordre des grandeurs de la modulation est relativement faible. Seule la représentation fréquentielle du signal du courant statorique, donne des renseignements précieux sur sa composition.

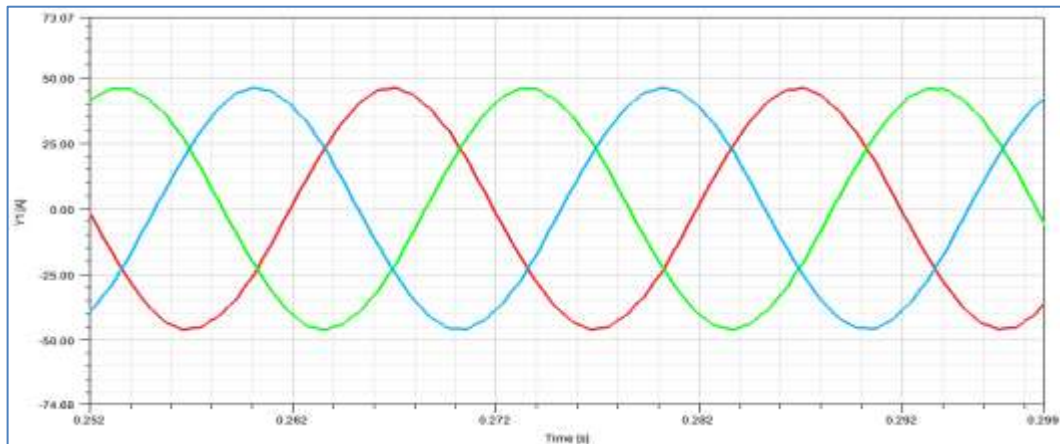
Reprenons tout d'abord le zoom du courant statorique correspondant au mode sain et aux cas ci-dessus correspondant à 2 barres et 4 barres cassées (voir figure IV.7)



a) Mode sain



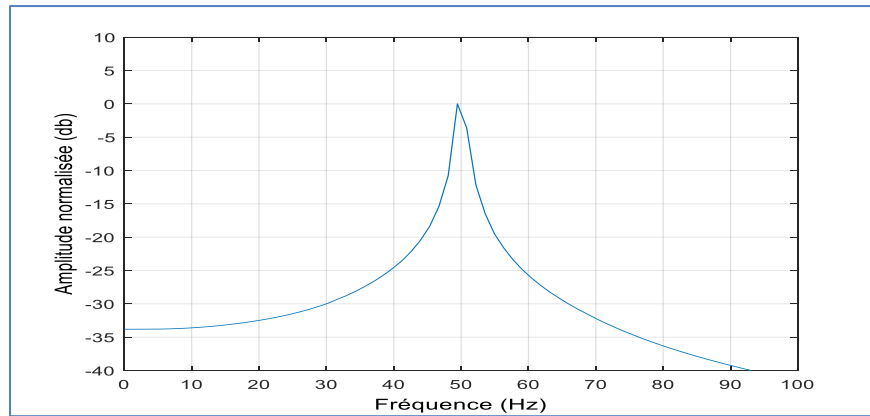
a) Cas de deux barres cassées



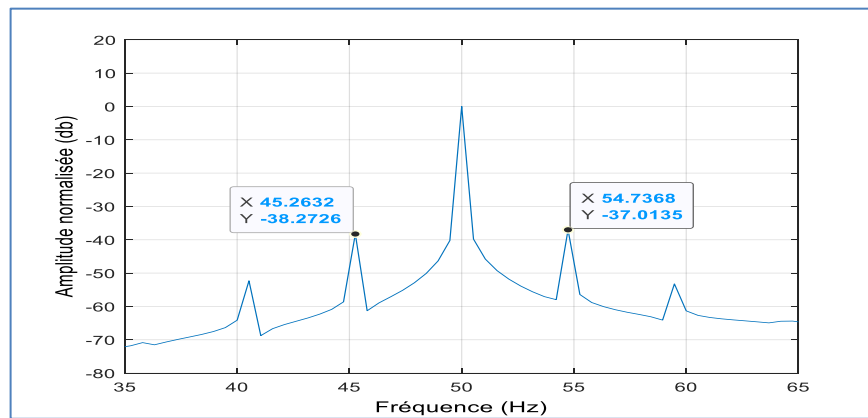
b) Cas de quatre barres cassées

**Figure (IV.7)** Zoom du courant statorique pour différents modes de fonctionnement

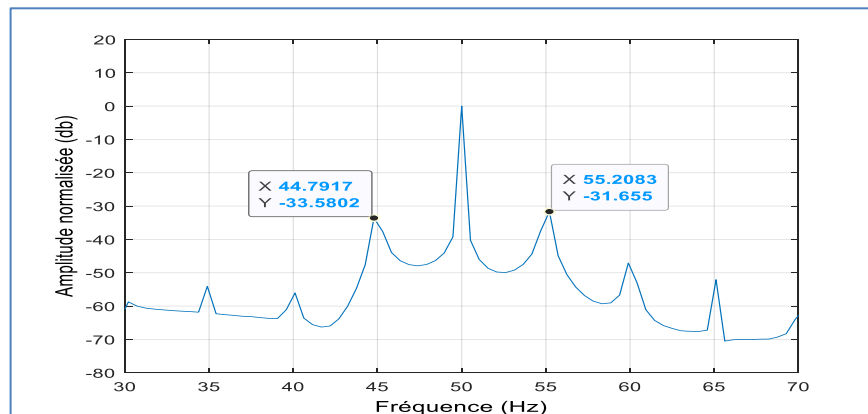
La figure (IV.8) représente les spectres du courant statorique en mode sain et en mode défaillant de cassures de deux barres et de quatre barres.



a) Mode sain



b) Cassures de deux barres



a) Cassure de quatre barres

**Figure (IV.8)** Spectres du courant statorique pour différents modes de fonctionnement

D'après ces spectres, on remarque une apparition des raies ( $1 \pm 2kg$ ) qui augmentent avec le nombre de barres cassées. Ceci est en parfaite harmonie avec les résultats théoriques.

A la base de ces résultats résumés dans le tableau (IV.2), on peut comparer les fréquences des raies avec ceux de la théorie pour discuter de la concordance entre les deux approches.

**Tableau IV.2** Premières raies dans le spectre du courant statorique

<b>Nombre des barres cassées</b>	<b><math>Nr</math> (tr/min)</b>	<b><math>g</math> (%)</b>	<b><math>f_{bt}</math> (Hz) pour <math>k=1</math></b>	<b><math>f_{bs}</math> (Hz) pour <math>k=1</math></b>	<b>Amplitude (dB) pour <math>k=1</math></b>
<b>Une</b>	1430.28	4.65	54.65	54.74	-44.84
<b>Deux</b>	1428.65	4.756	54.76	54.74	-37.01
<b>Trois</b>	1427.43	4.84	54.84	54.74	-33.58
<b>Quatre</b>	1424.14	5.057	55.06	55.26	-32.82
<b>Quatre non adjacents</b>	1424.82	5.012	55.01	55	-39.93

Rappelons ici que théoriquement la fréquence des raies  $f_{bt}$  est exprimée par :

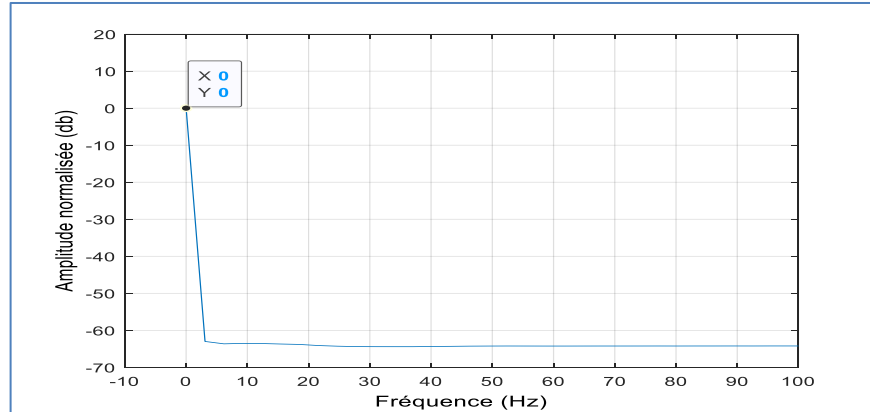
$$f_{bt} = (1 \pm 2 kg) f_s \text{ avec } f_s = 50 \text{ Hz et } k=1, 2, 3, \dots$$

Où  $f_{bs}$  est la fréquence de la première raie du spectre de courant statorique et  $g$  est le glissement.

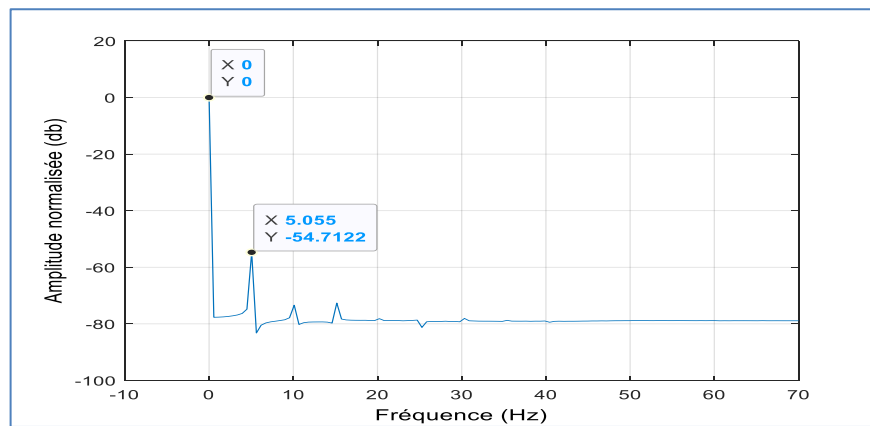
#### IV.5.2. Analyse spectrale de la vitesse

Nous avons effectué aussi une analyse spectrale de la vitesse pour montrer l'effet de la rupture des barres rotorique sur la vitesse.

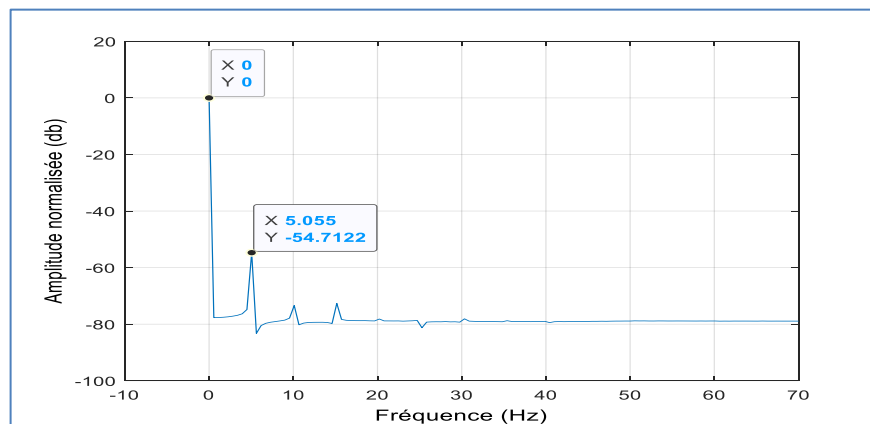
La figure suivante (IV.9) représente le spectre de la vitesse du moteur étudié pour différents mode de fonctionnement (mode sain et mode défaillant).



a) Mode sain



b) Cas de deux barres cassées



c) Cas de quatre barres cassées

**Figure (IV.9)** Spectres de la vitesse de rotation pour différents mode de fonctionnement

On remarque l'apparition des raies dans le spectre de vitesse du moteur fonctionnement en mode défaillant. Pour deux barres cassées, la première raie a une amplitude de -54.71 (dB) à base d'une vitesse de 1428.65 (tr/min). Et pour quatre barres cassées, la première raie est d'une amplitude de -54.71 (dB) mais la vitesse est de 1424.14 (tr/min). Par contre, en mode sain le spectre est sans raies comme on pouvait s'y attendre.

#### **IV.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle à base de la méthode des éléments finis où nous pouvons inclure les défauts au rotor sous *Maxwell-2D*. La simulation nous a permis d'étudier l'influence des défauts sur la distribution des lignes de champs et de l'induction magnétique.

Une analyse harmonique des courants statoriques permet d'établir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques  $(1 \pm 2k) f_s$ .

Enfin l'analyse des défauts de cassure de barres rotoriques par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel *ANSYS-Maxwell-2D* montre que cette méthode est efficace pour étudier l'influence de ces défauts sur le comportement des machines asynchrones, et nous a permis de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor. Par contre, le seul inconvénient de cette méthode est le temps de calcul qui est très long.

# ***Conclusion générale***

## Conclusion générale

L'évolution croissante des machines asynchrones dans les secteurs industriels oblige certains utilisateurs à se prémunir contre l'apparition d'un défaut provoquant le plus souvent un arrêt intempestif de la machine. Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la détection des défauts rotoriques dans les moteurs asynchrones triphasés à cage, plus particulièrement, les défauts de rupture de barres.

Nous avons rappelé brièvement les différents défauts de la machine asynchrone triphasée et les techniques de diagnostic de ces défauts.

Ensuite, la présentation et la caractérisation, d'un moteur asynchrone à cage de 30 kW, ont été effectuées en utilisant l'outil *RMxpert* du logiciel *ANSYS*. Ceci nous a permis de d'élaborer la géométrie 2D et les paramètres requis de cette machine pour une analyse bidimensionnelle de champs dans cette machine.

En effet, le logiciel *ANSYS-Maxwell 2D* a été utilisé pour la simulation du régime dynamique de la machine étudiée en mode sain.

Puis, une analyse des défauts de cassure de barres rotoriques par la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel *Ansys-Maxwell-2D* a été effectuée. Les résultats de simulation concernant le régime dynamique de la machine défaillante ont été présentés et discutés.

Une analyse harmonique par *FFT* des courants statoriques et de la vitesse de rotation nous a permis d'établir une corrélation entre le défaut et les amplitudes des composantes harmoniques.

En conclusion, cette méthode de diagnostic est efficace et permet d'étudier l'influence de ces défauts sur le comportement des machines asynchrones. Elle, nous a permis également de comprendre et de quantifier les conséquences locales des défauts au rotor.

A l'issue de ce travail, nous avons jugé utile de suggérer la continuation des investigations dans plusieurs sens, à savoir :

- Construire une base de données pouvant être utilisée pour l'identification de la nature de défaut et son degré de sévérité ;
- Etudier d'autres défauts rotoriques telle que l'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] M. Helal et S. Ramdane, '*Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts*', Mémoire de Master, Université de Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou, Algérie 2017.
- [2] N. Melam, '*Modélisation des Machines Asynchrones Triphasées à Cage en Vue du Diagnostic par la Méthode des Eléments Finis*', Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie 2015.
- [3] J. Penman, H. G. Sedding and W. T. Fink, '*Detection and Location of Interturn's Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors*', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, pp. 652 :658, 1994.
- [4] D. Gaetan, '*Modélisation et Diagnostic de la Machine Asynchrone en Présence de Défauts*', Thèse de Doctorat, Université Henry Poincaré, France 2004.
- [5] O. Ondel, '*Diagnostic par Reconnaissance des Formes : Application à un Ensemble Convertisseur Machine Asynchrone*', Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France 2006.
- [6] M. E. K. Oumaamar, F. Babaa, A. Khezzar, M. Boucherma and F. Meibody-Tabar, '*Novel Method of Broken Rotor Bars Diagnosis in Induction Machine by DC Supply*', Electromotion journal , 2005.
- [7] T. Boumegoura, '*Recherche de Signature Electromagnétique des Défauts dans une Machine Asynchrone et Synthèse d'Observateurs en vue de Diagnostic*', Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France 2001.
- [8] A. Ghoggal, '*Diagnostic de la Machine Asynchrone Triphasée : Modèle Dédié à la Détection des Défauts*', Mémoire de Magistère, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [9] H. Razik, '*Le Contenu Spectral du Courant Absorbé par la Machine Asynchrone en cas de Défaillance, Etat de l'Art*', La Revue EEEI, Vol. 29, pp. 48 :52, 2002.

- [10] R. Zaiter, '*Commande Directe du Couple DTC d'une Machine Asynchrone avec défaut*', Mémoire de Magister, Université de Biskra, Algérie 2013.
- [11] H. Cherif, '*Détection des Défauts Statorique et Rotorique dans la Machine Asynchrone en Utilisant l'Analyse par FFT et Ondelettes*', Mémoire de Magistère, Université de Biskra, Algérie 2014.
- [12] --, 'RMxpert Manual.pdf | Electric Motor | Magnetic Devices', File available at: <https://www.scribd.com/doc/129666336/RMxpert-Manual-pdf>).
- [13] K. Abdelali, 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, Algérie 2019.
- [14] --, '*Site officiel de ANSYS Maxwell technologies : Electricité – Electronique*', Adresse URL : " [www.directindustry.fr](http://www.directindustry.fr) ".